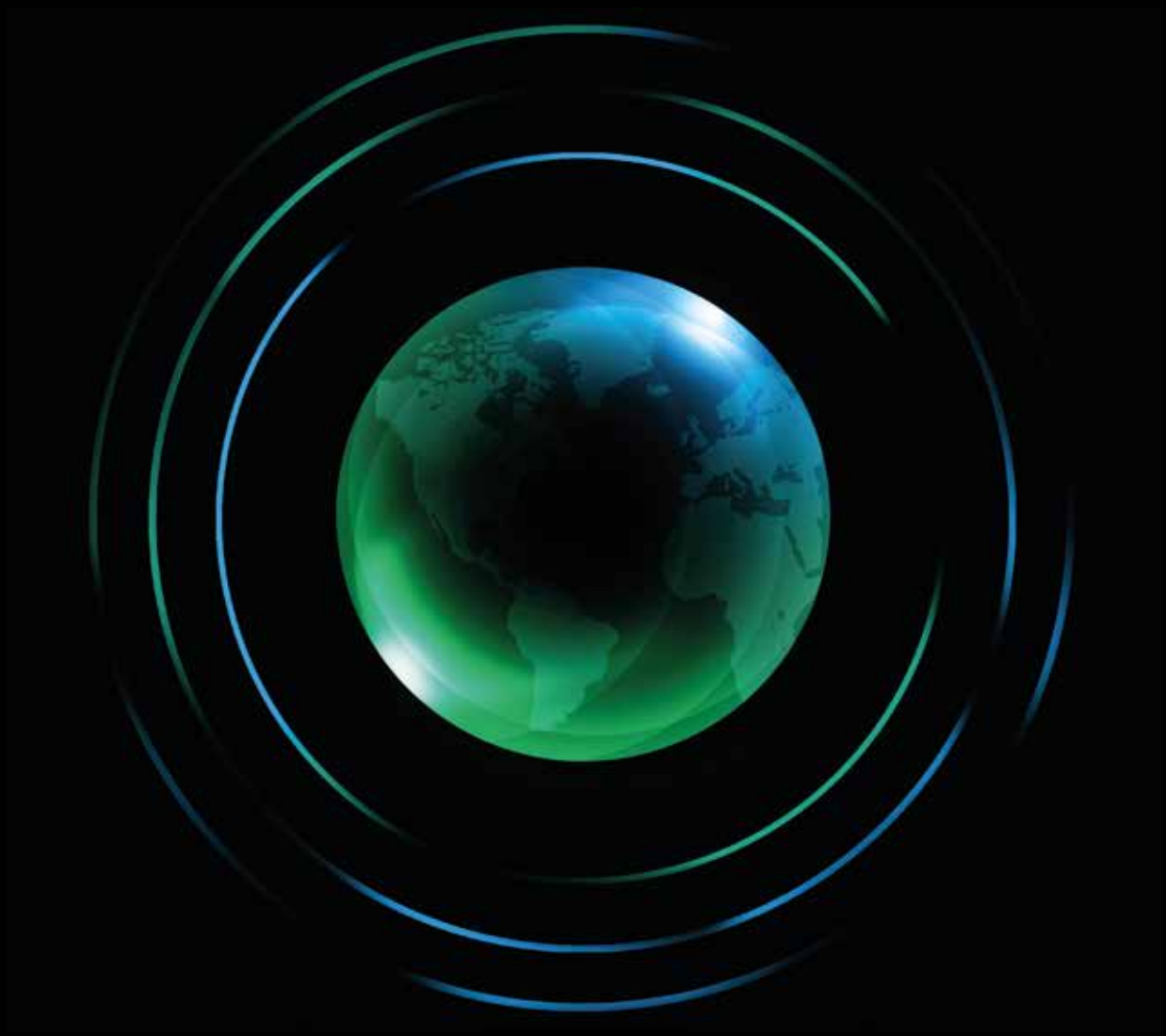
Monografías 25

Instituto de **Geofísica**

Objetivos de desarrollo sostenible: acciones por el clima y la resiliencia

Coordinadores:
Oscar Frausto Martínez y Manuel E. Mendoza



geofísica UNAM

Monografías 25

Instituto de **Geofísica**

Objetivos de desarrollo sostenible: acciones por el clima y la resiliencia

Coordinadores:

Oscar Frausto Martínez
y Manuel E. Mendoza

geofisica UNAM

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geofísica

Unidad Editorial
Colección: *Monografías del Instituto de Geofísica*

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geofísica

Objetivos de desarrollo sostenible: acciones por el clima y la resiliencia.

Coordinadores:
Oscar Frausto Martínez
Manuel E. Mendoza

Editor académico de la serie:
Margarita Caballero Miranda

Editora técnica:
Andrea Rostan Robledo

Formación:
Samantha Fernanda Pita Uraga

Corrección de estilo:
Manlio Márquez Domínguez

Primera edición: junio de 2025 D. R. ©

Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad No. 3000, Col. Copilco, Alcaldía Coyoacán,
C.P. 04510, CDMX
Instituto de Geofísica
Circuito de la, Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán,
C.P. 04150, CDMX

ISBN: 978-607-587-584-2

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

» índice

Introducción **7**

Sección I Amenazas climáticas **9**

1.1 Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para Guatemala 9

1.2 Evaluación de ciclones tropicales sintéticos derivados de los modelos globales de circulación para México 28

1.3 Análisis de tendencias de temperaturas mínimas asociadas al paso de frentes fríos en el estado de Zacatecas 41

1.4 Descripción y afectaciones de una onda de calor histórica en el noroeste de México 54

1.5 Extremos termopluviométricos del estado de Morelos 72

1.6 Tendencias en la temperatura ambiental e índices climáticos en Actopan, Veracruz 84

Sección II Peligros hidrometeorológicos **98**

2.1 Inventario multitemporal de flujos y deslizamientos en una montaña intertropical de México 98

2.2 Datos de precipitación y cambio de uso de suelo en Puerto Vallarta 112

2.3 Efecto del cambio climático sobre el oleaje derivado de ciclones tropicales en mares mexicanos 134

2.4 Características de los eventos de precipitación extraordinaria en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021 144

2.5 Identificación de eventos extremos de precipitación en Colima, México. Un análisis de la Protección Civil 159

Sección III Vulnerabilidad y riesgos **173**

3.1 Factores subyacentes del riesgo de desastres asociados al clima: aportes desde REDESClim 173

3.2 Riesgo por eventos de tornados múltiples en el centro de México 184

3.3 Aeroalérgenos y calor extremo que impactan la salud humana. Caso de estudio: Hermosillo, Sonora 193

3.4 Caracterización de inundaciones pluviales en la comunidad rural maya Santa María Poniente 206

3.5 Resiliencia de la vegetación en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an ante eventos meteorológicos extremos 222

3.6 Efectos ambientales en la cuenca del río Pitillal, asociados a los riesgos de inundación en Puerto Vallarta, Jalisco 239

Sección IV Capacidades adaptativas y resiliencia **256**

4.1 Factores de resiliencia ante huracanes en sistemas de infraestructura de agua potable en una ciudad costera 256

4.2 Resiliencia comunitaria ante riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo 267

4.3 Antropización de la cobertura vegetal y temperatura superficial en los paisajes al sur de Quintana Roo 282

4.4 Implementación de indicadores de resiliencia en playas de uso turístico 299

Sección V La REDESClim y su visión ante los ODS **313**

5.1 Bienestar sostenible ante desastres 313

5.2 Críticas al enfoque antropocéntrico en la gestión integral del riesgo de desastres 324

5.3 Gestión integral de riesgos en México y cambio climático ¿cómo vamos? 337

5.4 Los ODS y los desastres hidrometeorológicos del 2019 en el estado de Veracruz: caso maíz en grano 347

5.5 Agricultura 4.0: Uso de índices espectrales para la productividad, sustentabilidad y la seguridad alimentaria 357

Sobre los autores **369**

» Introducción

En octubre de 2022, como ha sido tradicional en los últimos 12 años, se realizó la décima reunión anual de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (*REDESClim*). La *REDESClim* es una de las redes de investigación del SECIHTI que busca conjuntar la colaboración de investigadores, tecnólogos, empresarios, tomadores de decisiones, y la sociedad para impulsar soluciones al problema de los desastres en México. La reunión se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, en su campus Morelia, con el apoyo del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y de la Coordinación de Servicios Administrativos. En dicha reunión se presentaron 61 trabajos orales elaborados por los miembros de la Red.

Con la intención de difundir el conocimiento y los resultados de la décima reunión, se solicitó a los ponentes un texto en extenso. Los textos fueron estrictamente revisados con el apoyo de 56 expertos en los temas de cada manuscrito. Finalmente, está obra integra 27 capítulos, elaborados por 57 autores. Los capítulos fueron agrupados en cinco secciones: a) Amenazas climáticas, b) Peligros hidrometeorológicos, c) Vulnerabilidad y riesgos, d) Capacidades adaptativas y resiliencia y e) La *REDESClim* y su visión ante los ODS.

La sección de amenazas climáticas se conforma de seis capítulos que abordan los temas de cambio climático, evaluación de ciclones tropicales, análisis de tendencias de temperatura, y afectaciones por ondas de calor y extremos termopluviométricos.

La sección de peligros hidrometeorológicos está conformada por cinco capítulos. Los capítulos versan sobre inventario de flujos y deslizamientos, caracterización de eventos de precipitación extraordinaria, relaciones entre la precipitación y el cambio climático y en los cambios del oleaje derivado de ciclones tropicales.

La tercera sección incluye cinco capítulos sobre vulnerabilidad y riesgos; en ellos se analizan los factores subyacentes del riesgo de desastres, los riesgos asociados a eventos como tornados, o calor extremo, o inundaciones.

La cuarta sección se concentra en estudiar las capacidades adaptativas y la resiliencia y se conforma por cuatro artículos, que documentan la construcción de indicadores de resiliencia, documenta factores de resiliencia, o analiza la resiliencia de comunidades.

La última sección se integra de cinco capítulos que discuten temas como el bienestar sostenible frente los desastres, la gestión integral del riesgo ante el cambio climático, se critica el enfoque antropocéntrico ante los desastres, la relación entre los objetivos de desarrollo y los desastres hidrometeorológicos.

Los esfuerzos de la *REDESClim* están encaminados a incrementar los conocimientos y la comprensión integral de los peligros hidrometeorológicos y climáticos en los distintos espacios geográficos, porque ellos son clave en la formulación de políticas públicas y construcción de estrategias de manejo y mitigación de los riesgos. Este libro es un ejemplo donde los ensayos abordan las acciones sobre clima y resiliencia en el marco de los objetivos de desarrollo sustentable, desde la perspectiva de los miembros de la Red.

Coordinadores:
Dr. Manuel E. Mendoza
Morelia, Michoacán
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Oscar Frausto
Cozumel, Quintana Roo
Universidad Autónoma de Quintana Roo

» Sección I Amenazas climáticas

1

1.1 Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para Guatemala

Paris Rivera
Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas, Universidad Mariano Gálvez de Guatemala

Wener Ochoa
Escuela de Estudios de Postgrados, Universidad de San Carlos de Guatemala

Jorge Humberto Bravo Mendez
Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz, México

Palabras Clave: Escenarios de Cambio Climático, temperatura, precipitación.
ODS: 13 Accion por el Clima.

Introducción

Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), desde mediados del siglo XX, el sistema climático global ha experimentado cambios sin precedentes en comparación con los registros de observaciones desde 1850. Estos cambios incluyen el calentamiento de la atmósfera, el suelo y los océanos, con incrementos globales de temperatura superiores a 1 °C, la reducción de las masas de hielo y nieve, así como el aumento del nivel del mar en los últimos años. Uno de los impactos esperados de este aumento de temperatura es la acidificación de los océanos, lo que lleva a un aumento en la liberación de CO_2 de los océanos debido a una retroalimentación positiva. Otro impacto potencial es la alteración del ciclo hidrológico, lo cual afectará todos los procesos de producción a nivel mundial. Estos cambios se deben al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero, resultado de la industrialización y las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la transformación inadecuada de bosques y ecosistemas naturales en monocultivos y áreas urbanizadas que impermeabilizan el suelo (IPCC, 2014).

En este contexto, el objetivo de este estudio es analizar los escenarios de cambio climático en Guatemala, basados en datos del CMIP-5. Para lograrlo se realizaron análisis detallados de las proyecciones climáticas utilizando modelos climáticos globales (MCG), para obtener información de los cambios en temperatura y precipitación en Guatemala. Los resultados obtenidos proporcionan información crucial para la planificación de medidas de adaptación y mitigación en un contexto de cambio climático en evolución. La justificación de este estudio radica en la urgente necesidad de comprender y anticipar estos cambios climáticos, a fin de tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias de adaptación en un país altamente vulnerable a los impactos del cambio climático. A continuación, se presenta una descripción de los temas clave relacionados con el desarrollo del estudio, seguido de un contexto nacional sobre el cambio climático en Guatemala. Posteriormente, se detalla la metodología utilizada, se presentan los resultados y se discuten las conclusiones obtenidas en este estudio.

Escenarios de cambio climático

Para representar la influencia de las actividades humanas en el sistema climático, la comunidad científica utiliza "escenarios" que son definidos por el IPCC como representaciones plausibles y, en ocasiones, simplificadas del clima futuro. Estos escenarios se basan en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherentes y se utilizan para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico. Además, pueden ser utilizados como datos de entrada en modelos de impacto. Las proyecciones climáticas suelen servir como punto de partida para definir estos escenarios climáticos, aunque a menudo se requiere información adicional, como datos sobre el clima actual observado (IPCC, 2013).

Es importante destacar que los escenarios son proyecciones, no pronósticos, por lo que su generación es más relevante para la planificación a largo plazo, que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y adaptarse al cambio climático. Los escenarios climáticos son generados por diversas instituciones de investigación climática en todo el mundo, lo que conlleva una gran incertidumbre debido a diferentes resoluciones espaciales, temporales, datos de inicialización, equipamiento informático, análisis, entre otros factores (Pérez-García *et al.*, 2012).

El Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC, publicado en 2013-2014, introdujo un conjunto de escenarios llamados Vías de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Estos escenarios reemplazaron los estándares del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES) utilizados en informes anteriores.

Las Vías de Concentración Representativas consisten en cuatro rutas diferentes: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 y RCP2.6 (también conocido como RCP3-PD). Los números asociados a cada RCP se refieren a los forzamientos radiativos proyectados para cada escenario. El término "PD" indica, en RCP2.6, un escenario de pico y declive.

El nombre "vías de concentración representativas" se eligió para resaltar la lógica detrás de su uso. Los RCP se llaman "vías" para enfatizar que su propósito principal es proporcionar proyecciones temporales de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI). Además, el término "vía" pretende enfatizar que no sólo es importante una concentración específica a largo plazo o un resultado de forzamiento radiativo, como un nivel de estabilización, sino también la trayectoria que se sigue a lo largo del tiempo para alcanzar ese resultado. Los escenarios son considerados "representativos" porque son uno de varios escenarios diferentes que tienen características similares de forzamiento radiativo y emisiones (Lenzer *et al.*, 1999).

Estos escenarios RCP han desempeñado un papel crucial en la investigación climática, ya que proporcionan una base sólida para evaluar los impactos del cambio climático y desarrollar estrategias de mitigación y adaptación. Cada RCP representa una combinación única de factores socioeconómicos, tecnológicos y políticos que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, en consecuencia, en el cambio climático proyectado. En otras palabras, cada RCP traza una trayectoria específica de forzamiento radiativo a lo largo del tiempo, lo que nos permite comprender mejor cómo las emisiones y los factores socioeconómicos interactúan para configurar el futuro clima de nuestro planeta (Armenta *et al.*, 2016).

En la Tabla 1 se presentan los escenarios generados por los modelos climáticos globales utilizados en el Quinto Informe de Evaluación (AR5). Estos modelos incorporaron diversos impulsores para generar los cuatro escenarios, como el desarrollo socioeconómico, el crecimiento demográfico, el cambio tecnológico, el tipo de desarrollo y las decisiones políticas. Cada escenario representa un nivel diferente de emisiones: el RCP 8.5 representa emisiones altas, el RCP 6.0 representa emisiones medianas-altas, el RCP 4.5 representa emisiones medianas-bajas y el RCP 2.6 representa emisiones bajas (IPCC, 2014; Ogle *et al.*, 2014). La variación entre los escenarios se expresa en términos de forzamiento radiativo, que se mide en W/m^2. El forzamiento radiativo

representa el cambio en el flujo de radiación en la parte superior de la atmósfera debido a factores externos del cambio climático, como las concentraciones de dióxido de carbono o la radiación solar (IPCC, 2013).

En otras palabras, el forzamiento radiativo es un indicador del cambio en el balance de radiación del sistema climático. Un forzamiento radiativo positivo indica un calentamiento del sistema, mientras que uno negativo indica un enfriamiento. En el contexto del cambio climático, el forzamiento radiativo está principalmente relacionado con el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y otros factores que afectan la radiación entrante y saliente de la Tierra (IPCC, 2020).

Tabla 1. Escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas RCP.

Escenario	Forzamiento radioactivo (fr)	Tendencia del Fr	(CO2) en el año 210
RCP_2.6	2.6 W/m^2	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP_4.5	4.5 W/m^2	Estable en 2100	538 ppm
RCP_6.0	6.0 W/m^2	Creciente	670 ppm
RCP_8.5	8.5 W/m^2	Creciente	936 ppm

Fuente: Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas" (2013).

Modelos climáticos globales

Los MCG son una representación numérica multidimensional de la dinámica atmosférica y, por lo tanto, de la circulación general alrededor del planeta. Estos modelos buscan representar procesos físicos en la atmósfera, los océanos, la criósfera y en la superficie terrestre. En la actualidad son la herramienta disponible más avanzada que se tiene para simular la respuesta futura del sistema climático global a los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, 2013).

En general, los MCG tienen una resolución espacial baja, con valores que oscilan entre 1° y 3° de latitud y longitud. Esta limitada resolución espacial dificulta la representación precisa de fenómenos locales relacionados con la meteorología y la orografía a nivel regional o nacional (Armenta *et al.*, 2016). Para superar estas limitaciones, se emplean diversos métodos de reducción de escala. Entre ellos se encuentran:

- Métodos estadísticos: Estos métodos establecen relaciones estadísticas entre las condiciones locales y las estadísticas de largo plazo, analizando los datos observados de una variable durante los periodos de estudio. Un ejemplo es el método Delta (Navarro-Racines *et al.*, 2020).
- Métodos dinámicos: Estos métodos requieren el uso de Modelos Regionales de Circulación (MRC) para realizar la reducción de escala. Los MRC utilizan datos provenientes de los MCG y resuelven las ecuaciones primitivas a una resolución espacial deseada. Sin embargo, estos métodos demandan una alta capacidad computacional, ya que involucran el procesamiento de una gran cantidad de datos, lo que se traduce en un mayor tiempo de ejecución en comparación con los métodos estadísticos (Amador & Alfaro, 2009).
- Métodos dinámico-estadísticos: Estos métodos combinan aspectos de los enfoques dinámicos y estadísticos para la reducción de escala (Carabajal, 2016). Por ejemplo, pueden emplear un MRC para capturar la dinámica del clima a una escala más fina y luego aplicar métodos estadísticos para ajustar y calibrar los resultados a las condiciones locales.

Cada método de reducción de escala tiene ventajas y desventajas. Los métodos estadísticos son eficientes computacionalmente, pero pueden tener limitaciones en la representación de procesos dinámicos complejos. Los métodos dinámicos ofre-

cen una mayor resolución espacial, pero requieren de recursos computacionales significativos. Los métodos dinámico-estadísticos buscan aprovechar las fortalezas de ambos enfoques para obtener reducciones de escala más precisas. La elección del método depende de los objetivos de investigación y los recursos disponibles. En algunos casos, combinar métodos puede proporcionar resultados más completos y precisos. En este estudio se utilizó exclusivamente el método estadístico.

Modelos CMIP5

En septiembre de 2008, 20 grupos de modelación del clima de todo el mundo, en colaboración con el World Climate Research Programme (WCRP), el Working Group on Coupled Modelling (WGCM), sí como con la participación del International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP) y el proyecto Analysis, Integration and Modeling of the Earth System (AIMES), se reunieron con el objetivo de promover un nuevo conjunto de experimentos de modelos climáticos coordinados. Estos experimentos constituyen la quinta fase del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5-) (Armenta *et al.*, 2016).

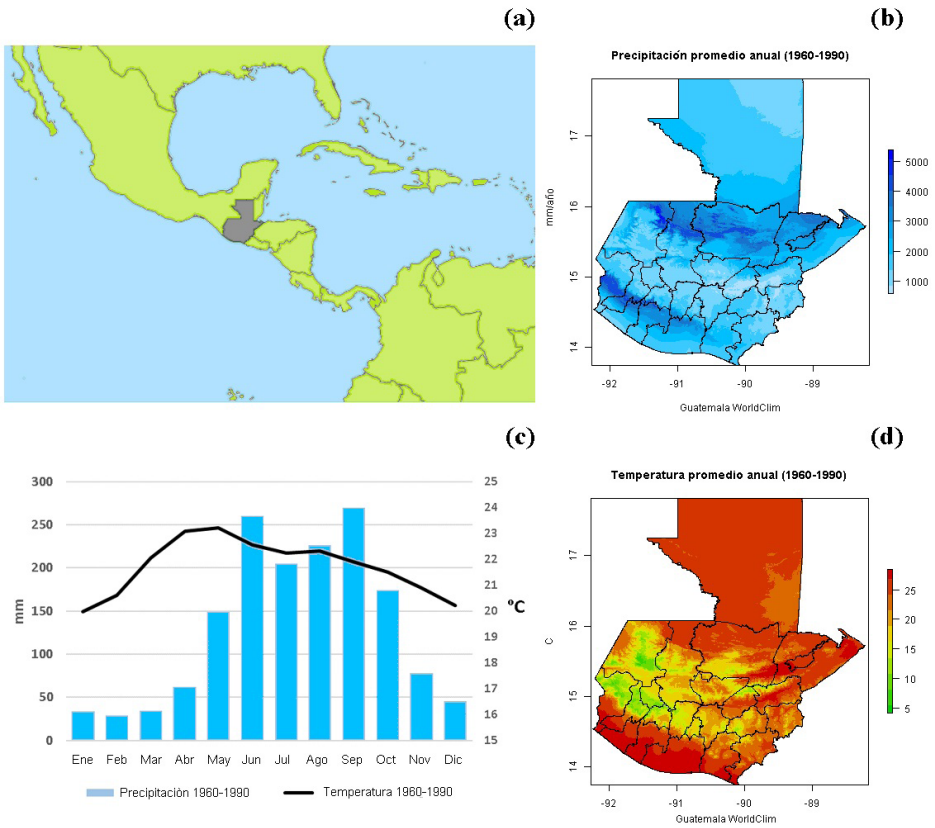
Los modelos generados por el CMIP5 utilizan estimaciones de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) para llevar a cabo sus simulaciones. Por lo tanto, la comunidad científica ha identificado escenarios específicos de emisiones como rutas plausibles hacia la consecución de cada trayectoria de forzamiento radiativo, como antes se detalló en la Tabla 1.

La incertidumbre es inherente a la ciencia y, por lo tanto, no escapa a las investigaciones sobre el cambio climático. En términos generales, indica el grado de confianza que se tiene en determinados resultados a través de la incerteza asociada a estos. Ésta puede surgir debido a la falta de información y a aspectos internos desconocidos en las proyecciones. La incertidumbre es el estado de conocimiento incompleto, que puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido o incluso cognoscible (IPCC, 2013).

Contexto nacional

La ubicación geográfica de Guatemala hace que el clima sea de características tropicales, siendo entonces influenciado por los sistemas y fenómenos meteorológicos característicos de estas regiones como: ondas del este, ciclones, vaguada monzónica, oscilación Madden Julian, ondas ecuatoriales y zona de convergencia intertropical. A su vez es influenciada por sistemas característicos de latitudes medias, como los frentes fríos, y también es influenciada por los vientos alisios de componente noreste, ocasionados por el movimiento del aire desde el alta subtropical hacia la baja ecuatorial y la intervención de la fuerza de Coriolis. Estos varían en su dirección por efectos topográficos del país, pero en general son de régimen constante.

La ubicación geográfica de Guatemala determina un clima con características tropicales, influenciado por sistemas y fenómenos meteorológicos típicos de estas regiones. Entre estos factores se encuentran las ondas del este, los ciclones, la vaguada monzónica, la oscilación Madden Julian, las ondas ecuatoriales y la zona de convergencia intertropical. Además, la influencia de sistemas propios de latitudes medias, como los frentes fríos, se hace presente. Los vientos alisios, provenientes del noreste debido al movimiento del aire desde los sistemas de alta presión subtropical hacia los sistemas de baja presión ecuatorial y afectados por la fuerza de Coriolis, también tienen un papel importante en la configuración del clima guatemalteco. Aunque su dirección puede variar debido a los efectos topográficos del país, en general, mantienen un régimen constante (Bardales-Espinoza *et al.*, 2019).



► **Figura 1.** (a) Localización de Guatemala en Centroamérica; (b) distribución espacial de la precipitación anual; (c) ciclo anual de precipitación y temperatura; (d) distribución espacial de la temperatura media anual para el periodo 1960-1990, por WorldClim V1.2.

Fuente: Elaboración propia.

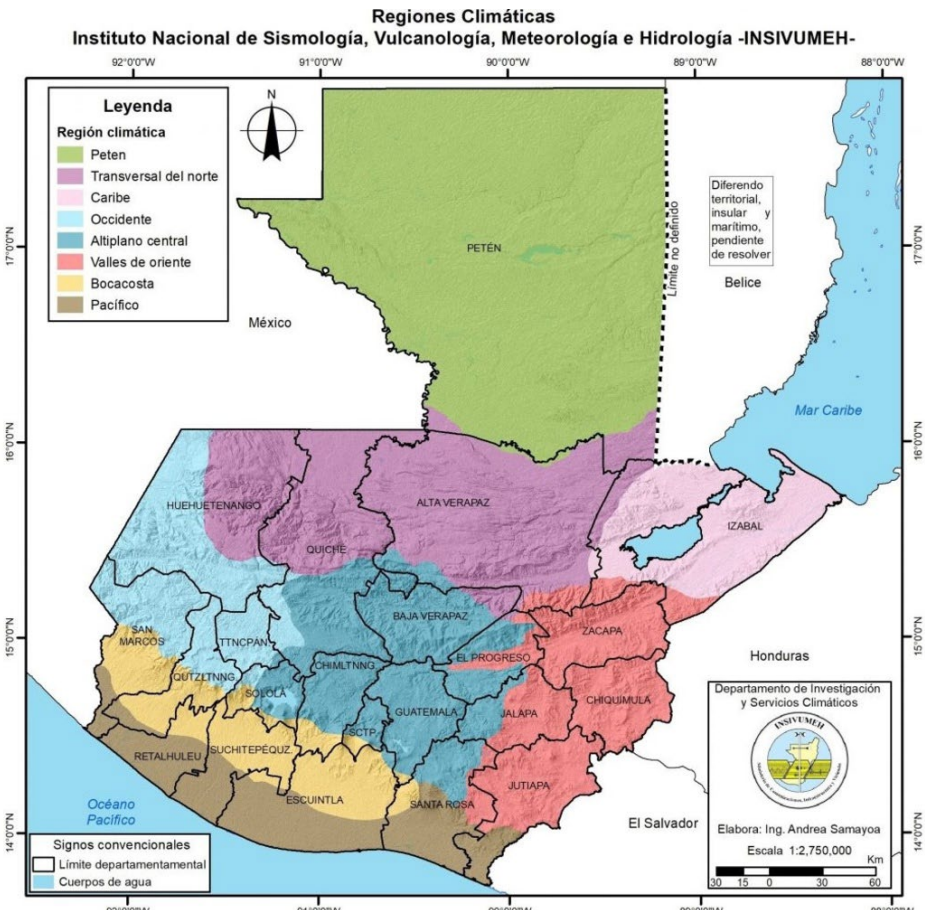
La Figura 1 muestra la localización de Guatemala en Centroamérica en la Figura 1(a); Figura 1(b) la distribución de la precipitación en el país, donde se demuestra que la mayor acumulación se encuentra en las partes central-norte y sudoeste; Figura 1(c) muestra la temperatura media y la distribución de precipitación en el ciclo anual, revelando que los valores de temperatura más alta ocurren en mayo y junio, sí como que el periodo lluvioso de precipitación de mayo a octubre, con una sequía de verano en julio y agosto; la Figura 1(d) muestra la distribución espacial de la temperatura, con las partes norte y sur del país como los lugares más cálidos.

En Guatemala no se experimentan las cuatro estaciones del año de la misma manera que en los países ubicados en latitudes medias, debido a su proximidad al ecuador terrestre. Por este motivo, es más conveniente dividir las manifestaciones climáticas en temporadas, siendo la "seca" de noviembre a abril y la "lluviosa" de mayo a octubre (MARN, 2015). Es importante destacar que la duración y manifestación de estas temporadas puede variar dependiendo de la ubicación de las regiones en Guatemala.

Dentro de la temporada seca, se observa una subtemporada "fría" que se manifiesta en los meses de diciembre, enero y febrero. En contraste, durante la estación lluviosa, se presenta una sequía de medio verano conocida como "canícula", que tiene lugar en los meses de julio y agosto, caracterizada por una disminución en las precipitaciones (Rivera *et al.*, 2020).

Es crucial tener en cuenta que la intensidad y duración de estas temporadas pueden variar anualmente, influenciadas por forzantes climáticos como el fenómeno del El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), la Oscilación Multi-decadal del Atlántico (OMA), la Oscilación Cuasi-bienal (OCB), entre otras (Bardales-Espinoza *et al.*, 2019). Estos fenómenos climáticos juegan un papel importante en la dinámica climática del país.

Las condiciones previamente descritas son generales, ya que cada región de Guatemala presenta sus propias características meteorológicas, climáticas, topográficas, de vegetación y geológicas. El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) ha definido ocho regiones en el país: la región Caribe, la región de los Valles de Oriente, la región de Occidente, la región Boca Costa, la región Pacífico, la región del Altiplano Central, la región Franja Transversal del Norte y la región Norte (Ochoa-Orozco *et al.*, 2022), ver Figura 2.



► **Figura 2.** Regiones climáticas de Guatemala.

Fuente: Elaboración propia con datos de INSIVUMEH (2017).

El propósito fundamental de este estudio es comprender cómo el cambio climático, causado por las actividades humanas, afectará la variabilidad natural de los patrones climáticos y meteorológicos del país. Para alcanzar este objetivo, nos proponemos explorar los posibles escenarios futuros y evaluar los impactos potenciales que podrían ocurrir. En concreto, nos preguntamos: ¿Cuáles son los cambios en temperatura y precipitación que las proyecciones de cambio climático indican para Guatemala?

Metodología

Las proyecciones de temperatura y precipitación, bajo los escenarios de cambio climático, para Guatemala fueron generadas mediante el cálculo del promedio de los modelos proporcionados por el CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research). Estos modelos cuentan con una reducción de escala espacial basada en el método delta, referido a una climatología base del periodo 1960-1990, del WorldClim versión 1.2 (repositorio con variables climáticas).

La escala espacial utilizada es de un kilómetro cuadrado, y los escenarios considerados son RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Estos escenarios tienen resolución temporal mensual para cada uno de los periodos climáticos futuros establecidos por el IPCC: 2020-2049, 2040-2069, 2060-2089 y 2070-2099.

Para el escenario RCP_2.6 se utilizaron 19 modelos para realizar el promedio para Guatemala; para el escenario RCP_4.5 se utilizó el promedio de 31 modelos; para el escenario RCP-6.0 se utilizaron 19; y, finalmente, para el escenario pesimista RCP_8.5 se utilizó el promedio de 33 modelos. Los datos de los modelos fueron proporcionados directamente por el CGIAR para Guatemala, pero se puede encontrar los datos para el resto del mundo en https://ccafs-climate.org/data_bias_correction/.

Reducción de escala del método delta

El factor de cambio delta se define como la diferencia entre la media de largo plazo (30 años) de una variable climática en el futuro y el periodo histórico. Para cada periodo futuro, se calcula la anomalía (cambio delta) con respecto al clima base del GCM para cada variable y mes. Se usan diferencias absolutas para las temperaturas (Ec. 1) y cambios relativos para la precipitación (Ec. 2).

$$Xi=Xfi-Cci \quad (1)$$

$$Xi=Xfi-XciXci \quad (2)$$

Donde ΔXi es el cambio delta, Xci la media de 30 años de la variable en el clima actual y Xfi es la media de 30 años de la variable en el clima futuro de cada GCM en el mes i. Detalles de método pueden encontrarse en Navarro-Racines *et al.* (2020).

Modelos utilizados

Los modelos promediados para el análisis del presente estudio se observan en la Tabla 2 (Navarro-Racines *et al.*, 2020).

Tabla 2. Modelos promediados consultados.

No.	Nombre	Institución	Referencia
1	bcc-csm1-1	Beijing Climate Center Climate System Model.	XIN *et al.* (2013)
2	bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center Climate System Model.	XIN *et al.* (2013)
3	bnu-esm	Beijing Normal University, Earth System Model.	Ji *et al.* (2014)
4	cccma-canesm2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.	Arora *et al.* (2011)
5	cesm1-bgc	National Science Foundation federally funded.	Long *et al.* (2013)
6	cesm1-cam5	National Science Foundation federally funded.	Lamarque (2013)
7	cnrm-cm5	National Center for Meteorological Research, Meteo-France and CNRS laboratory.	Voldoire *et al.* (2013)
8	csiro-access1-0	Australia's commonwealth scientific and industrial research organization.	Bi *et al.* (2013)
9	csiro-access1-3	Australia's commonwealth scientific and industrial research organization.	Bi *et al.* (2013)
10	csiro-mk3-6-0	Australia's commonwealth scientific and industrial research organization. Queensland Climate Change Centre of Excellence.	Rotstayn *et al.* (2010)
11	ec-earth	European Community.	Hazeleger *et al.* (2010)
12	fio-esm	First Institute of Oceanography.	Qiao *et al.* (2013)
13	gfdl-cm3	National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.	Donner *et al.* (2011)
14	gfdl-esm2g	National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.	Dunne *et al.* (2012)
15	gfdl-esm2m	National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.	Dunne *et al.* (2012)
16	giss-e2-h	National Aeronautics and Space Administration.	Schmidt *et al.* (2014)
17	giss-e2-r	National Aeronautics and Space Administration.	Miller *et al.* (2014)

No.	Nombre	Institución	Referencia
18	inm-cm4	Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model.	Voldoire *et al*. (2013)
19	ipsl-cm5a-lr	Institut Pierre Simon Laplace.	Hourdin *et al*. (2013)
20	ipsl-cm5a-mr	Institut Pierre Simon Laplace.	Hourdin *et al*. (2013)
21	ipsl-cm5b-lr	Institut Pierre Simon Laplace.	Hourdin *et al*. (2013)
22	lasg-fgoals-g2	Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences.	Li *et al*. (2013)
23	miroc-esm	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.	Watanabe *et al*. (2010)
24	miroc-esm-chem	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.	Watanabe *et al*. (2010)
25	miroc-miroc5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.	Watanabe *et al*. (2010)
26	mohc-hadgem2-cc	Met Office Hadley Centre.	Collins *et al*. (2011)
27	mohc-hadgem2-es	Met Office Hadley Centre.	Collins *et al*. (2011)
28	mpi-esm-lr	Max Planck Institute.	Giorgetta *et al*. (2018)
29	mpi-esm-mr	Max Planck Institute.	Jungclaus *et al*. (2014)
30	mri-cgcm3	Meteorological Research Institute.	Yukimoto *et al*. (2012)
31	ncar-ccsm4	National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model.	Gent *et al*. (2011)
32	ncc-noresm1-m	Norwegian Climate Centre.	Bentsen *et al*. (2014)
33	nimr-hadgem2-ao	National Institute of Meteorological Research.	Lee *et al*. (2010)

Fuente: Elaboración propia.

Con base en estas proyecciones, se crearon gráficos mediante el uso de interpolación para periodos decadales hasta finales de siglo, utilizando la climatología base del periodo 1960-1990. En consecuencia, las gráficas representan anomalías de temperatura y anomalías porcentuales de precipitación media anual. Para la generación de valores decadales, se empleó el valor de cada periodo futuro, centrado en su década correspondiente. Posteriormente, mediante interpolación simple, se generaron los valores para las décadas intermedias faltantes.

Este enfoque nos permite visualizar de manera más detallada y comprensible la evolución de las anomalías climáticas a lo largo del tiempo, ofreciendo una representación más precisa de los posibles cambios climáticos que podrían ocurrir hasta finales de este siglo.

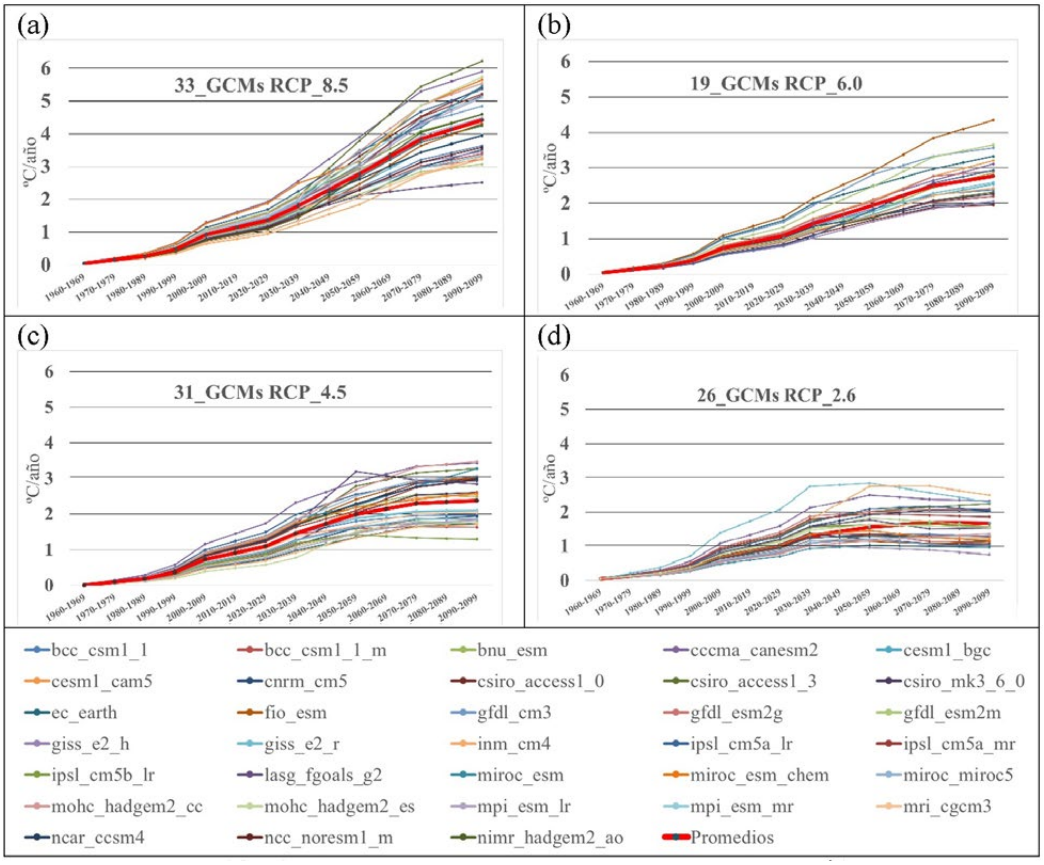
Resultados

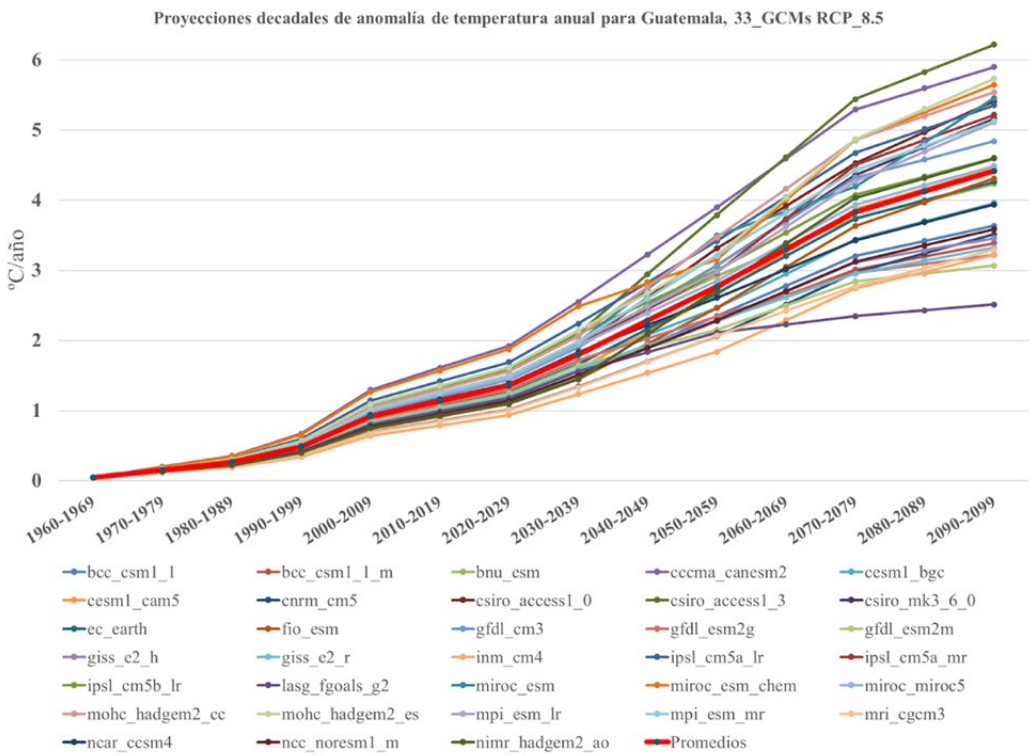
Los resultados se presentan a través de figuras que incluyen gráficos y mapas, así como tablas que fundamentan las conclusiones correspondientes. Estas figuras exhiben la variabilidad en las proyecciones de los modelos del CMIP5 para cada variable analizada, permitiendo explorar la amplia gama de posibilidades de proyección disponibles para Guatemala, mediante los diferentes modelos utilizados en cada escenario RCP.

En la Figura 3 se pueden observar las proyecciones de 33 modelos CMIP5 para la temperatura media de Guatemala. (a) Muestra los valores proyectados para finales de siglo, con aumentos de temperatura que varían entre 2.5°C y más de 6°C para el escenario RCP_8.5. (b) Representa el escenario RCP_6.0, con un promedio de 19 modelos que proyectan aumentos de 2°C a más de 4°C. (c) Muestra el escenario RCP_4.5, con proyecciones de 1.5°C a más de 3.5 °C. (d) Ilustra el escenario RCP_2.6, con variaciones de 0.8°C a 2.6°C. Cada línea representa la proyección de temperatura de un modelo específico, presentados debajo de las respectivas gráficas.

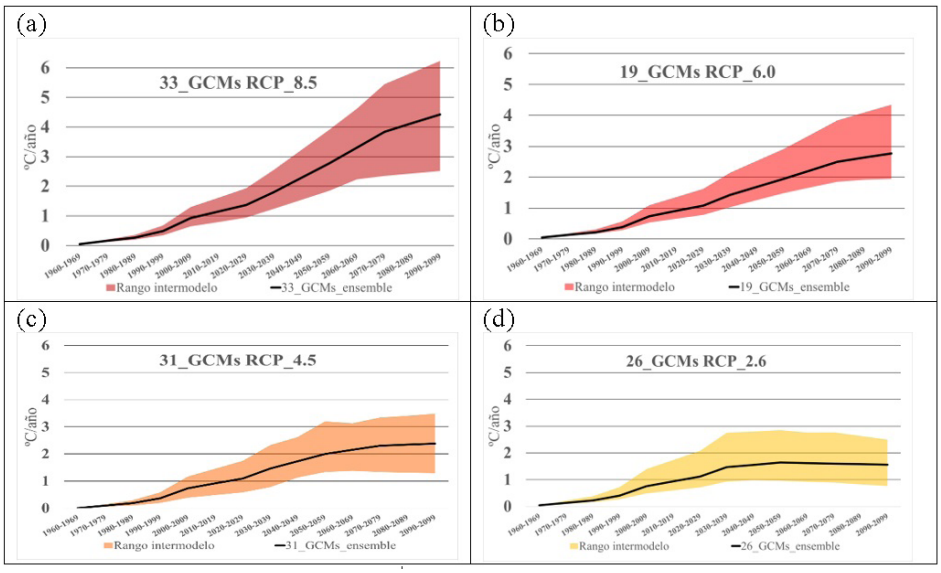
En la Figura 4 se muestran los promedios de cada escenario RCP en línea negra con su respectivo rango intermodelo en ashurado en colores cálidos. (a) El escenario RCP_8.5 es el que más temperatura proyecta y, además, el que mayor incertidumbre presenta entre modelos; (b), (c) y (d) presentan un cono de proyección (rango intermodelo) menor que el escenario RCP_8.5, así como su promedio de modelos.

► **Figura 3.** Proyecciones decadales de anomalía de temperatura media para Guatemala, RCPs.





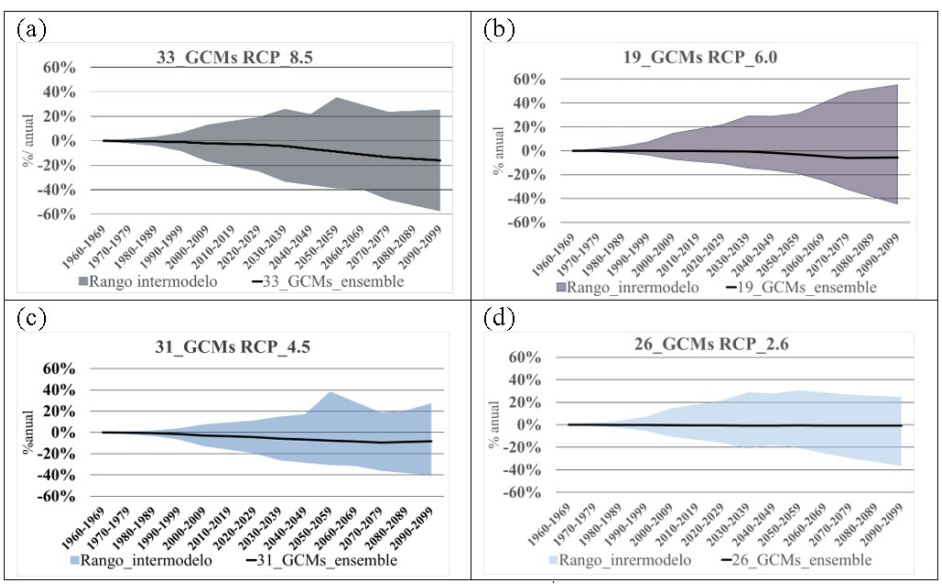
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 4.** Proyecciones decadales promedio de anomalía de temperatura media para Guatemala, RCPs.

Fuente: Elaboración propia.

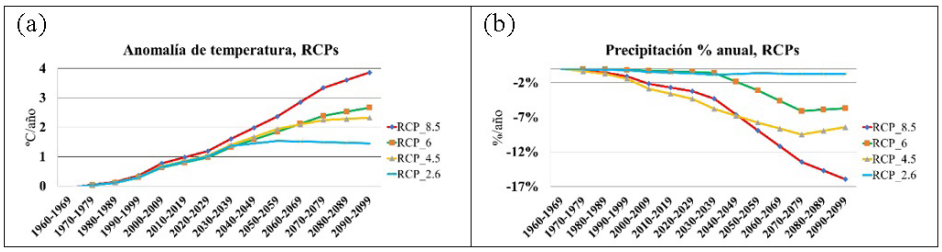
En la Figura 5 (a) se puede observar variaciones para finales de siglo que van desde reducciones de entre 0 % a 60 % de precipitación media anual, pero en otros modelos se puede observar aumentos de hasta un 20 % en el escenario RCP_8.5. Los porcentajes promedio de precipitación de cada escenario RCP están representados en la línea negra, además de su respectivo rango intermodelo en ashurado en colores fríos. (a) El escenario RCP_8.5 es el que más disminución proyecta hacia finales de siglo, cercana al 16% de precipitación anual, (b) 6% para el escenario RCP_6.0, (c) 8% para el escenario RCP_4.5 y (d) l % para el escenario RCP_2.6.



► **Figura 5.** Proyecciones decadales de anomalía de precipitación porcentual anual para Guatemala, RCPs.

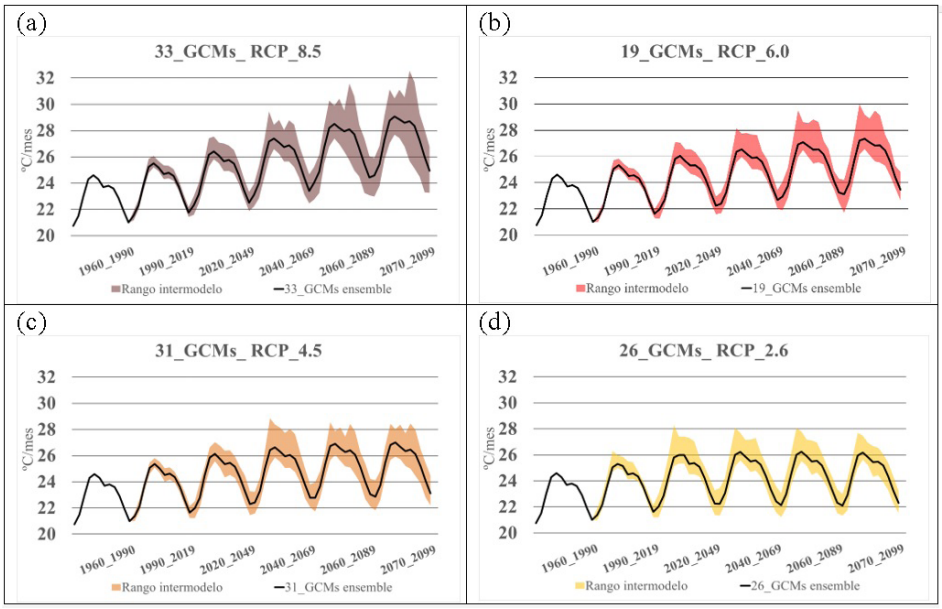
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra los promedios respectivos de cada escenario y las variables. La temperatura muestra proyecciones entre 1.5 y 4 grados aproximadamente para finales de siglo, el aumento de casi 4 grados en (a) el escenario RCP_8.5, casi 3 grados en el escenario RCP_6.0, 2 grados y medio en el escenario RCP_4.5 y 1.5 grados aproximadamente para el escenario RCP_2.6. La precipitación muestra, para finales de siglo, diminución porcentual anual de casi un 17% en (b) el escenario RCP_8.5, 8% para el RCP_4.5, 6% para el RCP_6.0 y 1% para el escenario RCP_2.6.



► **Figura 6.** Proyecciones decadales promedio de anomalía de temperatura y precipitación porcentual anual para Guatemala, RCPs.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestran las proyecciones climáticas del ciclo anual de temperatura para los escenarios RCP, (a) escenario RCP_8.5, (b) escenario RCP_6.0, (c) escenario RCP_4.5 y (d) escenario RCP_2.6. Los cuatro escenarios muestran un cambio del comportamiento de temperatura anual en Guatemala, principalmente en los meses de septiembre y octubre, cuando existirá un aumento mayor de los demás meses. Así mismo, los rangos intermodelo muestran variaciones superiores a la media de modelos.



► **Figura 7.** Proyecciones de temperatura, ciclo anual para Guatemala, RCPs.
Fuente: Elaboración propia.

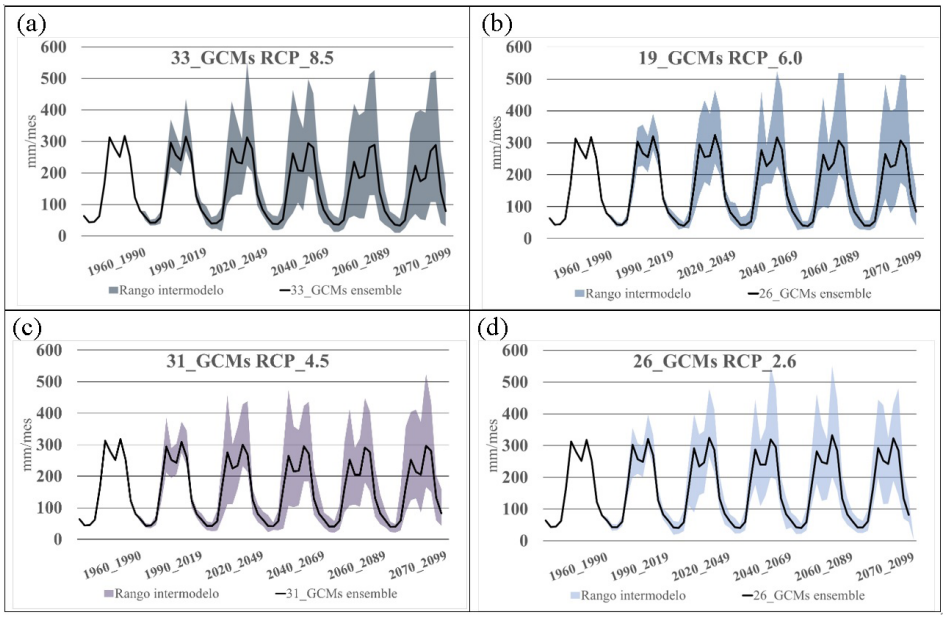
La Figura 8 presenta las proyecciones de precipitación anual para futuras climatologías. En términos generales, las proyecciones indican una disminución, pero los escenarios (a) RCP_8.5, (b) RCP_6.0 y (c) RCP_4.5 reflejan una disminución en la primera parte de la temporada de lluvias en Guatemala (mayo y junio), a diferencia del escenario (d) RCP_2.6, que no muestra una disminución relevante en promedio. Respecto a los rangos intermodelos, los escenarios exhiben extremos de precipitación superiores e inferiores a la media.

La Figura 9 muestra mapas de anomalía de temperatura en °C, organizados por proyección climática y escenarios. Se observa que los mayores aumentos de temperatura se producen en el escenario RCP_8.5, en la proyección climática 2070-2099. Un aumento similar, aunque menor, se percibe en los escenarios RCP_6.0 y RCP_4.5. El escenario que no muestra un cambio de temperatura significativo es el RCP-2.6. La escala de color con valores se presenta en la parte inferior de la gráfica, variando de 0 °C a 7 °C.

A nivel local, los departamentos de Petén, Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso y Zacapa son los que presentarán los mayores aumentos de temperatura, según las proyecciones del escenario RCP_8.5 para finales de siglo.

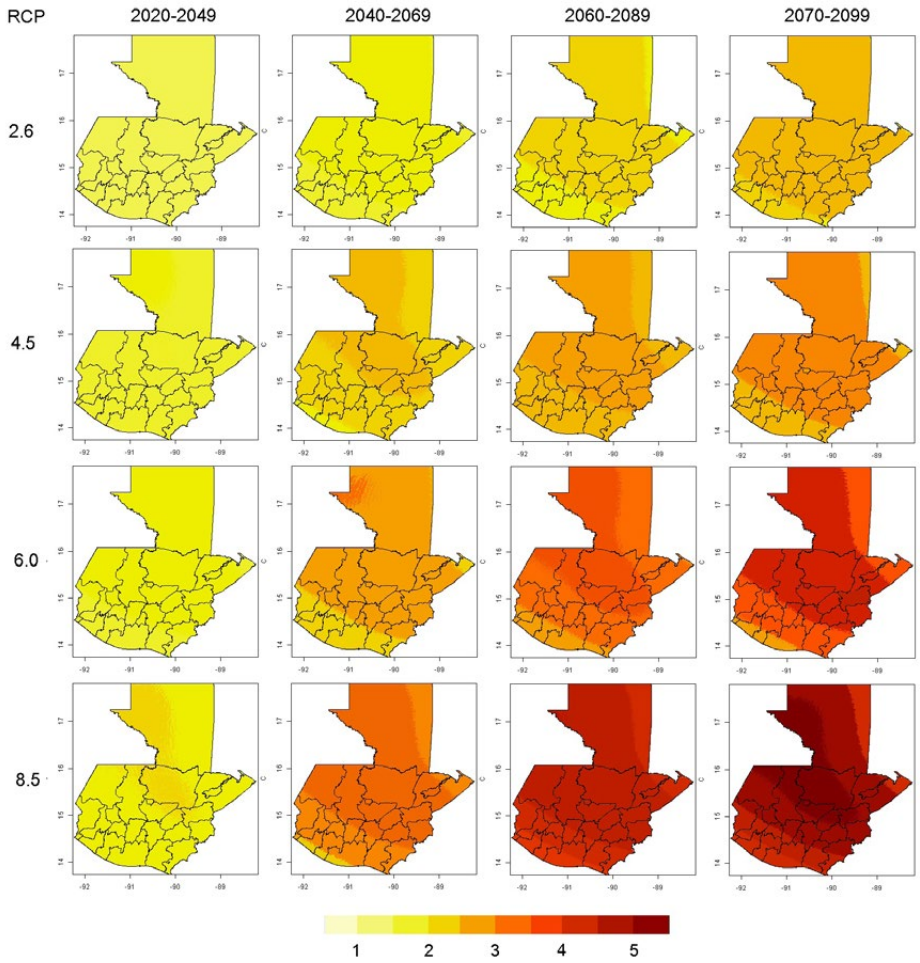
► **Figura 8.** Proyecciones promedio de anomalía de temperatura y precipitación porcentual anual para Guatemala, RCPs.

Fuente: Elaboración propia.

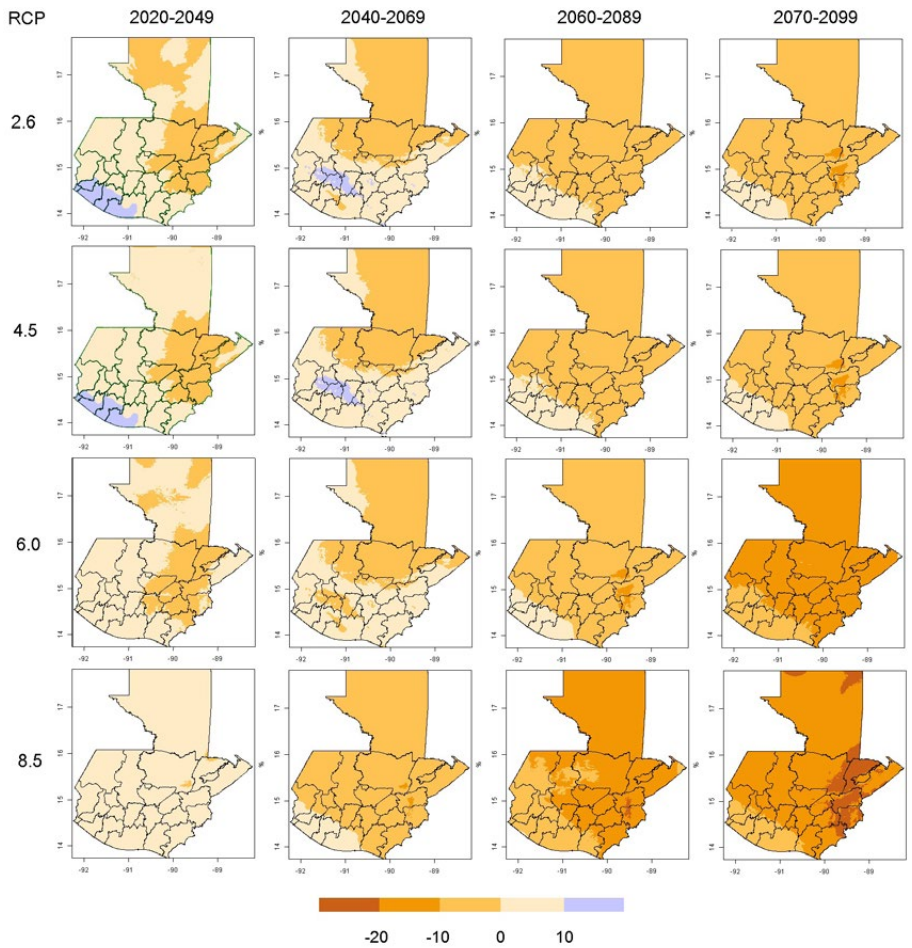


► **Figura 9.** Proyecciones promedio de anomalía de temperatura anual para Guatemala, RCPs.

Fuente: Elaboración propia.



La Figura 10 presenta las proyecciones de la precipitación media anual en anomalía porcentual a nivel espacial. Los colores rojos indican disminuciones que varían del 0% al 30% de precipitación media anual. En general, las reducciones pueden llegar hasta casi un 25% en los departamentos de Zacapa, Puerto Barrios y Chiquimula, para finales de siglo en el escenario RCP_8.5. En este mismo escenario, los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Retalhuleu muestran la menor disminución, con un promedio anual de precipitación del 10%. Es notable que el escenario RCP_4.5 experimenta una reducción porcentual anual mayor que el escenario RCP_6.0, aunque menor que el RCP_8.5. Estas variaciones en la precipitación plantean desafíos significativos para la gestión del agua y la planificación en estos departamentos, destacando la importancia de considerar diferentes escenarios climáticos en la toma de decisiones.



► **Figura 10.** Proyecciones promedio de anomalía de precipitación porcentual anual para Guatemala, RCPs.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión de resultados

Los aumentos de temperatura y los cambios en la precipitación proyectados pueden generar diversos problemas, los cuales ya se están manifestando tanto en el país como a nivel mundial.

En regiones como la costa sur del país, caracterizadas por tierras de suaves pendientes, se evidenciarán amenazas socio-naturales que, junto con las condiciones de vulnerabilidad, aumentarán el nivel de exposición al riesgo. Esto se manifestará principalmente en el aumento de inundaciones durante la época de lluvia (mayo–octubre). Las amenazas naturales más intensas en la región, al igual que en toda la región cos-

tera de Centroamérica, incluyen inundaciones generadas por tormentas tropicales y huracanes, así como lluvias intensas en la cuenca alta, afectando principalmente a comunidades cercanas a los ríos (Paniagua, 1995).

Además, la sequía como evento generador de riesgo afectará los medios de vida de la población, disminuirá la disponibilidad y acceso a los alimentos, incrementando así el riesgo de inseguridad alimentaria y nutricional de los habitantes, efecto que ya han tenido algunos países centroamericanos como El Salvador (Gutiérrez, 2010). La disminución de la precipitación y el riesgo frecuente de inundaciones, junto con el alto costo de los insumos agrícolas, obligarán a los agricultores a tomar decisiones difíciles, como migrar, cambiar de profesión o vender sus tierras, lo que aumentará los índices de desempleo y desnutrición en la región, lo cual ya se está manifestando en el país (Lozano-Sivisaca *et al*., 2015). Ante la constante amenaza de inundaciones y déficit hídrico, se vuelve urgente proponer soluciones que mitiguen los efectos del cambio climático.

Las precipitaciones están experimentando variaciones significativas en el país. En algunos lugares, las lluvias están aumentando, mientras que en otros están disminuyendo (Lozano-Sivisaca *et al*., 2015) Además, se observan precipitaciones más intensas en periodos más cortos (Jordán & del Carmen, 2015). La deforestación en las partes altas de las cuencas contribuirá al aumento de las inundaciones en las partes bajas de las cuencas, lo que resalta la necesidad de abordar la deforestación como parte integral de las estrategias de adaptación.

En el escenario de aumento de temperatura, se espera una proliferación de insectos, aumentando el riesgo de plagas y enfermedades en las plantas. El estrés hídrico, resultado de la falta de precipitaciones y el aumento de temperatura, debilitará las plantas, haciéndolas más propensas a enfermedades y plagas, y reducirá el rendimiento agrícola. Además, el aumento de las precipitaciones contribuirá a condiciones propicias para la proliferación de enfermedades y aumentará la erosión hídrica (Ronquillo-Montes, 2022). Estos impactos subrayan la necesidad de estrategias de adaptación y gestión sostenible para mitigar los riesgos asociados al cambio climático en la agricultura.

La importancia de conocer los escenarios de cambio climático para Guatemala es significativa y urgente, orientando con datos científicos la toma de decisiones del país en materia de adaptación y mitigación, tanto a nivel nacional como internacional. Se anticipan impactos climáticos importantes, especialmente en los departamentos que se encuentran en la zona semiárida de Guatemala y la meseta central, donde se prevén un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación, generando sequías más prolongadas y alterando la temporada de lluvias con posibles tormentas locales severas. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de adaptación y resiliencia para enfrentar los desafíos climáticos previstos en el futuro.

Conclusiones

Los resultados revelan posibles aumentos de temperatura para finales de siglo a nivel nacional, con anomalías de 1.5°C, bajo el escenario RCP_2.6; y 4°, bajo el RCP_8.5, en comparación con la climatología del periodo 1960-1990. En términos generales, la tendencia de aumento de la temperatura media es muy similar en los cuatro escenarios RCP hasta mediados del siglo, momento a partir del cual se comienzan a manifestar diferencias significativas entre ellos.

En las primeras décadas de análisis, hasta la década de 2040, los cuatro escenarios RCP presentan un aumento de temperatura muy parecido entre ellos. Esto se debe a que el forzamiento radiativo y las concentraciones de gases de efecto invernadero siguen una trayectoria similar hasta mediados de siglo, explicando la

similitud en las proyecciones. Después del periodo futuro 2040-2069, las proyecciones comienzan a diferenciarse, mostrando los menores cambios de temperatura en el RCP_2.6, cercanos a 1.5°C; y los mayores aumentos en el escenario RCP_8.5, cercanos a los 4°C. Los escenarios intermedios 4.5 y 6.0 muestran cambios cercanos a los 3°C. Los mayores aumentos se presentarían en las regiones de la Franja Trasversal del Norte y el Altiplano del país, superando los 4°C.

La temperatura media proyecta un aumento de al menos 0.6°C, en el periodo 2020-2049, y 1°C, en el periodo 2070-2099, bajo el escenario "optimista" (RCP_2.6). En el escenario "pesimista" (RCP_8.5), se esperan incrementos de 1°C en 2020-2049, 2 °C en 2040-2069 y 4 °C para 2070-2099.

Las regiones donde se prevén mayores aumentos de temperatura son la Franja Trasversal del Norte y la zona semiárida del país para finales de siglo. Estos resultados resaltan la urgencia de implementar medidas de adaptación y mitigación para enfrentar los impactos del cambio climático en Guatemala.

En relación con la precipitación, las proyecciones indican, que en el periodo 2020-2049, no se observarían cambios significativos en los escenarios RCP_2.6 y RCP_6.0, con disminuciones cercanas al 2% del acumulado anual de lluvia. Sin embargo, en los escenarios RCP_4.5 y RCP_8.5, las disminuciones se aproximan al 10% de la precipitación media anual. Las distribuciones de frecuencia para los períodos 2020-2049, 2040-2069 y 2070-2099 indican disminuciones superiores a los 200 mm, equivalentes al 20% de la precipitación media anual en el escenario RCP_8.5.

Las proyecciones para la precipitación señalan posibles disminuciones en todo el país, oscilando entre un 5% y un 25% en el escenario RCP_8.5 para finales de siglo. Las regiones donde se prevé una disminución superior al 20% de la precipitación media anual incluyen la región norte, Caribe y la zona semiárida de Guatemala. La región sur muestra las menores disminuciones, variando entre un 10% y un 15% para finales de siglo.

La distribución espacial refleja disminuciones significativas en todo el país, siendo la región sur la que presenta las menores disminuciones para finales de siglo (2070-2099), en comparación con el resto del país, donde las disminuciones alcanzan entre un 15% y un 20% de manera generalizada. En la zona semiárida de Guatemala y parte norte de Petén, se prevén disminuciones cercanas al 30% de la precipitación media anual.

El promedio de modelos en el escenario RCP_8.5 estima una disminución cercana al 16% de la precipitación anual para finales de siglo, y se proyectan aumentos en la temperatura de hasta 2 °C para el año 2050 y de hasta 4 °C para fines de siglo.

» Referencias bibliográficas

Amador, J., & Alfaro, E. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 11, 39–52.

Armenta, G. E., Villa, J. L., & Jácome, P. S. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático.*

Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., Kharin, V. V., Lee, W. G., & Merryfield, W. J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2010GL046270

Bardales Espinoza, W. A., Castañón, C., & Herrera Herrera, J. L. (2019). Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático. In J. Castellano, A. Paíz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, & A. Santizo (Eds.), *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala* (pp. 20-39). Universidad UVG. DOI o URL

Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J. B., Drange, H., Heinze, C., Iversen, T., Kirkevag, A., Seland, ?yvind, & Tjiputra, J. (2014). *cmip5 output1 NCC NorESM1-M rcp45 (supplement 1), served by ESGF.* World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://hdl.handle.net/21.14106/b9c9feebf132cc5f9d787862bce0972486553b70

Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Rashid, H., Uotila, P., Hirst, A., Kowalczyk, E., Golebiewski, M., Sullivan, A., Yan, H., Hannah, N., Franklin, C., Sun, Z., Vohralik, P., Watterson, I., Zhou, X., Fiedler, R., Collier, M., … Puri, K. (2013). The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 63(1), 41–64. https://doi.org/10.22499/2.6301.004

Carabajal, M. I. (2016). Servicios climáticos y producción de conocimiento científico útil. Estudio de caso en una comunidad climática de Argentina. *Cuadernos de Antropología Social*, 43, 33–49.

CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 90A(0), 23–64. https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-A02

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075. https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011

Donner, L. J., Wyman, B. L., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.-C., Ginoux, P., Lin, S.-J., Schwarzkopf, M. D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W. F., Delworth, T. L., Freidenreich, S. M., Gordon, C. T., Griffies, S. M., Held, I. M., Hurlin, W. J., … Zeng, F. (2011). The Dynamical Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. *Journal of Climate*, 24(13), 3484–3519. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1

Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., Stouffer, R. J., Cooke, W., Dunne, K. A., Harrison, M. J., Krasting, J. P., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Phillipps, P. J., Sentman, L. T., Samuels, B. L., Spelman, M. J., Winton, M., Wittenberg, A. T., & Zadeh, N. (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 25(19), 6646–6665. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1

Evaluación de ciclones tropicales sintéticos derivados de los modelos globales de circulación para México.

Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19), 4973–4991. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1

Giorgetta, M. A., Brokopf, R., Crueger, T., Esch, M., Fiedler, S., Helmert, J., Hohenegger, C., Kornblueh, L., Köhler, M., Manzini, E., Mauritsen, T., Nam, C., Raddatz, T., Rast, S., Reinert, D., Sakradzija, M., Schmidt, H., Schneck, R., Schnur, R., … Stevens, B. (2018). ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1613–1637. https://doi.org/10.1029/2017MS001242

Gutiérrez, M. E. (2010). Evaluación del Riesgo Climático del Programa Intersectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional para El Salvador. *Proyecto Integración de riesgos y oportunidades del cambio climático en los procesos nacionales de desarrollo y en la programación por países de las Naciones Unidas*.

Hazeleger, W., Severijns, C., Semmler, T., Ştefănescu, S., Yang, S., Wang, X., Wyser, K., Dutra, E., Baldasano, J. M., Bintanja, R., Bougeault, P., Caballero, R., Ekman, A. M. L., Christensen, J. H., van den Hurk, B., Jimenez, P., Jones, C., Kållberg, P., Koenigk, T., … Willén, U. (2010). EC-Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1357–1364. https://doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1

Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., Rochetin, N., Fairhead, L., Idelkadi, A., Musat, I., Dufresne, J.-L., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., & Roehrig, R. (2013). LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2193–2222. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1343-y

INSIVUMEH. (2017). *Variabilidad y cambio climáticoen Guatemala*.

IPCC. (2013a). Glosario (T. F. Stoker, G. Qin, M. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, Y. Nauels, Y. Xia, V. Bexy, & P. M. Midgley, Eds.; Cambridge University). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.

IPCC. (2013b). Glosario (T. F. Stoker, G. Qin, M. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, Y. Nauels, Y. Xia, V. Bexy, & P. M. Midgley, Eds.; Cambridge University). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability (V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, & K. J. Mach, Eds.). *Cambridge University Press*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386

IPCC. (2020). El cambio climático y la tierra. Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres. Resumen para responsables de políticas. V. Masson-Delmotte, P. Hans-Otto, J. Skea, R. Slade, M. Ferrat, S. Neogi, J. Portugal Pereira, K. Kissick, E. Calvo Buendía, S. Connors, E. Haughey, M. Pathak, P. Vyas, M. Belkacemi, P. Zhai, D. Roberts, P. R. Shukla, R. V. Diemen, S. Luz, … J. Malley (Eds.), *En Prensa*, Vol. 1.

Ji, D., Wang, L., Feng, J., Wu, Q., Cheng, H., Zhang, Q., Yang, J., Dong, W., Dai, Y., Gong, D., Zhang, R.-H., Wang, X., Liu, J., Moore, J. C., Chen, D., & Zhou, M. (2014). Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2039–2064. https://doi.org/10.5194/gmd-7-2039-2014

Jordán, G., & del Carmen, R. (2015). *Evidencias del cambio climático en la vertiente del pacífico de Guatemala, período 1971-2010 con base en información estadística, diagnóstico y servicios prestados en el departamento de investigación y servicios climáticos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:182624067

Jungclaus, J., Giorgetta, M., Reick, C., Legutke, S., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Müller, W., Notz, D., … Stevens, B. (2014). *cmip5 output2 MPI-M MPI-ESM-MR decadal2005, served by ESGF*. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://hdl.handle.net/21.14106/9f6e8e90a8c0bd852c0efab9ee6f1c36781ac655

Lamarque, J.-F. (2013). CESM1-FASTCHEM model output prepared for CMIP5 pre-industrial control, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.NFCFpc

Lee, H.-S., Gan, S.-Y., Baek, H.-J., & Cho, C.-H. (2010). Evaluation of the pre-industrial simulation of HadGEM2-AO. 한국기상학회 학술대회 논문집, 146–147. http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01561623

Lenzer, T., Yourshaw, I., Furlanetto, M. R., Reiser, G., & Neumark, D. M. (1999). Zero electron kinetic energy spectroscopy of the ArCl− anion. *The Journal of Chemical Physics*, 110(19), 9578–9586. https://doi.org/10.1063/1.478923

Li, L., Lin, P., Yu, Y., Wang, B., Zhou, T., Liu, L., Liu, J., Bao, Q., Xu, S., Huang, W., Xia, K., Pu, Y., Dong, L., Shen, S., Liu, Y., Hu, N., Liu, M., Sun, W., Shi, X., … Qiao, F. (2013). The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(3), 543–560. https://doi.org/10.1007/s00376-012-2140-6

Long, M. C., Lindsay, K., Peacock, S., Moore, J. K., & Doney, S. C. (2013). Twentieth-Century Oceanic Carbon Uptake and Storage in CESM1(BGC)*. *Journal of Climate*, 26(18), 6775–6800. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00184.1

Lozano-Sivisaca, D. C., Chacón-Cascante, A., Gutiérrez Montes, I., & Robalino H., J. (2015). Eventos climáticos extremos y migración interna en Guatemala, un análisis basado en percepciones de expertos. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 22(1), 35–44. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10434128005

Miller, R. L., Schmidt, G. A., Nazarenko, L. S., Tausnev, N., Bauer, S. E., DelGenio, A. D., Kelley, M., Lo, K. K., Ruedy, R., Shindell, D. T., Aleinov, I., Bauer, M., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y., Cheng, Y., Clune, T. L., Faluvegi, G., Hansen, J. E., … Zhang, J. (2014). CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(2), 441–478. https://doi.org/10.1002/2013MS000266

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales / Dirección de Cambio Climático Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático. (2015). *Segunda comunicación nacional sobre el cambio climático Guatemal*a. http://www.marn.gob.gt

Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, 7(1), 7. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8

Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., & Herrera, E. (2022). Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(2), 150–165. https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284

Ogle, S. M., Olander, L., Wollenberg, L., Rosenstock, T., Tubiello, F., Paustian, K., Buendia, L., Nihart, A., & Smith, P. (2014). Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: providing the basis for action. *Global Change Biology*, 20(1), 1–6. https://doi.org/10.1111/gcb.12361

Paniagua, S. (1995). Los desastres naturales y sus implicaciones en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 18. https://doi.org/10.15517/rgac.v0i18.13532

Pérez-García, J., Ménendez-García, M., & Méndez-Incera, F. J. (2012). Habilidad de los modelos climáticos globales para el desarrollo de proyecciones regionales. In C. Rodríguez-Puebla, A. Ceballos-Babancho, N. Gonzales-Reviriego, E. Morán-Tejeda, E. Hernández-Tejeda, & A. Hernandez-Encinas (Eds.), *Actas de congreso-Proceedings*: Vol. VIII (AEC). VIII Congreso de la Asociación Española de Climatología.

Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Song, Y., Shu, Q., Huang, C., & Zhao, W. (2013). Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4514–4524. https://doi.org/10.1002/jgrc.20327

Rivera, P., Ochoa, W., & Salguero, M. (2020). *ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA GUATEMALA*, C.A. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15166.20807

Ronquillo-Montes, A. E. (2022). *Efectos del cambio climático, en la incidencia de plagas en los cultivos* [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica de Babahoyo. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13125

Rotstayn, L. D., Collier, M. A., Dix, M. R., Feng, Y., Gordon, H. B., O'Farrell, S. P., Smith, I. N., & Syktus, J. (2010). Improved simulation of Australian climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with an interactive aerosol treatment. *International Journal of Climatology*, 30(7), 1067–1088. https://doi.org/10.1002/joc.1952

Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S. E., Bhat, M. K., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y., Cheng, Y., Clune, T. L., Del Genio, A., de Fainchtein, R., Faluvegi, G., Hansen, J. E., Healy, R. J., … Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141–184. https://doi.org/10.1002/2013MS000265

Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., … Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2091–2121. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312–6335. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1

XIN, X.-G., WU, T.-W., & ZHANG, J. (2013). Introduction of CMIP5 Experiments Carried out with the Climate System Models of Beijing Climate Center. *Advances in Climate Change Research*, 4(1), 41–49. https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2013.00041

Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T. Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., & Kitoh, A. (2012). A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 90A(0), 23–64. https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-A02

1.2 Evaluación de ciclones tropicales sintéticos derivados de los modelos globales de circulación para México

David Romero
Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida,
Universidad Nacional Autónoma de México

Christian M. Appendini
Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

Pablo Ruiz-Salcines
Centro de Cambio Climático (C3),
Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España

Palabras Clave: huracanes modelados; validación; cambio climático.
ODS: 13 Accion por el Clima.

Introducción

Los ciclones tropicales, en una cuenca entera o en ubicaciones particulares, son eventos devastadores debido a los peligros asociados como los vientos intensos, las marejadas ciclónicas y las olas (Meza-Padilla *et al*., 2015; Trepanier *et al*., 2015). Sus peligros combinados crean las pérdidas aseguradas más altas de un desastre natural y ocupan el segundo lugar en causas de muerte, sólo después de los terremotos y tsunamis. Debido al riesgo que representan los ciclones tropicales, han sido objeto de numerosos temas de investigación que van desde la predicción hasta la evaluación climatológica (Appendini *et al*., 2019; Elsner *et al*., 2008; Fraza & Elsner, 2014). Sin embargo, el registro histórico de ciclones tropicales sólo es confiable desde la era de los satélites y, por lo tanto, la información disponible es limitada, existen pocos datos de ciclones tropicales para generar estadísticas confiables para la evaluación de riesgos. Varios autores han proporcionado métodos alternativos para crear estadísticas sólidas mediante la generación de eventos sintéticos que pueden proporcionar una mayor cantidad de eventos en ubicaciones específicas.

Hoy en día se utilizan varios métodos para derivar eventos sintéticos, incluido el uso de la temperatura de la superficie del mar (Vickery *et al*., 2000), métodos estadísticos (Bloemendaal *et al*., 2019; Nederhoff *et al*., 2021) y métodos estadísticos-deterministas (Emanuel *et al*., 2006; Lee *et al*., 2018). Los eventos sintéticos se han utilizado para evaluar ciclones tropicales a nivel mundial, incluida la evaluación de vientos, marejadas ciclónicas y olas oceánicas. La ventaja de los eventos sintéticos es que proporcionan una gran cantidad de eventos para brindar estadísticas robustas, sin embargo, su validación se realiza eliminando información geográfica detallada.

En general, los autores validan los eventos sintéticos basados en estadísticas de toda la cuenca (Bloemendaal *et al*., 2019; Emanuel *et al*., 2006; Lee *et al*., 2018), de modo que no se puede observar ningún sesgo espacial. Esto es comprensible ya que la motivación detrás de los eventos sintéticos es compensar el breve registro histórico, por lo que algunos lugares estarán subrepresentados por eventos históricos, lo que generará diferencias entre eventos históricos y sintéticos. Para estimar la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales en el futuro se aplican los modelos de cambio climático del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5 (CMIP5 por sus siglas en inglés) a las bases representativas del presente, derivadas de los modelos de circulación global (Emanuel, 2013; Romero & Emanuel, 2017). Sin embargo, el sesgo que deriva de los modelos CMIP5 se debe evaluar para el clima presente mediante la comparación con eventos históricos.

El presente estudio pretende analizar la relación espacial entre las frecuencias de vientos de tormentas y huracanes, intensidades, velocidades de traslación de ciclones tropicales sintéticos derivados de seis modelos de circulación global para el presente con los datos históricos de la base HURDAT2 a partir de 1970 para México y su Zona Económica Exclusiva (ZEE).

Realizamos una evaluación de diferentes bases de datos de ciclones tropicales sintéticos a nivel geográfico con el propósito de evaluar sus capacidades para reproducir diferentes parámetros de ciclones tropicales relevantes para el análisis de riesgo. Al evaluar los eventos sintéticos, encontramos patrones de sesgo entre eventos, lo que indica que los modelos de circulación global utilizados para derivar los eventos presentan sesgos que se transmiten a los eventos sintéticos. Tratamos de encontrar y describir esos sesgos con el fin de proporcionar una guía para el uso de estos eventos y señalar aspectos importantes que deben tenerse en cuenta para desarrollar más este tipo de eventos. En la segunda sección se describen las bases de datos analizadas y el método de evaluación, seguida de los resultados así como una discusión de los sesgos relevantes en la sección 3 y las conclusiones finales.

Datos y métodos

La base de datos con información histórica de ciclones tropicales se obtuvo del proyecto HURDAT2 (Hurricane Database 2) (Landsea & Franklin, 2013) proporcionado y gestionado por el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (*NHC Data Archive*, 2022). HURDAT2 es la segunda versión del Hurricane Database, una base de datos que rastrea y almacena información sobre ciclones tropicales y se publicó por primera vez en 2014, incluye únicamente información acerca de los ciclones tropicales del Atlántico norte y del Pacífico noreste. Las bases de datos contienen las siguientes variables para cada océano: el nombre del huracán, el año, mes, día, velocidad máxima sostenida del viento, radio de vientos máximos, presión atmosférica central, distancia desde el centro del sistema hasta el límite de la zona de vientos relacionados con depresión, tormenta y huracán para los cuatro puntos cardinales. Las mediciones se reportan cada seis horas, la posición geográfica tiene una resolución espacial de 0.1° y la velocidad máxima sostenida del viento se da en nudos como múltiplos de cinco. Los datos disponibles brindan información desde 1851 hasta 2021 para la cuenca del Atlántico norte y desde 1949 hasta 2021 para la cuenca del Pacífico noreste. La información registrada en la base es el producto de la recopilación e integración de datos observacionales de diversas fuentes como satélites meteorológicos, reconocimiento aéreo, boyas y estaciones meteorológicas.

Las bases de datos relativas a los ciclones sintéticos fueron compartidas por el Departamento de Ciencias Terrestre, Atmosférica y Planetaria (EAPS, por sus siglas en inglés) del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Fueron generadas gracias a la aplicación de la técnica de reducción de escala con la que se crearon ciclones tropicales sintéticos mediante la implementación del modelo del Sistema Acoplado de Predicción de Intensidad de Huracanes (CHIPS) a trayectorias iniciadas mediante siembra aleatoria en el espacio y el tiempo y que se propagaron hacia adelante utilizando un modelo advección (Emanuel *et al*., 2006, 2008). Para la cuenca del Pacífico noreste y la cuenca del Atlántico norte se obtuvieron 3380 y 3100 trayectorias respectivamente para cada modelo de circulación global. Los modelos utilizados fueron CCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5 y MPI-ESM-MR (Chen *et al*., 2020), a los cuales nombraremos en adelante como CCSM, GFDL, HAGEM, IPSL, MIROC Y MPI. Estas trayectorias fueron generadas para el periodo 1975-2005. Este intervalo de tiempo corresponde a la línea base, "el presente", que sirve de referencia para las modelaciones y análisis de cambio climático con CMIP5. Los eventos generados son aquellos que alcanzaron una velocidad sostenida de viento por lo menos

equivalente a una tormenta tropical (34 nudos) en algún lugar de la cuenca. Los eventos sintéticos del Pacífico, además corresponden a trayectorias que cruzan una línea virtual paralela a la costa entre el sur de Nicaragua y el norte del estado de California en Estados Unidos, línea ubicada aproximadamente a 40 km de la línea de costa mar adentro. Con el objetivo de hacer comparables las bases de datos, se retuvieron únicamente las trayectorias de ciclones tropicales históricos para el periodo 1975-2005 y, para el Pacífico noreste, las trayectorias que cruzan la línea paralela a la costa previamente mencionada.

El muestreo de las trayectorias de ciclones tropicales históricos y sintéticos se realizó a partir de una malla hexagonal, forma idónea para tal efecto (Elsner *et al.*, 2012). El área de estudio considerado para la creación de la red hexagonal fue el territorio nacional de México y su ZEE. La determinación del tamaño óptimo de celda se realizó gracias al cálculo del índice de Moran (Moran, 1950) aplicado al número de registro de tormenta tropical por celda (Elsner *et al.*, 2012), su tiempo de residencia y a las velocidades máximas de los ciclones tropicales históricos para ocho mallas de aperturas entre 30' y 2º. El valor integrado de las autocorrelaciones espaciales más alto correspondió a la malla de 1º de apertura (Figura 1).

► **Figura 1.** Zona de estudio.

Fuente: CONABIO (2010, 2012). Elaboración propia.

Se crearon las trayectorias en lenguaje de programación *R* (R Core Team, 2022) con la paquetería *sf* (Pebesma, 2018). Posteriormente, se contó el número de ciclones tropicales histórico y sintético de cada categoría según la escala de Saffir-Simpson.

En el siguiente paso, *sf* fue usada con *dplyr* (Wickham *et al.*, 2020) para el muestreo de los ciclones tropicales por cada hexágono, los valores de número de tormenta tropical y de huracán por celda fueron normalizados por el número total de tormentas tropicales de la base para la zona de estudio. También se extrajeron las velocidades de traslación promedia y de velocidad sostenida máxima por celda. La velocidad de traslación fue calculada considerando una línea recta entre los registros de posición de los ciclones tropicales (Kossin, 2018) lo cual puede subestimar los valores reales.

La comparación entre cada base de ciclones tropicales sintéticos y los datos registrados se realizó a dos escalas. Primero, se efectuó un conteo de los sistemas para cada cuenca del área de estudio, separándolos por los umbrales mínimos de vientos

sostenidos correspondientes a las diferentes categorías de la escala de Saffir-Simpson. Para concluir este paso se calculó el porcentaje de sistemas para cada categoría. Puesto que las velocidades del viento no son homogéneas, espacialmente durante un ciclón tropical, con velocidades máximas cerca de la pared del ojo, y disminuyendo hacia el exterior (Ruiz-Salcines *et al*., 2019), se consideró la velocidad máxima del sistema en cada ubicación de la siguiente manera: por ejemplo, un ciclón tropical con velocidad máxima de 100 nudos se contabiliza con huracán de categoría 1, 2 y 3 en los cálculos de porcentajes ya que el límite inferior de velocidad sostenida máxima de viento para un huracán categoría 3 es de 96 nudos.

Segundo, se realizó un análisis espacial. La efectividad de cada modelo global de circulación para recrear las condiciones de los ciclones tropicales fue comparada en el espacio por medio de la suma de los cuadrados de las diferencias (SCD) entre los valores correspondientes a los históricos y los que representan a cada modelo al nivel de cada celda hexagonal. Posteriormente se aplicó el índice modificado de Eficiencia de Kling-Gupta (KGE', por sus siglas en inglés) (Gupta *et al*., 2009; Kling *et al*., 2012), desarrollado para validar modelos hidrológicos, aunque también es utilizado en climatología (Centella-Artola *et al*., 2020). Estas metodologías fueron aplicadas a la velocidad máxima del viento, a la velocidad de traslación y a la frecuencia de tormentas tropicales y huracanes, variables importantes para la caracterización del peligro por ciclones tropicales (Kantha, 2006; Sobel *et al*., 2021). Un mejor ajuste del modelo a los datos medidos se identifica con SCD bajas y un índice KGE' = 1.

Finalmente, con base en los resultados de KGE' para cada uno de los seis modelos de circulación global, calculamos los valores medios del índice y ensamblamos las bases de los tres mejores modelos, el uso de ensamble de modelos climáticos permite mejorar el ajuste a los valores medidos (Camargo & Wing, 2016). Esta base fue posteriormente evaluada con el cálculo de SCD y del índice KGE'.

Resultados

Durante el periodo 1975-2005 hubo 81 tormentas tropicales registradas en la zona del Pacífico mexicano (Tabla 1), con velocidad sostenida máxima del viento de hasta 145 nudos. De estos sistemas, 67.9% tuvieron vientos por lo menos iguales al de un huracán categoría 1, 46.9% de categoría 2, 28.4% de categoría 3, 18.5% de categoría 4 y, finalmente, 1.2% de categoría 5 —este valor corresponde a un solo sistema—.

Tabla 1. Número y proporción de los eventos de diferentes categorías en la zona del Pacífico del área estudio (1975-2005)

Base	Ciclones tropicales	Huracán cat. 1 (%)	Huracán cat. 2 (%)	Huracán cat. 3 (%)	Huracán cat. 4 (%)	Huracán cat. 5 (%)	Velocidad máxima (kt)
HURDAT	81	67.9	46.9	28.4	18.5	1.2	145
CCSM	3349	54.7	19	9.6	3.2	0.7	223.2
GFDL	3343	74.1	42.6	27	12.2	2.3	164.5
HADGEM	3270	70.9	41.8	26.6	13.6	4.6	384.3
IPSL	3344	55.5	15.4	4.9	1	0	133.8
MIROC	3336	82.4	64	50.8	32.7	14.4	232.7
MPI	3091	76.9	51.4	35.6	21.4	7.6	185

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.

Para la misma zona y periodo, en lo que concierne a las bases de ciclones tropicales sintéticos, el número de eventos varía poco entre las bases, de 3091 a 3349, pero el porcentaje de sistemas que alcanzan las diferentes categorías de ciclones tropicales resultaron muy variables con, por ejemplo, de 54.7 a 82.4% de huracán categoría 1 y de 0 a 14.4% de huracán categoría 5. De hecho, las bases CCSM, HADGEM Y MI-

ROC presentan velocidades máximas en rangos medidos con más de 200 nudos. La base de ciclones tropicales sintéticos elaborada con el modelo GFDL es aquella que se asemeja más a los datos históricos en cuanto a la proporción de cada categoría de ciclones tropicales. También, la velocidad máxima reportada con GFDL es de 164.5 nudos, +19.5 nudos con respecto a lo medido durante el periodo de referencia, no obstante, este valor es posible en la zona, como lo demostró el huracán Patricia en 2015, alcanzando velocidades de 185 nudos (*NHC Data Archive*, 2022).

En la parte mexicana de la cuenca del Atlántico se presentaron 69 tormentas tropicales (Tabla 2) con velocidad sostenida del viento máxima de 165 nudos. De estos sistemas, 39.1% tuvieron vientos por lo menos iguales al de un huracán categoría 1, 27.5% de categoría 2, 23.2% de categoría 3, 18.8% de categoría 4 y, finalmente, 8.7% de categoría 5. Al contrario de lo que se pudo ver para el Pacífico, la cantidad de eventos sintéticos es relativamente baja y más variable entre 381 y 1288, de los 3100 que tiene cada base de datos para la cuenca. Esto indica un sesgo espacial entre las bases: todas fueron generadas para el Atlántico norte en su totalidad, sembradas de manera similar pero las principales zonas de desarrollo de ciclogénesis varían entre los modelos. En cuanto a la proporción de ciclones tropicales que alcanzan por lo menos la categoría 1, todos los modelos, excepto MPI con 59.2%, dan valores cercanos a los históricos (31 a 46.6%). Los ciclones tropicales de máxima categoría (5 de la escala de Saffir-Simpson) son, por su parte, subestimados en todas las bases de sintéticos (0.5 a 6.8%). Las velocidades sostenidas máximas de vientos varían de 140.9 a 193.6 nudos, mientras en máximo histórico registrado para la zona fue de 165 nudos con "Allen" en 1980.

Tabla 2. Número y proporción de los eventos de diferentes categorías en la zona del Atlántico del área estudio (1975-2005).

Base	Ciclones tropicales	Huracán cat. 1 (%)	Huracán cat. 2 (%)	Huracán cat. 3 (%)	Huracán cat. 4 (%)	Huracán cat. 5 (%)	Velocidad máxima (kt)
HURDAT	69	39.1	27.5	23.2	18.8	8.7	165
CCSM	626	31	12	6.2	2.2	0.3	144.9
GFDL	1091	43.4	23.8	16.2	8.1	3.5	180.9
HADGEM	384	46.6	25.3	15.6	8.9	3.4	178.3
IPSL	381	39.9	20.7	9.4	4.7	0.5	140.9
MIROC	389	34.2	14.1	9.3	4.9	2.1	183.7
MPI	1288	59.2	39.2	26.8	16.1	6.8	193.6

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.

En el territorio mexicano y la ZEE relacionada, las velocidades sostenidas máximas reportadas para el periodo 1975-2005 se registraron principalmente en la cuenca del Atlántico: en el canal de Yucatán y en la parte septentrional del Golfo de México (Figura 2a). En la cuenca del Pacífico, una banda de hexágonos marca el paso del huracán categoría 5, "Linda" en 1997. En cuanto a las zonas terrestres, el norte del estado de Quintana Roo es el único en presentar valores > 130 nudos. Las velocidades de traslación parecen homogéneas, entre 10 y 20 km/h. Las velocidades mayores se pueden encontrar en los sistemas que cruzan el continente, en el norte de la zona del Pacífico y puntualmente en el Golfo de México (Figura 2b).

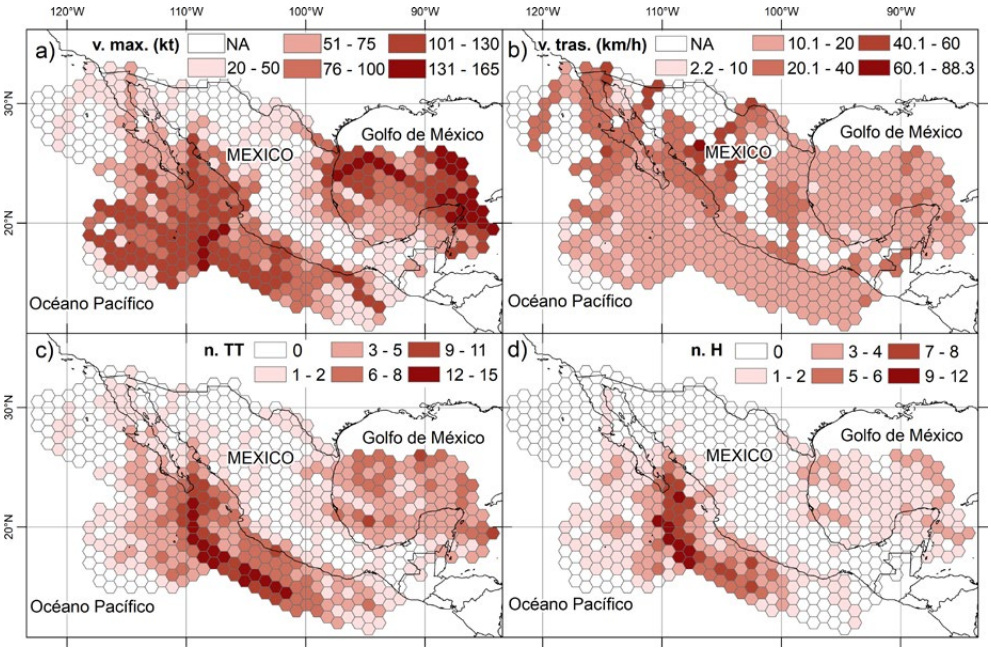
La mayor actividad ciclónica en la zona de estudio, en términos de ocurrencia de tormentas tropicales (Figura 2c) o huracanes (Figura 2d), se desarrolla del sur de la península de Baja California hasta las zonas marinas cercanas a la costa del estado de Guerrero con varias celdas teniendo valores mayores a doce tormentas o nueve huracanes. En contraparte, en el Atlántico ninguna celda registra más de cuatro huracanes. El interior del territorio, así como los extremos sur, norte y oeste de la ZEE tuvieron bajas ocurrencias de ciclones tropicales, entre cero y dos.

La diferencia entre las velocidades máximas al nivel de cada celda hexagonal entre los datos históricos (Figura 2a) y los datos derivados de sintéticos son presentados para cada modelo de circulación global en la Figura 3. En general, las velocidades del viento de los ciclones tropicales son sobreestimadas en la mayor parte de la zona de estudio, particularmente en la cuenca del Pacífico. Por ejemplo, todos los modelos coinciden con sobreestimación > 100 nudos en el extremo suroeste de la ZEE; también la mayor parte de ellos dan anomalías similares en el Mar de Cortés y la zona costa afuera de Chiapas. MPI y GFDL sobreestiman también las velocidades de viento en la cuenca del Atlántico, pero HADGEM, CCSM, IPSL y MIROC presentan mayormente subestimaciones, las cuales pueden ser particularmente grandes (> 50 nudos) en el mar Caribe.

En cuanto a las velocidades medias de traslación para los ciclones tropicales (Tormentas tropicales y Huracanes), existe poca diferencia entre los modelos (Figura 4) con subestimaciones principalmente en tierra y sobreestimaciones del mar Caribe a las costas de Veracruz, y, en la cuenca del Pacífico, al oeste de la isla Socorro y al sur de Chiapas.

Las diferencias de ocurrencias normalizadas de tormentas tropicales (Figura 5) y de huracanes (Figura 6) presentan sesgos similares entre la repartición espacial de los ciclones tropicales históricos y las que son generadas para cada modelo de circulación global. El mayor número de diferencias relativas a los rangos extremos en los mapas se encuentran con HADGEM (Figuras 5b y 6b), al contrario, los modelos con menor número de errores grandes son MPI (Figuras 5f) para las tormentas tropicales y MIROC (Figuras 6e) para los huracanes. Los seis modelos probados comparten los mismos sesgos, variando en amplitud y expansión: las zonas marinas de la cuenca de Pacífico tienen mayormente subestimación de las frecuencias entre los 100 y 110°W; el norte del Golfo de México, la península de Baja California y sus zonas cercanas presentan mayormente sobreestimaciones, al igual que las zonas continentales en general.

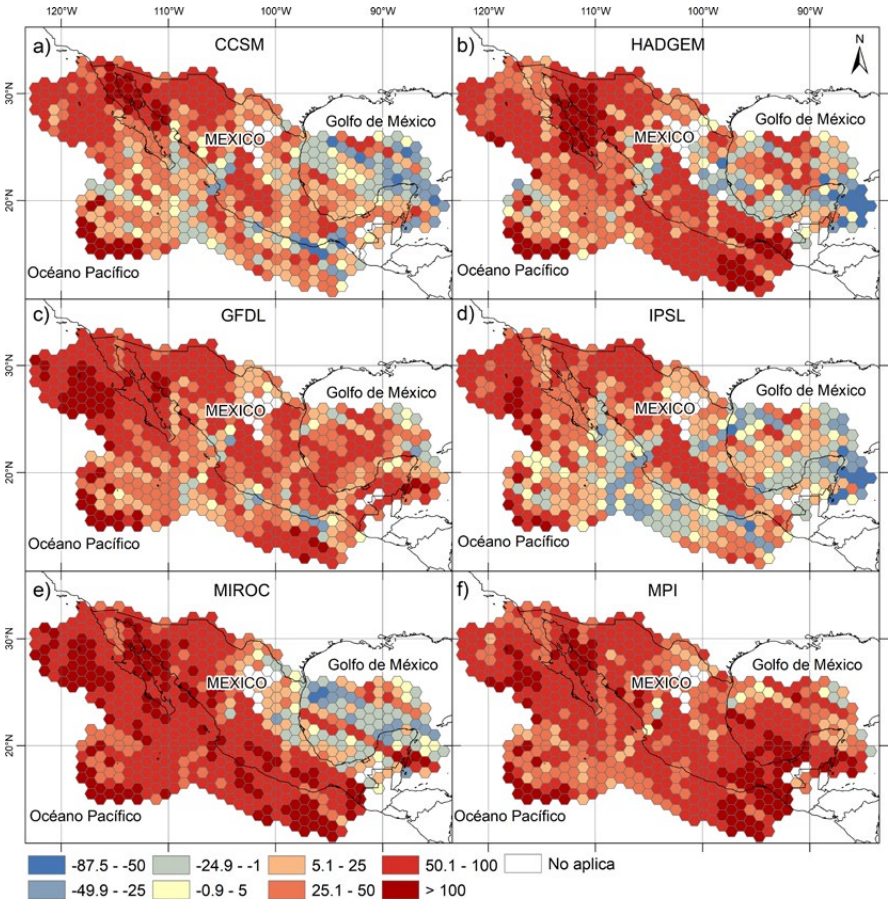
Las diferencias presentadas en las Figuras 3 a 6 fueron elevadas al cuadrado y sumadas para la elaboración de la Tabla 3. Las estadísticas de esta tabla indican que MIROC es el que mejor se ajusta a los datos históricos de frecuencia tormentas tro-picales y huracanes, mientras IPSL refleja mejor las velocidades máximas y MPI las velocidades de traslación.



► **Figura 2.** Caracterización espacial de las trayectorias históricas 1975-2005.

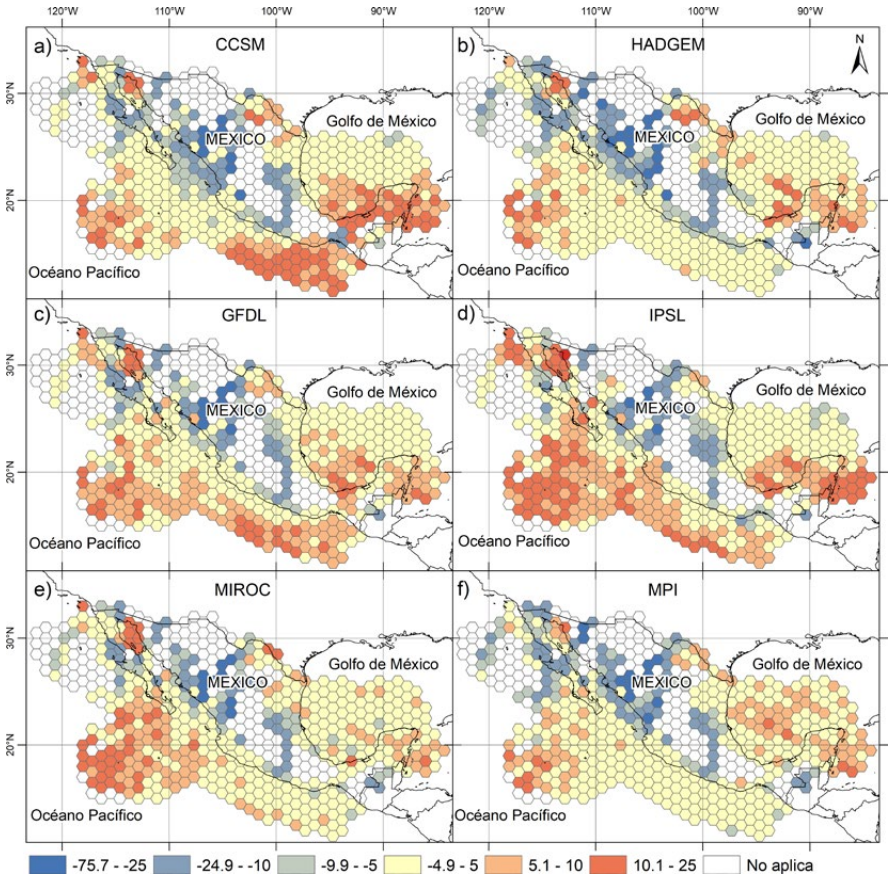
**V. max. es la velocidad sostenida máxima del viento, v. tras. es la velocidad de traslación del CT, TT es tormenta Tropical, y H huracán.*

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.



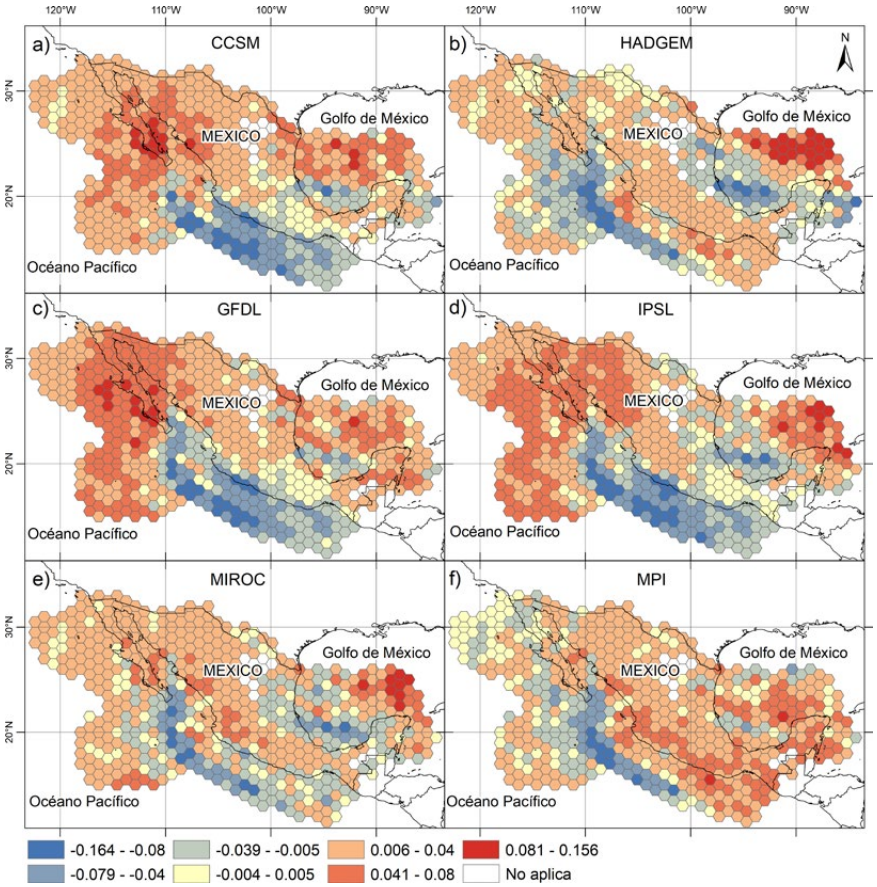
► **Figura 3.** Diferencias de velocidad sostenida máxima de viento (nudo) de CT.

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.



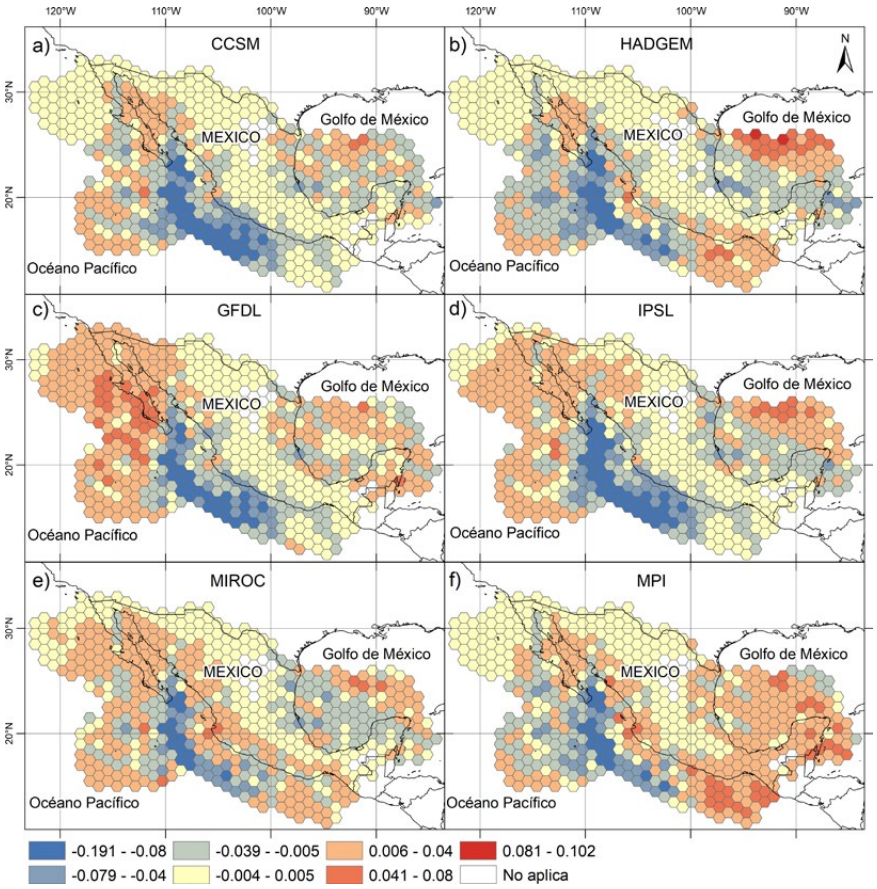
► **Figura 4.** Diferencias de velocidad de traslación (km/h) de CT.

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.



► **Figura 5.** Diferencias de frecuencias normalizadas de Tormentas tropicales.

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.



► **Figura 6.** Diferencias de frecuencias normalizadas de Huracanes.

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.

Para la evaluación general de los modelos en la zona de estudio, el índice de KGE' (Tabla 4) confirma a MIROC como el modelo de mejor ajuste para frecuencia de huracanes, pero este recibe una calificación un poco menor que el HADGEM para las tormentas tropicales. En cuanto a las velocidades máximas CCSM da un mejor resultado. La más alta eficiencia para la evolución de las velocidades de traslación se logra con CCSM, HADGEM y MIROC, los cuales dan valores < -0.3, valores negativos que indican un ajuste pobre.

En función de los valores del índice KGE' para las cuatro variables estudiadas (Tabla 4), se escogieron los tres modelos de valores promedio más altos (CCSM, HADGEM y MIROC) para realizar un ensamble porque si bien las consideraciones y parametrizaciones de cada modelo son distintas, es práctica común que las proyecciones de cambio climático presenten los ensambles, ya que se considera que de esa manera es posible evaluar la incertidumbre. Según su valoración (Tabla 4) el ensamble de modelos permite obtener alguna mejora. Los valores de KGE' y SCD son de los óptimos comparados a los individuales, principalmente para estimar las ocurrencias de tormentas tropicales y huracanes. Por ejemplo, se presenta un valor de SCD para la ocurrencia de tormentas menor a los de cada modelo (Tabla 3). En cuanto a su evaluación promedio, el ensamble da un índice casi igual al de HADGEM, pero con un mejor KGE' para las ocurrencias de huracanes. De hecho, si se omiten las velocidades de traslación, el ensamble es mejor que cualquier otro modelo (Tabla 4).

Tabla 3. Evaluación de los modelos con SCD.

Variable	CCSM	GFDL	HADGEM	IPSL	MIROC	MPI	Ensamble
n H	0.61	0.62	0.6	0.73	0.37	0.54	0.45
n TT	0.94	1.1	0.75	1.14	0.58	0.61	0.53
v. máx.	1530753	2362660	2723504	1377327	3783254	3314890	2598485
v. tras.	112844	99675	84268	134151	92493	81755	87021

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.

Tabla 4. Evaluación de los modelos con el índice KGE'.

Variable	CCSM	GFDL	HADGEM	IPSL	MIROC	MPI	Ensamble
n H	0.29	0.30	0.39	0.17	0.52	0.35	0.43
n TT	0.35	0.16	0.57	0.23	0.46	0.39	0.47
v. máx.	0.10	-0.09	-0.02	0.08	-0.25	-0.25	0.03
v. tras.	-0.28	-0.34	-0.22	-0.38	-0.26	-0.30	-0.28
Promedio	0.11	0.01	0.18	0.02	0.12	0.05	0.16

Fuente: *NHC Data Archive* (2022). Elaboración propia.

Discusiones

Para las áreas mexicanas de las cuencas del Atlántico y Pacífico el modelo GFDL dio la base de datos de ciclones tropicales sintéticos que más se asemeja a los datos históricos en el Pacífico, mientras que para el Atlántico los de mayor semejanza son el GFDL y el MPI (Tablas 1 y 2). No obstante, considerando la repartición espacial de los ciclones tropicales en la zona, estos modelos presentan menor eficiencia que HADGEM o MIROC. Este último, por presentar velocidades de viento mejor ajustadas a los eventos históricos que HADGEM y con sesgos espaciales menos marcados de las frecuencias en el Golfo de México, podría ser juzgado como el modelo de circulación que mejor se ajusta a la dinámica de los ciclones tropicales históricos de la zona de estudio. Cabe notar también que los ciclones tropicales sintéticos se ajustan mejor

a las ocurrencias históricas en el Atlántico que en el Pacífico, esto puede deberse al hecho de que la zona es más independiente del proceso de siembra que el Pacífico. La siembra de los vórtices iniciales para la creación de ciclones tropicales sintéticos se hace de manera aleatoria en la cuenca lo que corresponde más a la realidad del Atlántico donde ciclones tropicales pueden desarrollarse en una zona vasta al contrario del Pacífico noreste (Camargo *et al*., 2007). Ahí la siembra aleatoria puede producir un sesgo, ya que en los hechos la zona de generación de ciclones tropicales es bastante limitada espacialmente, y la baja recurvatura de los sistemas en la región (Camargo *et al*., 2008) impide que vayan hacia las costas norte del país. También, el mejor ajuste de los eventos sintéticos a las condiciones históricas en el Atlántico se puede deber a que los ciclones tropicales en esta zona son los más estudiados y, por lo tanto, lo que conocemos de la física de ciclones tropicales en gran parte deriva de los estudios en esta cuenca. Así, los eventos sintéticos utilizados, al derivarse de la física de los ciclones tropicales, incorporan el conocimiento de dichos estudios y representan mejor las ocurrencias del Atlántico.

Los ciclones tropicales sintéticos generados a partir de los modelos de circulación global permiten estadísticas más robustas por el gran número de eventos, pero representan pobremente las condiciones históricas a nivel local. En lo que concierne a las ocurrencias de huracanes categoría 1, al menos, un modelo tiene un índice KGE' > 0.5 (MIROC con 0.52), y para las velocidades máximas sostenidas de viento el valor máximo baja a 0.1. También los valores de las velocidades de traslación no son representativas (KGE' máximo de -0.22 para HADGEM) lo que significa una baja confiabilidad para el eventual cálculo de los tiempos de residencia, los cuales son muy importantes para las infraestructuras y las poblaciones (de Bruijn *et al*., 2022; Mendoza *et al*., 2015).

En cuanto a las velocidades máximas de viento, es lógico que los modelos presenten valores superiores a lo ocurrido, ya que el gran número de eventos, principalmente en el Pacífico, permite ampliar estadísticamente el rango de los valores. No obstante, algunos modelos presentaron, para el periodo 1975-2005, valores de vientos que no se han registrado en ninguna zona del mundo entre 1970 y 2022, periodo de mayor confiabilidad. En respuesta a esto podría recomendarse usar los percentiles 90 o 95% con el objetivo de eliminar estos valores fuera de rango.

Conclusiones

El presente estudio analizó la relación espacial entre las frecuencias de vientos de tormentas y huracanes, intensidades, velocidades de traslación de ciclones tropicales sintéticos derivados de seis modelos de circulación global para el presente con los datos históricos de la base HURDAT2 a partir de 1970 para México y su ZEE. Para este propósito, todos los eventos se muestrearon con base en una red hexagonal de 1º. El análisis permitió ver que cada modelo tiene zonas de subestimación y sobreestimación de las frecuencias y velocidades. La aplicación del índice modificado de Eficiencia de Kippling-Gupta a los datos espaciales indica que el modelo MIROC genera las bases que se ajustan más a los datos históricos de frecuencia a pesar de un fuerte sesgo positivo en Baja California Sur y las zonas colindantes y de un sesgo negativo en la región de generación principal del Pacífico noreste, en las zonas *off-shore* de Guerrero. También, el mismo modelo es calificado con valores negativos en lo que concierne a las velocidades máximas de viento y velocidades medias de traslación. Los modelos IPSL y CCSM recrean mejor la variabilidad de las velocidades de viento. Por otro lado, si se realiza un ensamble de modelos es posible mejorar el ajuste, demostrando la importancia que tiene el usar ensambles de modelos y no solamente los eventos sintéticos derivados de un solo modelo de circulación general.

Los ciclones tropicales sintéticos derivados de los modelos de circulación general aportan robustez a las estadísticas de caracterización climatológica de los ciclones tropicales a nivel de cuenca, pero son imperfectos para determinar las dinámicas espaciales cuando se comparan con el registro histórico. Este resultado nos puede indicar que el uso de ciclones tropicales sintéticos, en particular los derivados de CIMP5, para caracterizar el clima actual de ciclones tropicales tienen que usarse con precaución. Sin embargo, estos sesgos que presentan los ciclones tropicales sintéticos también pueden indicar que es posible experimentar eventos que no se han presentado en el registro histórico, incluso bajo las condiciones climáticas actuales. El huracán Patricia que tuvo lugar en el Pacífico mexicano en 2015, es un ejemplo de un evento histórico inédito que se presenta en la climatología de los eventos sintéticos, pero no en el registro histórico si el estudio se hubiera realizado sin considerar el año 2015. La importancia de usar eventos sintéticos deriva de su utilidad para caracterizar el clima futuro bajo la influencia del cambio climático, no obstante, este estudio nos indica que existen sesgos en los eventos derivados de los modelos de circulación general. Es entonces necesario considerar esta deficiencia e incluso aminorarla utilizando ensamble de modelos. Otra metodología es la generación de ciclones tropicales sintéticos a partir de datos estocásticos (Bloemendaal *et al*., 2019), pero para la estimación de ocurrencias de ciclones tropicales con escenarios de cambio climático se usa un factor multiplicador espacialmente homogéneo a los datos del presente para la intensidad (Leijnse *et al*., 2022) y así no permite ver eventuales cambios en las dinámicas (Wang & Murakami, 2020).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Kerry Emanuel del Departamento de Ciencias Terrestre, Atmosférica y Planetaria (EAPS) del Instituto Tecnológico de Massachusetts por compartir las bases de datos de los ciclones sintéticos. La investigación fue realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA101823.

» Referencias bibliográficas

Appendini, C. M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R. E., & Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatan Peninsula. *Climatic Change,* 157(3–4), 469–482. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02569-5

Bloemendaal, N., Muis, S., Haarsma, R. J., Verlaan, M., Irazoqui Apecechea, M., de Moel, H., Ward, P. J., & Aerts, J. C. J. H. (2019). Global modeling of tropical cyclone storm surges using high-resolution forecasts. *Climate Dynamics,* 52(7–8), 5031–5044. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4430-x

Camargo, S. J., Robertson, A. W., Barnston, A. G., & Ghil, M. (2008). Clustering of eastern North Pacific tropical cyclone tracks: ENSO and MJO effects: Eastern North Pacific Tropical Cyclone Tracks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems,* 9(6). https://doi.org/10.1029/2007GC001861

Camargo, S. J., Sobel, A. H., Barnston, A. G., & Emanuel, K. A. (2007). Tropical cyclone genesis potential index in climate models. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography,* 59 A(4), 428–443. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x

Camargo, S. J., & Wing, A. A. (2016). Tropical cyclones in climate models. *WIREs Climate Change,* 7(2), 211–237. https://doi.org/10.1002/wcc.373

Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A., Taylor, M. A., Herrera, D. A., Martinez-Castro, D., Gouirand, I., Sierra-Lorenzo, M., Vichot-Llano, A., Stephenson, T., Fonseca, C., Campbell, J., & Alpizar, M. (2020). Evaluation of sixteen gridded precipitation datasets over the caribbean region using Gauge observations. *Atmosphere*, 11(12), 1334. https://doi.org/10.3390/atmos11121334

Chen, A., Emanuel, K. A., Chen, D., Lin, C., & Zhang, F. (2020). Rising future tropical cyclone-induced extreme winds in the Mekong River Basin. *Science Bulletin*, 65(5), 419–424. https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.11.022

CONABIO. (2010). *Zona económica exclusiva de México* [Mapa, escala 1:250,000]. Modificado de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); Lugo-Hubp, J., Vidal-Zepeda, R., Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., Zavala-H., J., y otros (1990). *Zona económica exclusiva* de México. In *Atlas Nacional de México* (Vol. I, I.1.1 Hipsometría y Batimetría, escala 1:4,000,000). Instituto de Geografía, UNAM.

CONABIO. (2012). *División política estatal* 1:250,000. 2012 (1ª ed.) [Mapa, escala 1:250,000]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

de Bruijn, J. A., Daniell, J. E., Pomonis, A., Gunasekera, R., Macabuag, J., de Ruiter, M. C., Koopman, S. J., Bloemendaal, N., de Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2022). Using rapid damage observations for Bayesian updating of hurricane vulnerability functions: A case study of Hurricane Dorian using social media. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 72*, 102839. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102839

Elsner, J. B., Hodges, R. E., & Jagger, T. H. (2012). Spatial grids for hurricane climate research. *Climate Dynamics*, 39(1–2), 21–36. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1066-5

Elsner, J. B., Jagger, T. H., Dickinson, M., & Rowe, D. (2008). Improving multiseason forecasts of North Atlantic hurricane activity. *Journal of Climate,* 21(6), 1209–1219. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1731.1

Emanuel, K. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 110(30), 12219–12224. https://doi.org/10.1073/pnas.1301293110

Emanuel, K., Ravela, S., Vivant, E., & Risi, C. (2006). A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 87(3), 299–314. https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-299

Emanuel, K., Sundararajan, R., & Williams, J. (2008). Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 89(3), 347–367. https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-347

Fraza, E., & Elsner, J. B. (2014). A spatial climatology of North Atlantic hurricane intensity change. *International Journal of Climatology,* 34(9), 2918–2924.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. J*ournal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Kantha, L. (2006). Time to replace the Saffir-Simpson Hurricane Scale? *Eos,* 87(1), 3–6. https://doi.org/10.1029/2006eo010003

Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology,* 424–425, 264–277. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011

Kossin, J. P. (2018). A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature,* 558(7708), 104–107. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0158-3

Landsea, C. W., & Franklin, J. L. (2013). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Monthly Weather Review,* 141(10), 3576–3592. https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1

Lee, C. Y., Tippett, M. K., Sobel, A. H., & Camargo, S. J. (2018). An environmentally forced tropical cyclone hazard model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems,* 10(1), 223–241. https://doi.org/10.1002/2017MS001186

Leijnse, T. W. B., Giardino, A., Nederhoff, K., & Caires, S. (2022). Generating reliable estimates of tropical-cyclone-induced coastal hazards along the Bay of Bengal for current and future climates using synthetic tracks. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 22(6), 1863–1891. https://doi.org/10.5194/nhess-22-1863-2022

Mendoza, E., Silva, R., Enriquez-Ortiz, C., Mariño-Tapia, I., & Felix, A. (2015). Analysis of the Hazards and Vulnerability of the Cancun Beach System. In *Extreme Events* (pp. 125–136). American Geophysical Union (AGU). https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch10

Meza-Padilla, R., Appendini, C. M., & Pedrozo-Acuña, A. (2015). Hurricane-induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dynamics,* 65(8), 1199–1211. https://doi.org/10.1007/s10236-015-0861-7

Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika, 37*(1–2), 17–23.

Nederhoff, K., Hoek, J., Leijnse, T., Van Ormondt, M., Caires, S., & Giardino, A. (2021). Simulating synthetic tropical cyclone tracks for statistically reliable wind and pressure estimations. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 21(3), 861–878. https://doi.org/10.5194/nhess-21-861-2021

National Hurricane Center *(NHC). (2022). NHC data archive. https://www.nhc.noaa.gov/data/*

Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *R Journal*, 10(1), 439–446. https://doi.org/10.32614/rj-2018-009

R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing.* R Foundation for Statistical Computing.

Romero, R., & Emanuel, K. (2017). Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models. *Journal of Climate*, 30(1), 279–299. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0255.1

Ruiz-Salcines, P., Salles, P., Robles-Díaz, L., Díaz-Hernández, G., Torres-Freyermuth, A., & Appendini, C. M. (2019). On the Use of Parametric Wind Models for Wind Wave Modeling under Tropical Cyclones. *Water*, 11(10), 2044. https://doi.org/10.3390/w11102044

Sobel, A. H., Wing, A. A., Camargo, S. J., Patricola, C. M., Vecchi, G. A., Lee, C.-Y., & Tippett, M. K. (2021). Tropical Cyclone Frequency. *Earth's Future,* 9(12), e2021EF002275. https://doi.org/10.1029/2021EF002275

Trepanier, J. C., Needham, H. F., Elsner, J. B., & Jagger, T. H. (2015). Combining Surge and Wind Risk from Hurricanes Using a Copula Model: An Example from Galveston, Texas. *Professional Geographer*, 67(1), 52–61. https://doi.org/10.1080/00330124.2013.866437

Vickery, P. J., Skerlj, P. F., & Twisdale, L. A. (2000). Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model. *Journal of Structural Engineering,* 126(10), 1222–1237. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:10(1222)

Wang, B., & Murakami, H. (2020). Dynamic genesis potential index for diagnosing present-day and future global tropical cyclone genesis. *Environmental Research Letters,* 15(11), 114008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb01

Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2020). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation.* R Foundation for Statistical Computing. https://CRAN.R-project.org/package=dplyr

1.3 Análisis de tendencias de temperaturas mínimas asociadas al paso de frentes fríos en el estado de Zacatecas

Luis F. Pineda-Martínez
Unidad Académica de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Zacatecas, México
Miembros de *REDESClim*

Baudelio Rodríguez-González
Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, México
Miembros de *REDESClim*

Edgar Rodríguez Arellano
Felipe de Jesús Escalona-Alcázar
Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Palabras Clave: Tendencias climáticas, Clima invernal, Temperaturas mínimas, Frentes fríos.
ODS 2030: Acciones por el Clima.

Introducción

En todas las regiones extratropicales a nivel global es común la presencia de masas frías polares que afectan las condiciones climáticas en los meses de invierno y causan una disminución extrema de las temperaturas. En Norteamérica hay un alto impacto de las masas polares que al combinarse con masas de aire húmedo procedentes del océano Pacífico trasportadas por la corriente de chorro subtropical, causan nevadas en las partes altas de las montañas y heladas en los valles intermontanos en Canadá, Estados Unidos y el norte de México (Ortiz-Álvarez & Zepeda, 2006).

Estos fenómenos meteorológicos extremos pueden ocasionar perturbaciones en la vida cotidiana de los habitantes de las regiones frías. Así, las condiciones de los inviernos pueden ocasionar riesgos para la población, principalmente en el norte de México, que no cuenta con suficiente equipamiento residencial y urbano para enfrentar el frío (Pineda-Martínez & Carbajal, 2009). Se puede decir que el norte del país se caracteriza climáticamente por tener dos estaciones principales: una fría y seca de diciembre a marzo y una cálida el resto de los meses (Jáuregui Ostos, 1992; Pineda-Martínez *et al*., 2007). Los inviernos en el norte México suelen afectar a la población de los estados ubicados en esa región, debido al descenso extremo de las temperaturas nocturnas, principalmente, que es cuando se presenta la mínima meteorológica. Esa región se caracteriza por presentar fuertes gradientes de temperatura, variación en los campos de viento, humedad y presión asociados al paso de un frente frío, principalmente entre los meses de noviembre a marzo (Amador *et al*., 2006; Hewson, 1998).

El análisis de los frentes fríos en la región se ha usado para sistematizaciones en climatologías de frentes atmosféricos (Sanders & Hoffman, 2002; Thomas & Schultz, 2019b), que se definen como la interface entres dos masas de aire de diferentes propiedades (Berry *et al*., 2011). Esa frontera de masas de aire es frecuentemente asociada a cambios en temperatura, intensificación de la velocidad del viento y, en ocasiones, precipitación (Berry *et al*., 2011; Pineda-Martinez & Carbajal, 2009).

Los frentes fríos y cálidos son definidos por características similares, es decir, masas de aire con un lado frío y un lado caliente que interactúan en dos núcleos de presión, generando una circulación quasigeostrófica (Berry *et al*., 2011; Sanders, 1999; Schultz, 2005). La identificación de frentes se realiza de manera sistemática aplicando las definiciones teóricas propuestas por Bjerknes (1919). Pero la forma metodológica para la detección aplicada en la mayoría de los servicios meteorológicos a nivel mundial se basa en la propuesta de Renard & Clarke (1965), la cual fue mejor esquematizada por Hewsen

(1998). Esta identificación se presenta como un producto cartográfico para comunicar los pronósticos al público, principalmente por los servicios meteorológicos, incluidos el *National Weather Service* (NWS) de EE.UU. y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México. Como lo explica de manera simple la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en las cartas meteorológicas un frente es definido como la interacción de dos masas de aire con densidades diferentes; se simboliza con una línea azul con triángulos en el caso de los frentes fríos y con una línea roja con medio círculo para los cálidos (*OMM*, 2019). Actualmente las definiciones estrictas para identificar frentes con el propósito de comunicar los pronósticos han perdido atención debido a la tecnología que presenta mapas a todo color en aplicaciones para distintos dispositivos, incluidos los teléfonos móviles (Niebler *et al*., 2022).

En general, aún existe una controversia de cómo son definidos los frentes (cálidos/fríos), así como la forma en que son identificados geográficamente (Thomas & Schultz, 2019a). Las definiciones han incorporado varios métodos, entre ellos umbrales en gradientes de la temperatura, temperatura potencial, campos de viento y, en algunos casos, gradientes de presión (Hewson, 1998; Niebler *et al*., 2022; Renard & Clarke, 1965; Thomas & Schultz, 2019a). En ese sentido, establecer una climatología de frentes es una tarea complicada, en principio porque la identificación en las cartas sinópticas es generalmente hecha de forma manual, con una alta inversión de tiempo en el análisis de las definiciones de los contornos de los mapas meteorológicos (Niebler *et al*., 2022).

Existen diversas maneras para realizar climatologías de frentes a partir de su identificación. La tradicional y más antigua es dictaminada manualmente por meteorólogos operacionales en consenso, como un grupo de expertos de los que emiten los boletines con las cartas meteorológicas, según la metodología descrita arriba. Un segundo método, que ha tomado popularidad en años recientes, es el de la automatización basada en algoritmos de auto-aprendizaje, con la que se aprovecha la amplia distribución de bases de datos en malla que facilitan esa tarea (ver, por ejemplo, Hewson, 1998; Thomas & Schultz, 2019a y referencia dentro de éste). No obstante, la segunda basa mucho de su aprendizaje en el primer método (con el factor humano). Una desventaja de la automatización es que estos algoritmos presentan algunas deficiencias que el consenso de un grupo de expertos puede solventar gracias a las técnicas basadas en las climatologías manuales (Thomas & Schultz, 2019a). Por esa razón es que los intentos de automatización no se han popularizado entre los sistemas de pronóstico para su difusión al público (Niebler *et al*., 2022). No obstante, las técnicas automatizadas resultan interesantes debido a que las proyecciones de los modelos climáticos y proyectos como CMIP5 y CMIP6 (Berry *et al*., 2011) representarían una gran oportunidad para la estimación de tendencias de frentes en regiones extratropicales y latitudes medias.

La región centro y norte de México se caracteriza por tener inviernos fríos, principalmente asociados a la entrada de masas de aire polar de latitudes altas (Pineda-Martínez & Carbajal, 2009). La combinación de esta dinámica invernal y la elevación del terreno generan una región altamente vulnerable a las condiciones de frio extremo y congelamiento que tiene implicaciones sociales, así como en la productividad agrícola y pecuaria (Medina-García *et al.,* 2018). En particular el estado de Zacatecas cada año registra frío intenso asociado a la entrada de frentes fríos de invierno, lo que genera descensos de temperatura, caída de nieve y agua nieve que ocasionan aumentos de enfermedades respiratorias y, en ocasiones, pérdida de vidas. En este trabajo buscamos analizar y cuantificar tanto el número de frentes fríos como sus temperaturas mínimas asociadas, además de determinar un número promedio de días bajo estas condiciones, ya que cuando los eventos se prolongan por más de tres días sus efectos son mayores.

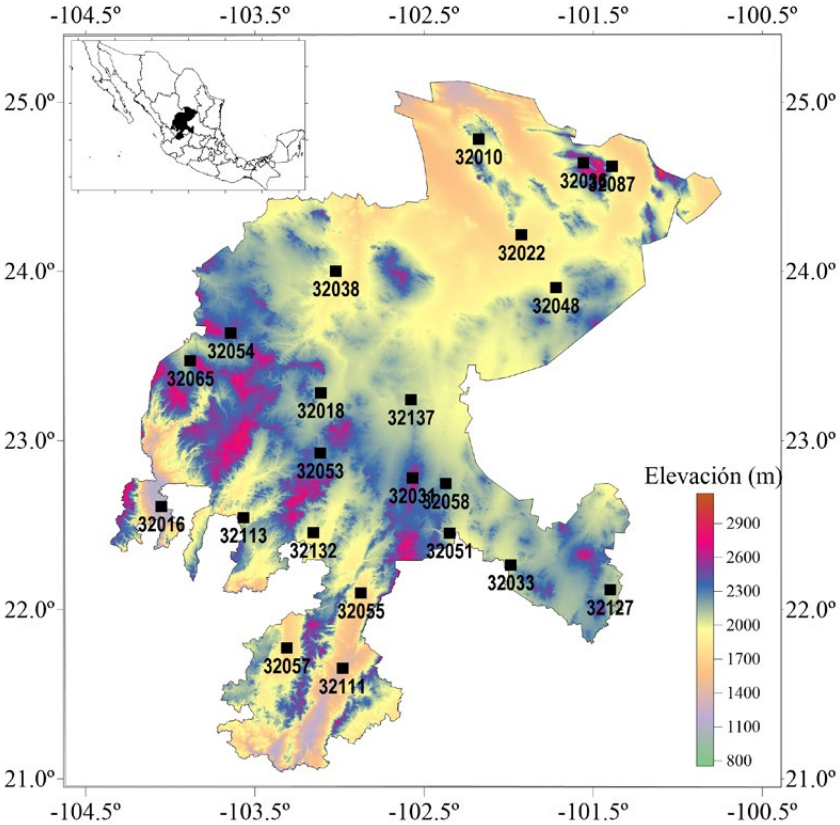
En este contexto, el objetivo de esta investigación fue determinar el impacto de frentes fríos en el estado de Zacatecas, ubicado en el centro norte de México, y responder a la pregunta: ¿existe una variación en la tendencia del número de frentes fríos en el

estado de Zacatecas en el periodo de 1980 a 2018? Para dar respuesta a dicha pregunta basamos nuestro análisis en una climatología de frentes a partir de las cartas sinópticas de análisis gráfico de contornos del *Weather Prediction Center* de Estados Unidos (*WPC*, 2022) y del SMN de México (*SMN*, 2022).

Datos y métodos

Los registros climáticos en superficie fueron obtenidos de la red climática de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) a cargo del SMN. El proceso de generación de la base de datos consistió en seleccionar estaciones climáticas en el estado de Zacatecas con el mayor registro de datos mensuales continuos para el periodo de enero de 1980 a marzo de 2018. Para los cálculos de frentes fríos se usaron los meses invernales, para lo cual se estableció la estación de invierno de noviembre a marzo. Durante estos meses es cuando mayor incidencia de frentes fríos se registra en la región del norte de México y el sur de EE.UU. (Biard & Kunkel, 2019). De esa manera, en las estaciones seleccionadas se verificó que su serie de tiempo cumpliera con un alto porcentaje de datos diarios en el periodo de estudio y para esos meses (>90%). Se identificaron 81 estaciones con los datos completos.

No obstante, para el análisis de los frentes fríos se requiere una espacialidad entre puntos de observación de por los menos 100 km, como se establece en otras climatologías de frentes (ver, por ejemplo, Tabla 2 de Thomas & Schultz, 2019b). Finalmente, se seleccionaron 23 estaciones climáticas distribuidas espacialmente en el estado de Zacatecas (Figura 1) para las cuales se realizó el control de calidad y depuración de datos erróneos más estrictos, que consistió en detectar valores anómalos de temperatura, como datos de tres cifras, valores faltantes y remoción del valor 'Nulo' en los datos. De cada estación se usaron los parámetros de temperaturas mínimas, máximas y precipitación, esta última para identificar lluvia asociada a frentes fríos y como criterio de caída de nieve y agua nieve.



► **Figura 1.** Distribución de las 23 estaciones climáticas y el mapa digital de elevaciones de terreno de Zacatecas, México.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2022).

Identificación de frentes fríos

La identificación de frentes fríos se realizó mediante observación de las cartas sinópticas hechas bajo el "criterio de expertos" (Hewson, 1998), es decir, realizadas manualmente por el personal operativo tanto del SMN de México y del WPC de Estados Unidos (*SMN*, 2022; *WPC*, 2022). En los mapas meteorológicos se analizó el paso de los frentes fríos representados en las cartas sinópticas como una línea con triángulos apuntando hacia la dirección que se dirige la masa de aire frío.

Se sabe que los frentes responden a un gradiente de temperatura muy marcado por zona baroclínica estrecha que avanza conforme la intrusión de la masa de aire frío polar hacia latitudes bajas y en un frente de onda muy amplio (entre 1000 y 5000 km) (Hewson, 1998). Para el caso de nuestro estudio se identificaron sólo aquellos frentes que entran a la región norte y noroeste de México y que marcan un descenso en las temperaturas de las estaciones seleccionadas en el centro del país; quedaron fuera, por ejemplo, frentes que irrumpen en el Golfo de México y en la zona de *Nortes* de la región oriental del país (Luna-Niño & Cavazos, 2018).

Una primera búsqueda de los frentes fríos consistió en marcar las fechas consecutivas en cada una de las estaciones donde se cumplían el criterio de la temperatura mínima menor a 5º C y menor a 20º C para la máxima, con este criterio se establecieron éstos como los "días fríos" (FD). Se identificaron aquellas fechas para días con temperaturas mínimas bajas extremas (<0º C) indicando la presencia de frentes fríos que se desplazaron muy rápido en esas regiones. Así fueron analizadas cada una de las estaciones meteorológicas, a fin de identificar los días con posible incidencia de frentes fríos.

Las fechas marcadas como "días fríos" en las diversas estaciones meteorológicas fueron cotejadas en las cartas sinópticas. Cuando era detectado un frente frío para el día marcado entonces se contabilizaba como frente frío (FF). Consecutivamente, se contaban los días con las mismas condiciones de día frío, considerando así el paso de la misma masa de aire frío en las cartas sinópticas. El total de días fríos se cuantificaba en el momento que las temperaturas mínimas eran mayores a 5º C y se marcaba como el fin de un frente y, por lo tanto, el conteo concluía y se cuantificaba el total de "días de frente". Con estos datos diarios, se calculó el valor de la temperatura mínima (TNFF), máxima (TXFF) y la precipitación (PRFF) específicamente de los días de frente frío. Esto se realizó para cada una de las estaciones meteorológicas.

Los días identificados durante el paso del frente frío fueron señalados para cada estación y en cada año, y se identificaron con un número de frente frío consecutivo según el registro para cada estación meteorológica. Cada una de las fechas fue registrada y se fijó el día intermedio del FF como el Núcleo del Frente, indicando el punto medio del paso de la masa de aire frío en ese punto específico. Esta información también se incluyó para cada uno de los frentes en las 23 estaciones.

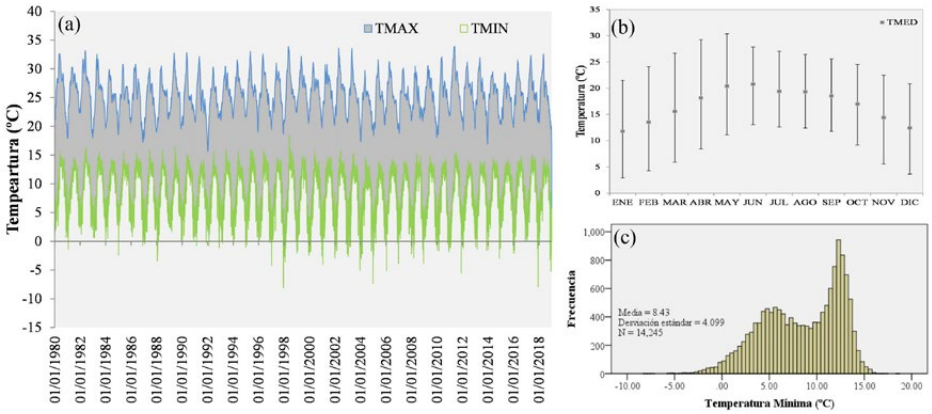
En resumen, con los datos obtenidos se analizaron la distribución horizontal y las series de tiempo del número de frentes fríos por año para el total de los registros del periodo de estudio. También se realizó un análisis de tendencias de los parámetros y de variables obtenidas, como el número total de frentes fríos (FF), días de frente (CD), temperatura mínima (TNFF) y máxima (TXFF), así como la precipitación (PRFF) en los días de frente.

Resultados y discusión

Climatología invernal

En la Figura 2 se muestra la climatología de las temperaturas promedio del estado de Zacatecas de las 23 estaciones climáticas. Se muestra un análisis para todo el periodo de estudio de la variabilidad interanual tanto de las temperaturas máximas y mínimas. En la Figura 2a se observan algunos eventos extremos de temperatura de verano e invierno, los picos máximos y mínimos se relacionan con eventos de ondas cálidas y

frías. Aunque es menos común, existe el efecto de ondas cálidas de primavera en abril y mayo, cuando se han registrado temperaturas de más de 40 grados en regiones del sureste, por ejemplo los días 21 y 22 mayo de 2011 (*SMN*, 2022).



► **Figura 2.** (a) Promedio diurno de la temperatura diaria de la serie de tiempo 1980-2018, obtenida a partir de la media de las 23 estaciones estudiadas. (b) Climograma de temperaturas del promedio mensual de las 23 estaciones climáticas, y (c) Histograma de frecuencia de datos diarios de temperatura para las 23 estaciones del total del periodo de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas frías extremas invernales en el norte del país ocurren principalmente en las regiones de montaña, donde es común la caída de nieve o aguanieve durante el paso de frentes fríos y la intrusión de masas de aire que lo impulsan. Las regiones de la Sierra Madre Occidental (SMOc) y el altiplano mexicano son clasificadas como zonas de clima frío, con temperaturas mínimas promedio, en los meses de invierno, menores a 10º C (Amador *et al*., 2006). Gran parte del estado de Zacatecas, en la región norte, presenta ese tipo de clima, con excepción de la región sureste.

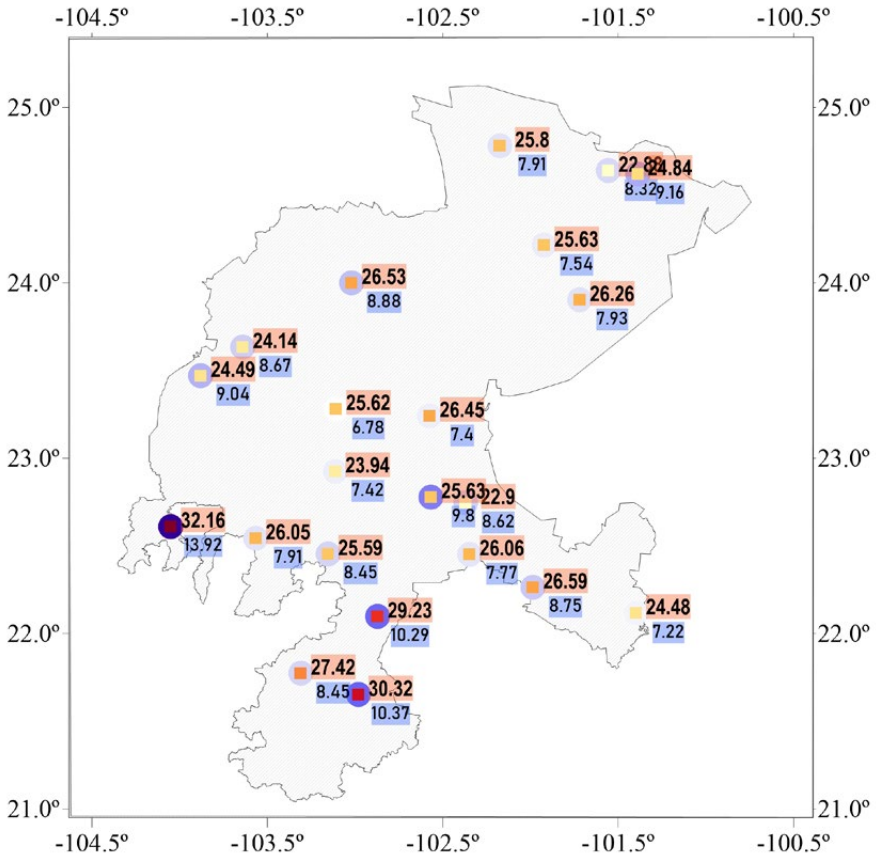
A nivel global, los climas fríos están definidos por las isotermas 10 y 18 ºC, principalmente en la región de los trópicos. La definición de los trópicos, desde el punto de vista cartográfico, presenta menos problemas que en la atmósfera, donde intervienen otros factores en la distribución de las temperaturas y su dinámica. En ese sentido, desde el punto de vista meteorológico, las regiones frías se pueden delimitar donde la dinámica con respecto a las zonas cálidas difieren claramente entre ellas (Amador *et al*., 2006). Si se utiliza este concepto, los trópicos se convierten en fuentes importantes de momento y calor que pueden asociarse con una amplia gama de movimientos atmosféricos.

Durante los meses de invierno se presentan valores extremos diarios de temperatura mínima que están relacionados con el paso de frentes fríos. El paso de las masas de aire polar que irrumpen hasta latitudes bajas causa un descenso drástico de la temperatura mínima diaria. Históricamente se han registrado eventos de frío extremo y caída de nieve en el centro del estado de Zacatecas, así como las partes de elevaciones altas y zonas de montaña. El registro mínimo histórico fue de -18º C en el evento del 12 de diciembre de 1997. Para los meses de invierno, los datos de las estaciones tienen un valor medio de temperatura mínima de 8.4º C y 25.5º C (Figura 2b).

El histograma de temperaturas mínimas (Figura 2c) muestra un comportamiento bimodal, como es descrito por otros autores para el norte de México (Brito-Castillo *et al*., 2010; Englehart & Douglas, 2001; Jáuregui Ostos, 1992; Santillán Espinoza *et al*., 2011). Zacatecas se encuentra entre las regiones subtropicales, por lo que se observan dos estaciones bien definidas donde la intensidad y duración del invierno se relaciona directamente con la posición en latitud y la altitud (Gutiérrez-Ruacho *et al*., 2010).

Mapas de temperaturas

Los mapas de temperaturas muestran el comportamiento diferido para las distintas regiones geográficas de Zacatecas. La Figura 3 muestra los valores promedio anuales de temperaturas máxima y mínima de cada estación climática y se observa un patrón espacial norte-sur.



► **Figura 3.** Temperaturas (º C) máxima (número en la parte superior del símbolo) y mínima (número inferior) promedio anual para el periodo de estudio en el estado de Zacatecas.

Fuente: Elaboración propia.

La región de Zacatecas se encuentra en la zona que limita con las cuencas del norte, que dividen las zonas áridas y semiáridas de Norteamérica de la región subtropical y lluviosa del centro y sureste de México. De esa manera, el verano tiene una mayor influencia de fenómenos tropicales, como las ondas del este y ciclones tropicales, que transportan humedad y calor hacia las costas orientales del país y logran penetrar en el interior del territorio.

Por otro lado, en invierno las condiciones de mayor escala, como la Alta Semipermanente de Bermudas y la Alta de California, influyen en el desplazamiento de ondas provenientes del norte hacia el ecuador y permiten su intrusión desde la región del noroeste de EE.UU. y logran llegar hasta el istmo de Tehuantepec (Luna-Niño & Cavazos, 2018; Pineda-Martinez & Carbajal, 2009). El comportamiento de los frentes está determinado por variaciones de la configuración de estos gradientes de presión y de la densidad de las masas de aire asociada.

Por ejemplo, la alta del Pacífico nororiental propicia el viaje de ondas a través de las Montañas Rocosas de los Estados Unidos, pasando por la Gran Cuenca e interactuado con la topografía para entrar por el sureste de Texas y el estado de Chihuahua, en México (Bukovsky & Karoly, 2009; Charles E. Konrad, 1989; Grotjahn *et al.*, 2016; Wheeler *et al.*, 2011). Estas masas de aire frío son canalizadas entre las dos formaciones montañosas: la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, en el norte y centro de México. Esta dinámica de frentes contribuye a la configuración de los climas invernales en toda la mesa central (Pineda-Martínez & Carbajal, 2017).

Mapas de frentes fríos

Existe una estrecha relación entre las temperaturas mínimas invernales, considerando una división bimodal como se observa en el histograma de la Figura 2c, y el paso de los frentes fríos. El número de frentes fríos muestra un gradiente de noroeste a

sureste. Es interesante ver, sobre todo, los valores de temperatura promedio con un patrón norte-sur. Se ha documentado la inclinación de la onda de avance de las masas de aire relacionadas con el balance geostrófico entre los núcleos de presión asociados a las diferencias de densidad de las masas de aire, es decir, las zonas de alta presión en el lado frío, casi siempre posicionado en el lado noroeste del frente (Pineda-Martinez & Carbajal, 2009).

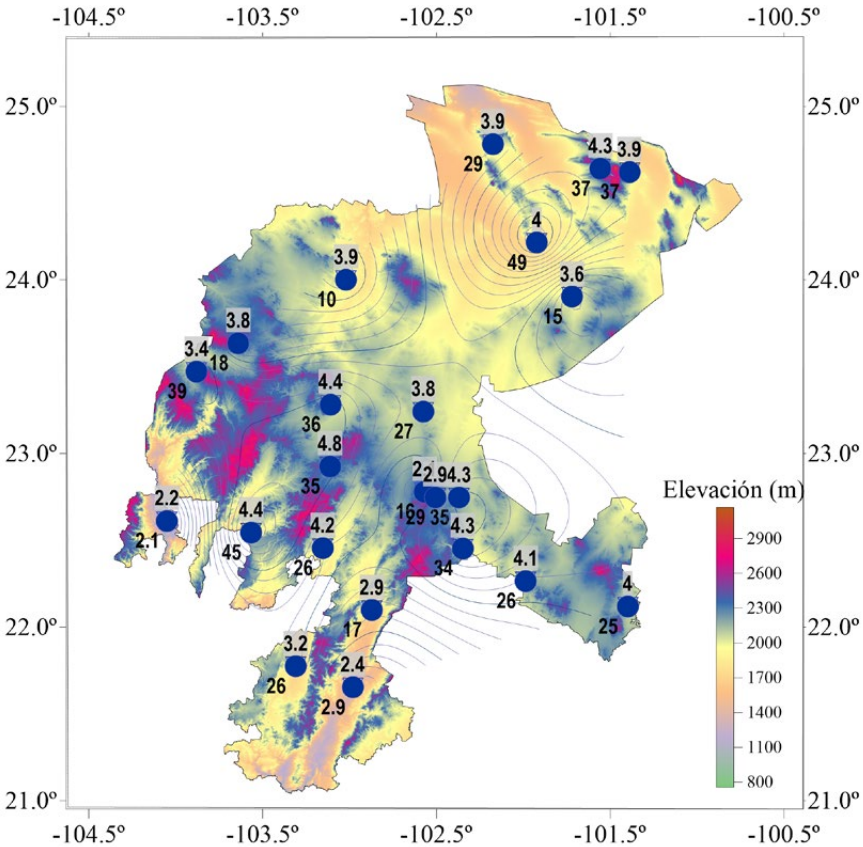
Si bien el gradiente baroclínico determina tanto la amplitud como la longitud del frente, el gradiente de presión determina los flujos y el avance de la onda, regularmente inclinado en esa dirección (NE-SE). Las ondas pierden parte de la inercia, dotada inicialmente durante el desprendimiento de esas masas del vórtice polar, lo que hace que la masa de aire rompa debido a la compleja topografía y cause una serie de pequeñas ondas de masas de aire frío, que son registradas de manera diferencial por cada estación. Esto se observa en las variaciones del número de frentes registrados localmente. Es decir, un gradiente espacial de temperatura mínima de frente (TNFF) también se puede asociar con efectos de la elevación del terreno. Si bien la definición cartográfica de los frentes indica su posición en superficie, se sabe que existe una variación en los niveles medios y altos de la atmósfera, ya que los frentes se propagan en forma de cuñas de presión que son forzadas por el lado caliente del frente (Hewson, 1998; Schultz, 2005).

El número de días de frente (FF) se presenta en un rango de corta variación entre 2.4 y hasta 4.3 días (Figura 4). Esto es consistente con lo reportado por el SMN en 2018. Por otro, lado el número promedio de frentes por año, es decir, el número total de días registrados en la cuenta de frentes fríos para cada estación, si muestra un gra-diente de norte a sur (Figura 4). En las Figuras 4 y 5 se observa una alta influencia de la topografía no sólo en el gradiente geotérmico, sino en el paso de las masas de aire. En ocasiones, los frentes contribuyen a la precipitación invernal en las zonas de ines-tabilidad en la cuña de presión. Algunos de los frentes se presentan en condiciones de menor humedad y causan solamente heladas sin la presencia de precipitación (San-tillán Espinoza *et al.*, 2011). En muchos casos, algunas características de los frentes que afectan la región del norte de México han sido descritas como intensas, incluso eventos de caída de nieve (Pineda-Martinez & Carbajal, 2009).

Los frentes fríos se pueden clasificar o definir por su impacto en las temperaturas mínimas diarias, es decir, la disminución causada por el paso de frente y la subsecuen-te masa de aire frío. Aunque estas definiciones tienen un amplio rango de discusión en la literatura sobre los parámetros termodinámicos que intervienen (por ejemplo en Hewson, 1998), en este caso, los frentes con un mayor gradiente en la temperatura se pueden considerar como frentes "intensos" y aquellos con un bajo gradiente como frentes "débiles". Esto ayuda a explicar cómo un frente "débil" sólo es registrado en los sitios de elevaciones por arriba de los 2,300 m, mientras que regiones en bajos topográficos (menor a los 1,600 m) podrían no registrar el mismo número. Por otro lado, se han presentado frentes fríos intensos que son registrados en todo el estado y que causaron una disminución drástica de temperatura, como en diciembre de 1997 o, más reciente, en marzo de 2017 (Figura 6).

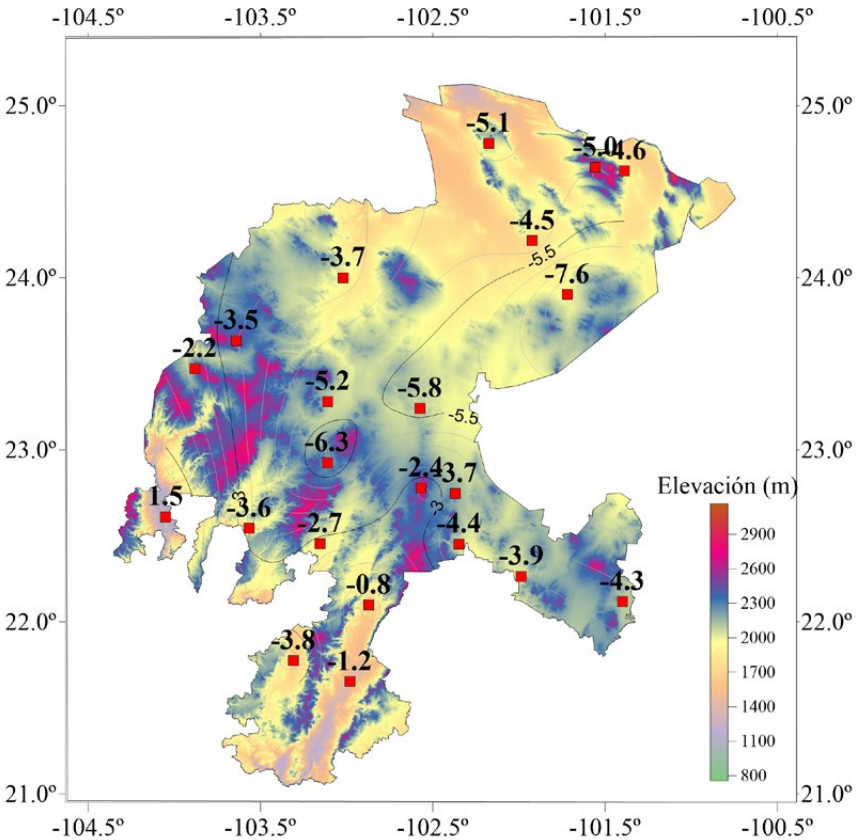
Es interesante analizar el núcleo del frente frío definido como el día donde se registra la temperatura mínima extrema durante los días de frente. Para cada una de las estacio-nes se definió ese día como el núcleo y se graficó con respecto a su posición latitudinal (Figura 6a). El número de frentes fue calculado a partir del promedio de las 23 estacio-nes y se consideró el número registrado de manera individual de cada estación, debido a que cada estación registra un número diferente de frentes por lo discutido arriba.

Existen años donde el descenso de la temperatura mínima sólo es registrado en cier-tos puntos del altiplano en el norte del estado en elevaciones por arriba de los 2,000 m. Sin embargo, se observan años en los que el registro de núcleos intensos fue a lo largo de



► **Figura 4.** Número de frentes fríos promedio de invierno FF (número debajo del símbolo), y número de días promedio de cada frente (CD), (números sombreados en la parte superior del símbolo).

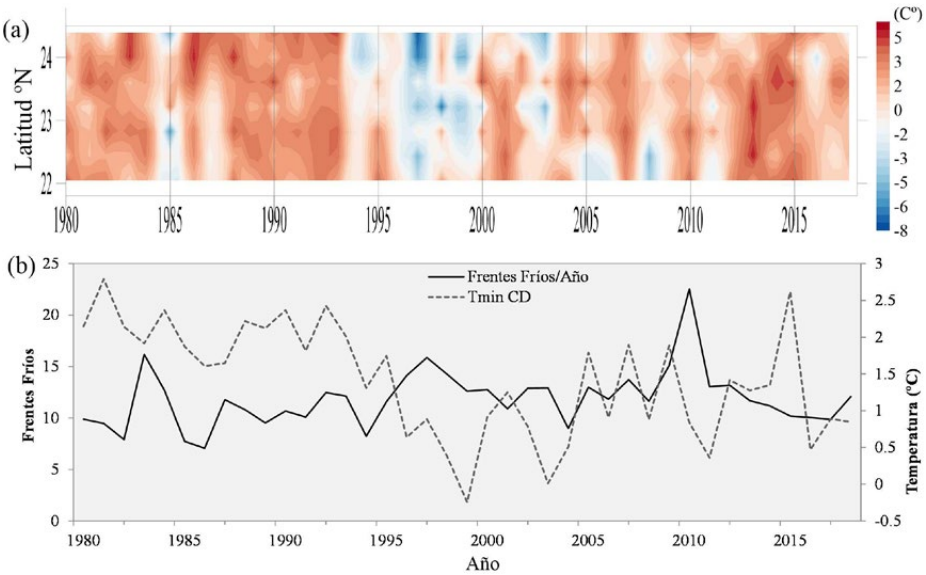
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 5.** Temperatura mínima de días de frente promedio (TNFF) de los meses de invierno para el periodo de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

un gradiente de norte a sur. Esos años también coinciden con los registros mínimos de temperatura (Figura 6b). Es importante notar que el número total de frentes fríos no necesariamente corresponde con los años de 1997 y 1998 y un sucesivo aumento de temperaturas mínimas a partir del año 2000. Puesto que la temperatura representa únicamente el promedio de los días de frente, se puede decir que los frentes, a pesar de no mostrar una tendencia, se están haciendo menos intensos, es decir, con un gradiente de la temperatura menor al del núcleo de frente.



► **Figura 6.** (a) Diagrama Hovmöller (Latitud-Año) de la temperatura mínima de frente para un gradiente latitudinal del estado de Zacatecas. (b) Serie de tiempo del número de frentes registrados y su temperatura mínima promedio (CD).

Fuente: Elaboración propia.

La serie de tiempo de los frentes registrados por año (Figura 6b) muestra una variación interanual con algunos periodos con un mayor número de frentes; resalta el invierno de 2011 cuando también se presentó una sequía extraordinaria en todo el norte de México y el sur de EE.UU., es decir, un periodo de invierno muy frío y seco (Leeper *et al*., 2017).

El comportamiento es interesante porque el número de frentes fríos no determina el comportamiento de la temperatura mínima asociada. Esto indica que la dinámica de los frentes es independiente de los valores de temperatura, del contraste de las masas de aire y podría estar asociado más a otros factores como los gradientes de presión.

Las tendencias del número de frentes fríos muestran un pequeño incremento en la mayor parte del territorio, y sólo algunos sitios con una tendencia negativa (Figura 7). En términos generales, coincide con otras climatologías de frentes fríos, principalmente en Norteamérica (Bochenek *et al*., 2021; Dagon *et al*., 2022).

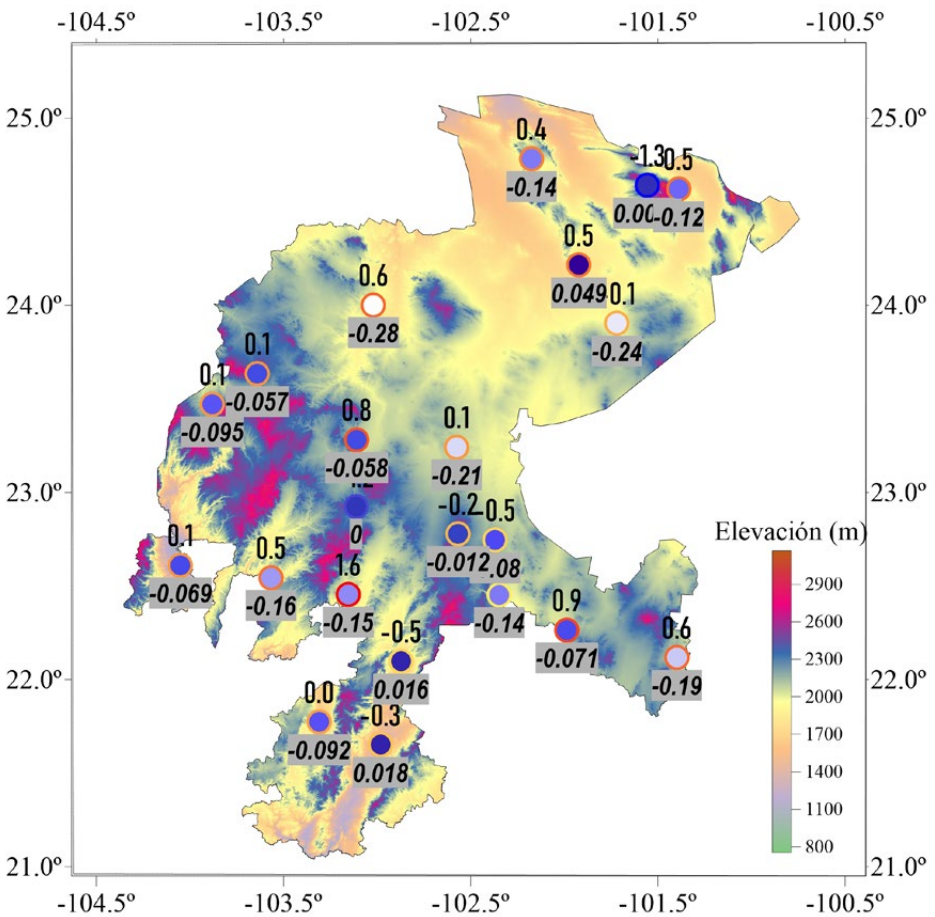
Por otro lado, la temperatura mínima de cada frente presenta una tendencia negativa, es decir, un decremento en las temperaturas. Aunque en investigaciones previas se ha discutido sobre el aumento de las temperaturas mínimas de invierno, que han incrementado gradualmente en los últimos 20 años en el norte de México (Cavazos *et al*., 2019; Pavia *et al*., 2006), en este estudio se muestra la temperatura mínima asociada a cada frente con una menor tendencia a aumentar; incluso, en algunos registros se observa una disminución.

De los datos se observó que en cada frente frío existe un pico de mínima extrema (núcleo del frente) que se refleja en una tendencia negativa de su temperatura mínima que fue promediado exclusivamente para esos días específicos (3.7 días ±0.74). No obstante, no es estadísticamente significativa, ni tampoco la tendencia de frentes. En la Figura 6b se observa que las temperaturas mínimas de invierno muestran una tendencia a disminuir en los últimos años del siglo pasado y tiende aumentar después del año 2000. Por otro lado, el conteo anual de frentes fríos no muestra una tenden-

cia visible en la serie, lo que puede indicar que mientras los valores de temperatura responden a oscilaciones de baja frecuencia, por ejemplo, la Oscilación Decadal del Pacifico (PDO, por sus siglas en inglés) o El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), el número de ondas de frente no responden a esa misma dinámica.

Los valores de las temperaturas mínimas estacionales no son determinadas totalmente por el número de frentes como previamente se había discutido (Pineda-Martínez y Carbajal, 2009). En ese sentido los estudios sobre las tendencias regionales muestran más el comportamiento a gran escala donde se incluyen las tendencias generales así como su relación con esas oscilaciones (por ejemplo Cavazos *et al.*, 2019; Luna-Niño & Cavazos, 2018).

Pueden existir factores asociados a la identificación de los frentes como se discute en Thomas & Schultz (2019b), y actualmente se recurre a mayores herramientas para su detección. También pueden existir factores locales como el efecto de la topografía tanto en la propagación de los frentes y una influencia diferenciada en las temperaturas mínimas tanto en la ubicación geográfica como la elevación, por ejemplo, en latitudes altas hay un mayor impacto del frente así como en los picos máximos de topografía (>2,000 m).



► **Figura 7.** Valores de la tendencia lineal para el número de frentes por año (número arriba del símbolo) y de la temperatura mínima promedio calculada para los días de frente (debajo en cuadro gris). Ambas tendencias son calculadas para el total del periodo en los meses invernales de los datos de cada estación.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los eventos de días fríos causan afectaciones a la vida cotidiana debido a que las bajas temperaturas duran algunos días. Los frentes fríos en el norte de México tienen un papel importante en la climatología invernal, pues se asocian regularmente a las temperaturas mínimas extremas, heladas y caída de nieve.

El factor de las temperaturas congelantes es un tema de importancia en los sistemas de la gestión de riesgos por temperaturas bajas en las zonas urbanas ubicadas en las regiones altas del altiplano mexicano.

Se encontró que los días de frente pueden variar, desde un par hasta cinco en casos extremos, además de registrarse temperaturas por debajo de los 0º C durante el paso de las masas de aire frío. Se observó una alta variabilidad temporal de los frentes a lo largo del periodo de estudio, con algunos años de mayor incidencia del paso de frentes en la estación invernal como 1997 y 1998. Por otro lado, en la distribución espacial se ve un efecto de las elevaciones del terreno en el registro y paso de frentes asociados a masas de aire frío que vienen del norte con un gradiente desde zonas altas por arriba de los 2,000 m hasta zonas por debajo de los 1,600 m. En el patrón espacial se apreció un rompimiento de la onda del frente debido a la topografía, lo que genera un efecto diferido de las masas frías en las distintas regiones del estado de Zacatecas.

En este trabajo se busca mostrar la variación del número de frentes fríos que afectan la región del estado de Zacatecas, debido a su importancia en factores relevantes como la gestión del riesgo asociado a temperaturas bajas extremas y su efecto en la población. Se observó una ligera tendencia positiva, aunque no significativa estadísticamente, del número de frentes fríos. Esta tendencia se puede deber a dos factores: primero un incremento por la tendencia de un aumento de la actividad de tormentas invernales en el hemisferio norte causadas por un mayor desprendimiento de masas de aire polar por un debilitamiento del vórtice polar. O bien un incremento en la detección de frentes en las agencias de pronóstico y detección, debido a un mayor número de herramientas disponibles como imágenes de satélite, mejores herramientas de visualización, entre otras.

En ese sentido, se requiere de un análisis más amplio de la dinámica de frentes fríos en el norte de México y su interacción con la topografía para determinar efectos diferidos en las distintas regiones del centro y norte del país.

» Referencias bibliográficas

Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography,* 69(2–4), 101–142. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007

Berry, G., Reeder, M. J., & Jakob, C. (2011). A global climatology of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters,* 38(4), 1–5. https://doi.org/10.1029/2010GL046451

Biard, J. C., & Kunkel, K. E. (2019). Automated detection of weather fronts using a deep learning neural network. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography,* 5(2), 147–160. https://doi.org/10.5194/ascmo-5-147-2019

Bochenek, B., Ustrnul, Z., Wypych, A., & Kubacka, D. (2021). Machine learning-based front detection in central europe. *Atmosphere,* 12(10), 1–15. https://doi.org/10.3390/atmos12101312

Bjerknes, J. (1919). On The Structure Of Moving Cyclones. *Monthly Weather Review,* 47(2), 95–99. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<95:otsomc>2.0.co;2

Brito-Castillo, L., Vivoni, E. R., Gochis, D. J., Filonov, A., Tereshchenko, I., & Monzon, C. (2010). An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *Journal of Arid Environments,* 74(5), 531–539. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.10.014

Bukovsky, M. S., & Karoly, D. J. (2009). Precipitation simulations using WRF as a nested regional climate model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* 48(10), 2152–2159. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2186.1

Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F., & Valenzuela, E. (2019). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology, August*, 1–25. https://doi.org/10.1002/joc.6276

Charles E. Konrad, S. J. C. (1989). An Examination of Extrem Cold Air Outbrakes over Eastern North America. *Monthly Weather Review,* 1999(December), 1–6.

Dagon, K., Truesdale, J. E., Biard, J. C., Kunkel, K. E., Meehl, G. A., & Molina, M. J. (2022). Machine learning-based detection of weather fronts and associated extreme precipitation. *Earth and Space Science Open Archive,* May, 27. https://doi.org/10.1002/essoar.10511254.1

Englehart, P. J., & Douglas, A. V. (2001). The role of Eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of Western Mexico. *International Journal of Climatology,* 21(11), 1357–1370. https://doi.org/10.1002/joc.637

Grotjahn, R., Black, R., Leung, R., Wehner, M. F., Barlow, M., Bosilovich, M., Gershunov, A., Gutowski, W. J., Gyakum, J. R., Katz, R. W., Lee, Y. Y., Lim, Y. K., & Prabhat. (2016). North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: a review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends. In *Climate Dynamics* (Vol. 46, Issues 3–4). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2638-6

Gutiérrez-Ruacho, O., Brito-Castillo, L., Díaz-Castro, S., & Watts, C. (2010). Trends in rainfall and extreme temperatures in northwestern Mexico. *Climate Research,* 42(2), 133–142. https://doi.org/10.3354/cr00874

Hewson, T. D. (1998). Objective fronts. *Meteorological Applications,* 5(1), 37–65. https://doi.org/10.1017/S1350482798000553

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2022). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Consultado el 20 de Mayo de 2023 de https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

Jáuregui Ostos, E. (1992). Aspects of monitoring local/regional climate change in a tropical region. *Atmósfera*, 5, 66–78.

Leeper, R. D., Bell, J. E., Vines, C., Palecki, M., Seager, R., & Hoerling, M. (2017). Atmosphere and ocean origins of North American droughts. *Journal of Hydrometeorology,* 27(12), 515–527. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00329.1

Luna-Niño, R., & Cavazos, T. (2018). Formation of a coastal barrier jet in the Gulf of Mexico due to the interaction of cold fronts with the Sierra Madre Oriental mountain range. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 144(710), 115–128. https://doi.org/10.1002/qj.3188

Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Zegbe, J. A., Soria Ruiz, J., Rodríguez Moreno, V., & Díaz Padilla, G. (2014). Impacto potencial del cambio climático en la región productora de durazno en Zacatecas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas,* 5(SPE10), 1939-1950.

Niebler, S., Miltenberger, A., Schmidt, B., & Spichtinger, P. (2022). Automated detection and classification of synoptic-scale fronts from atmospheric data grids. *Weather and Climate Dynamics,* 3(1), 113–137. https://doi.org/10.5194/wcd-3-113-2022

OMM. (2019). *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción: Anexo IV al Reglamento Técnico de la OMM* (WMO-No. 485, Vol. I, p. 200). Organización Meteorológica Mundial. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=440

Ortiz Álvarez, M. I., & Zepeda, R. V. (2006). Exposure to cold winters of the population in Mexico | Población expuesta a inviernos fríos en México. *Investigaciones Geograficas*, 59, 93–112.

Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2006). PDO – ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate,* 19(24), 6433-6438. https://doi.org/10.1175/JCLI4045.1.

Pineda-Martinez, L. F., & Carbajal, N. (2009). Mesoscale numerical modeling of meteorological events in a strong topographic gradient in the northeastern part of Mexico. *Climate Dynamics,* 33(2–3), 297–312. https://doi.org/10.1007/s00382-009-0549-0

Pineda-Martínez, L. F., & Carbajal, N. (2017). Climatic analysis linked to land vegetation cover of Mexico by applying multivariate statistical and clustering analysis. *Atmosfera*, 30(3). https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.04

Pineda-Martínez, L. F., Carbajal, N., & Medina-Roldán, E. (2007). Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of México using principal component analysis (PCA). *Atmosfera*, 20(2).

Renard, R. J., & Clarke, L. C. (1965). Experiments in Numerical Objective Frontal Analysis 1 . *Monthly Weather Review,* 93(9), 547–556. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0547:einofa>2.3.co;2

Sanders, F. (1999). A proposed method of surface map analysis. *Monthly Weather Review, 127*(6 I), 945–955. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0945:APMOSM>2.0.CO;2

Sanders, F., & Hoffman, E. G. (2002). A climatology of surface baroclinic zones. *Weather and Forecasting,* 17(4), 774–782. https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0774:ACOSBZ>2.0.CO;2

Santillán Espinoza, L., Blanco Macías, F., Magallanes Quintana, R., García Hernández, J., Cerano Paredes, J., Delgadillo Ruiz, O., & Valdez Cepeda, R. (2011). Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 2, 207–219.

Schultz, D. M. (2005). A review of cold fronts with prefrontal troughs and wind shifts. *Monthly Weather Review*, 133(8), 2449–2472. https://doi.org/10.1175/MWR2987.1

SMN. (2018). *Cold fronts climatology 2001-2016*. Servicio Metereológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios

SMN. (2022). *Climatología Diaria*. Servicio Metereológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica

Thomas, C. M., & Schultz, D. M. (2019a). Global climatologies of fronts, airmass boundaries, and airstream boundaries: Why the definition of "'front'" matters. *Monthly Weather Review,* 147(2), 691–717. https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0289.1

Thomas, C. M., & Schultz, D. M. (2019b). What are the best thermodynamic quantity and function to define a front in gridded model output? *Bulletin of the American Meteorological Society,* 100(5), 873–896. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0137.1

Wheeler, D. D., Harvey, V. L., Atkinson, D. E., Collins, R. L., & Mills, M. J. (2011). A climatology of cold air outbreaks over North America: WACCM and ERA-40 comparison and analysis. *Journal of Geophysical Research Atmospheres,* 116(12), 1–8. https://doi.org/10.1029/2011JD015711

WPC. (2022). *U.S. Daily Weather Maps*. Daily Weather Maps. https://library.noaa.gov/Collections/Digital-Collections/US-Daily-Weather-Maps

1.4 Descripción y afectaciones de una onda de calor histórica en el noroeste de México

Jorge Cortés-Ramos
SECIHTI–Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Unidad La Paz. Miraflores 334, Bellavista, La Paz, Baja California Sur, México

Luis Brito-Castillo
Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste S.C., Unidad Guaymas, km 2.35 Camino al Tular S/N, estero de Bacochibampo, Guaymas, Sonora, México

Luis M. Farfán
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Unidad La Paz. Miraflores 334, Bellavista, La Paz, Baja California Sur, México

María Z. Flores López
Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera al Sur km 5.5, La Paz, Baja California Sur, México

Ana Teresa Mendoza-Rosas
SECIHTI–Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, Morelia, Michoacán, México

Palabras Clave: onda de calor, noroeste de México, riesgo.
ODS 2030 de incidencia: Vida de ecosistemas terrestres, salud y bienestar, acción por el clima.

Introducción

Las temperaturas inusualmente cálidas pueden afectar la salud de las personas y el medio ambiente (Secretaría de Salud, 2020), en particular con la llegada de una onda de calor intensa. Existen diferentes definiciones de onda de calor descritas en la literatura. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define a una onda de calor como un período de tiempo inusualmente cálido con condiciones de temperatura por encima de umbrales definidos que persisten durante al menos tres días consecutivos en un amplio territorio (Sharma *et al.*, 2022). Esta definición aplica únicamente al periodo de verano (o de temperaturas cálidas) y excluye aquellos meses que lo anteceden o lo preceden. Herrera-Alanís (2012), en su tesis de doctorado, utiliza diferentes métricas con el propósito de definir y caracterizar la ocurrencia de las ondas de calor en México. En su investigación concluye que el método más adecuado para definir una onda de calor es mediante el cálculo de umbrales relativos a cada sitio de observación, particularmente los percentiles 90, 95, 99 (P90, P95, P99), de la distribución de temperaturas máximas observadas. También menciona que se debe poner atención a las temperaturas mínimas con el fin de caracterizar a detalle el ciclo de vida de una onda de calor, el cual repercute

en el desenvolvimiento diario de los seres vivos. En ondas de calor extremas, detalla que las temperaturas mínimas alcanzan un valor por encima de las normales climatológicas que se va incrementando durante el día. Por su parte, Stanaway *et al*. (2018), tomando como referencia los eventos históricos de temperatura extrema ocurridos en Pakistán, definen una onda de calor únicamente a partir de las temperaturas máximas que sobrepasan los P90, P95 y P99.

Se sabe que las ondas de calor pueden provocar daños a la salud principalmente en adultos mayores, niños, trabajadores al aire libre y habitantes de zonas urbanas (Henderson *et al*., 2021; Martinez-Austria & Bandala, 2017; Robine *et al*., 2007; Sharma *et al*., 2022). De forma indirecta, los sectores productivos y de servicios también se ven afectados dadas las altas temperaturas que alteran su actividad cotidiana (Herrera-Alanís, 2012; Mechler *et al*., 2010; Sharma *et al*., 2022). Dependiendo de las condiciones de sequía y el tipo de cobertura en la superficie, las ondas de calor estimulan la generación de incendios afectando los ecosistemas y la salud humana, asociado a la fuerte emisión de partículas contaminantes en el ambiente (Shaposhnikov *et al*., 2014). Una buena parte de la literatura revela que las ondas de calor extremas, como la ocurrida en Europa durante el verano de 2003, afectan de forma negativa la calidad del aire, la infraestructura, los suministros de energía y el bienestar de las personas, causando, a su vez, un aumento considerable en la mortalidad (Bicknell *et al*., 2012; Hintz *et al*., 2018; Karimi *et al*., 2020): alrededor de 40,000 personas fallecieron en Europa a causa de los impactos producidos por la intensa y prolongada onda de calor de 2003 (García-Herrera *et al*., 2010).

El estudio de la ocurrencia y afectaciones por ondas de calor en México es un tema medianamente abordado en la literatura, algunos estudios se han enfocado en el análisis del fenómeno (Herrera-Alanís, 2012), la tendencia de la frecuencia, intensidad y duración de los eventos (Espinoza-Tamarindo, 2013; Jano-Pérez, 2020; Jáuregui, 2009; Martínez-Austria & Bandala, 2016; Martínez-Austria. P.F. & Bandala, 2018), el impacto en la salud humana y la relación con el cambio climático (Martínez-Austria. P.F. & Bandala, 2018). Un buen porcentaje de estas investigaciones se ha limitado al estudio de las variaciones y la tendencia de las ondas de calor en el norte y noroeste de México (Espinoza-Tamarindo, 2013; Jano-Pérez, 2020; Martínez-Austria & Bandala, 2016). Sólo algunas han abordado la ocurrencia de estos eventos en ciudades con alta densidad poblacional (Jáuregui, 2009) o en ciudades caracterizadas por las altas temperaturas durante gran parte del año, tal y como ocurre en la ciudad de Mexicali (Martínez-Austria & Bandala, 2016). Sin embargo, ninguna de estas investigaciones realizó un análisis completo del fenómeno en el que se describan las condiciones atmosféricas relacionadas al origen, desarrollo y evolución de una onda de calor, su media histórica, probabilidad de ocurrencia y sus afectaciones.

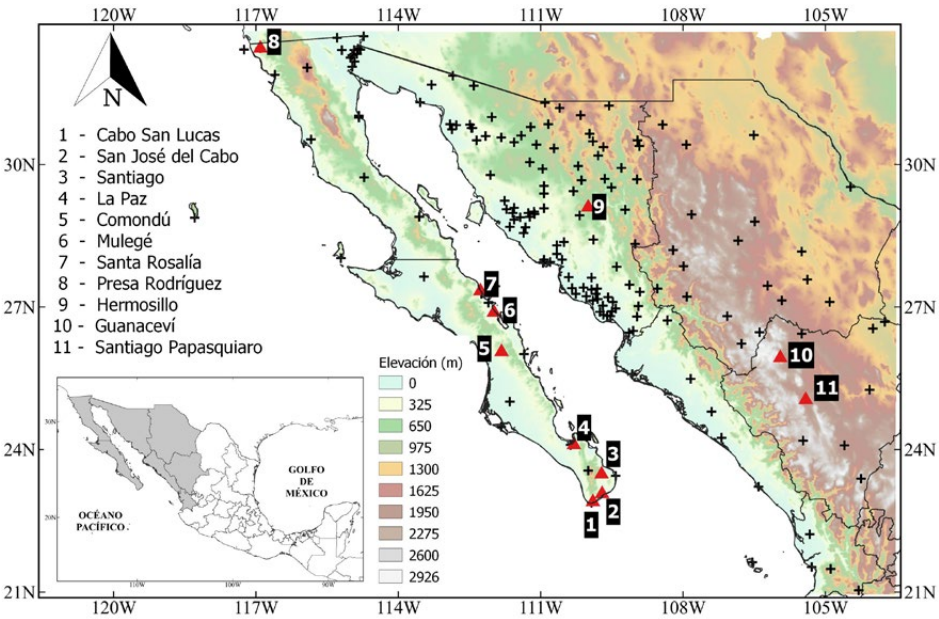
Entre el 3 y 5 de junio de 2016 se presentaron temperaturas atípicas en gran parte del noroeste de México. Nuestro análisis revela que las temperaturas inusualmente cálidas fueron resultado de una onda de calor extrema. Por tratarse de un tema que involucra el bienestar y la salud de las personas, además de las afectaciones al medio ambiente, en el presente capítulo describimos el ciclo de vida de esta onda de calor, comenzando con su evolución espaciotemporal a partir de observaciones horarias de temperatura en varios sitios del noroeste de México (Figura 1). También analizamos los patrones sinópticos y los perfiles verticales de la atmósfera antes, durante y después del evento, definiendo así las condiciones de la atmósfera características de una onda de calor extrema. Como parte del análisis, abordamos la relación entre la onda de calor y el aumento en el número de incendios, al igual que el daño a los ecosistemas. Mostramos el impacto que esta onda de calor tuvo en los diferentes sectores productivos y de servicios, así como su efecto en la salud humana (e.g., golpes de calor, insolación, deshidratación). Para ahondar en la descripción, calculamos la probabilidad de ocurrencia de al menos una onda de calor de duración igual o mayor a dos días, para diferentes intervalos de tiempo determinados y

para cada sitio de observaciones utilizando los registros de temperatura máxima diaria provenientes de estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas. Los impactos asociados a esta onda de calor no han sido documentados previamente por los medios oficiales en materia de desastres naturales y su asociación con la onda de calor está basada en función de los cambios o alteraciones en la salud pública, medio ambiente, actividades productivas (agricultura, ganadería, etc.) y de servicios (energía eléctrica, transporte, otro tipo de infraestructura) registrados tanto en fuentes públicas de cada una de las instituciones correspondientes como en algunas notas periodísticas. Análisis como el del presente capítulo establecen las bases para futuros estudios en materia de ondas de calor extremas, prevención del desastre y reducción del riesgo, así como para establecer sistemas de alerta temprana.

Para este capítulo, hemos definido una onda de calor como un evento en el que la temperatura máxima observada rebasa los P90, P95 y P99 (Stanaway *et al.*, 2018) de la climatología diaria de temperaturas máximas. La climatología y los percentiles calculados serán relativos a los sitios con observaciones diarias (Figura 1, triángulos rojos) seleccionados en el noroeste de México. Más adelante se definirán los criterios de selección de estos sitios de observación.

Descripción del área de estudio

El noroeste de México (20–33°N, 102–117°W) está compuesto por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Durango y Chihuahua. Se caracteriza por tener una diversidad de ecosistemas, grandes extensiones de tierra de cultivo, zonas ganaderas y desarrollos agropecuarios, así como también por su elevado crecimiento demográfico y turístico en varias de las ciudades de la región, como Hermosillo en Sonora (SON), La Paz, Cabo San Lucas y San José del Cabo en Baja California Sur (BCS). Dada su posición geográfica, esta región del país abarca climas semicálidos a muy cálidos dominados por ambientes semi-áridos a muy áridos (García-Amaro, 2004) como los desiertos de Chihuahua y Sonora, dos de los más importantes y de gran biodiversidad según la clasificación de Bradley & Colodner (2020). En esta región, entre el 3 y el 5 de junio de 2016, tuvo lugar una onda de calor extrema cuando la temperatura aumentó de forma atípica, superando todos los registros de temperaturas máximas en un amplio territorio que abarcó los estados de Sonora y Baja California en México, así como California y Arizona en Estados Unidos.



► **Figura 1.** Zona de estudio y localización de las estaciones con observaciones de temperatura cada hora (cruces negras) y temperatura máxima diaria (triángulos rojos) utilizadas en el análisis del ciclo de la onda de calor extrema ocurrida el 4 de junio de 2016 en el noroeste de México (sombreado gris figura interior). En color se muestra la topografía de la región en función de las elevaciones del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

Hermosillo, Sonora, 4 de junio de 2016, una onda de calor para la historia.

Bases metodológicas

La intensidad y ciclo de vida de la onda de calor se calculó a partir de los datos horarios de temperaturas máximas. Los datos horarios utilizados se obtuvieron de los catálogos de estaciones meteorológicas automáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS) del sito Misión del Sol (Tabla 1). El cálculo de anomalías horarias se realizó mediante la diferencia de la temperatura máxima horaria en cada sitio de observación menos su correspondiente media histórica horaria. La media histórica se estimó identificando primero las temperaturas máximas horarias para cada hora de cada día de cada año de la serie histórica de cada estación. Posteriormente, se obtuvo el promedio de todos los años para cada valor de temperatura máxima de cada hora y cada día hasta completar el ciclo anual de 8760 promedios horarios. Estos valores representan la media histórica de la temperatura máxima correspondiente a la hora hh:00 del día xxx para cada uno de los 365 días del año. Con hh variando de 00 a 23 horas y xxx de 1 a 365 días. Es importante mencionar que esta media histórica horaria no corresponde con la climatología de temperaturas máximas diarias, comúnmente usada en la literatura, donde la variación de las temperaturas máximas en horas de sol se limita al máximo ocurrido cada día. Por simplicidad en el cálculo, los años bisiestos fueron descartados, excluyendo los días 29 de febrero de las series de tiempo.

Tabla 1. Información de la temperatura máxima observada (Tmáx, °C) y su anomalía correspondiente para ocho estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas con el criterio de anomalía mayor a 8 °C (ver Figura 2).

Latitud	Longitud	Tmáx	Anomalía	Años*	Nombre	Fuente
28.9	-113.56	43.4	12.9	18	Bahía Ángeles	SMN
28.56	-111.36	47.8	9.8	9	Cuichi, Hermosillo	REMAS
28.69	-111.65	45.6	9.3	9	Kino, Hermosillo	REMAS
26.81	-109.53	46.1	9.1	9	La Regla, Huatabampo	REMAS
31.87	-112.85	45.5	9.1	9	Sonoyta	SMN
29.06	-111.72	48.0	9	10	Dolores, Hermosillo	REMAS
28.00	-110.93	43.1	8.7	9	Buenos Aires, Guaymas	REMAS
29.12	-110.96	49.4	8.2	5	Misión del Sol, Hermosillo	Particular

** = Años de observaciones para el cálculo de la media histórica*
Fuente: SMN, REMAS. Elaboración Propia.

Para identificar el carácter regional de esta onda de calor, utilizamos el P90 como el umbral de temperatura extrema base que define la ocurrencia de una onda de calor relativa a cada sitio de observación. A manera histórica, el P99 determinará aquellos sitios donde se hayan superado los récords históricos de temperatura asociados a esta onda de calor. Los datos utilizados para este análisis fueron los datos diarios de temperatura máxima obtenidos del catálogo de estaciones climatológicas del SMN (Figura 1, triángulos rojos). Dimos preferencia a aquellas estaciones donde la longitud de la serie fuera mayor a 65 años, a fin de contar con una muestra más representativa que incluyera los valores históricos extremos y los valores de temperatura durante la onda de calor del 4 de junio de 2016. El cálculo de los P90 y P99 se realizó mediante la estadística de la temperatura máxima diaria en todo el periodo de registro de cada sitio de observación seleccionado (Figura 1, triángulos rojos). En la Tabla 2 se sintetizan las temperaturas máximas observadas durante la onda de ca-

lor en cada una de las estaciones seleccionadas, el día en que ocurrió la temperatura máxima, la duración en días de la onda de calor, así como el periodo de cobertura de los datos y los P90 y P99 de la temperatura máxima. A continuación se describen las peculiaridades, el carácter histórico y regional del evento.

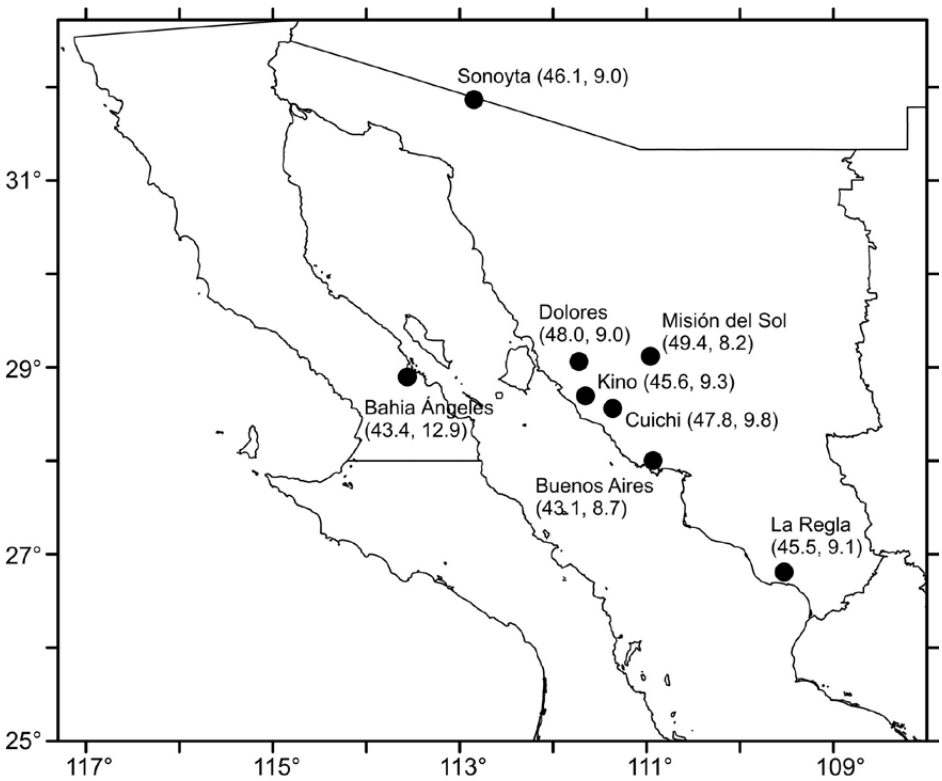
Tabla 2. Valores de la temperatura máxima alcanzada (Tmáx) durante la onda de calor ocurrida entre el 3 y el 5 de junio de 2016. El sombreado obscuro resalta aquellos valores que rebasan el percentil 99 (P99), en sombreado claro los que sólo rebasaron el percentil 90 (P90) y sin sombreado aquellos que no lo rebasaron.

Nombre	Clave	Periodo	Tmáx (°C)	Día	Duración (días)	P90 (°C)
Hermosillo (DGE)	26139	1965-2017	48.5	4	2	44.0
Presa Rodríguez	2038	1929-2018	33.0	3	-	37.8
Santiago Papasquiaro (SMN)	10100	1923-2017	35.0	4	-	36.1
Guanaceví	10029	1923-2018	31.0	4	-	33.0
Santiago	3062	1951-2017	42.0	5	2	40.6
Santa Rosalía	3061	1929-2017	38.0	4	-	39.0
San José del Cabo	3056	1933-2017	44.0	4	2	38.0
Mulegé	3038	1922-2017	43.0	4	2	40.0
Comondú	3008	1936-2017	43.0	6	1	41.0
La Paz	3074	1950-2017	42.2	4	1	41.1
Cabo San Lucas	3005	1951-2017	41.0	4	1	38.0

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Elaboración propia.

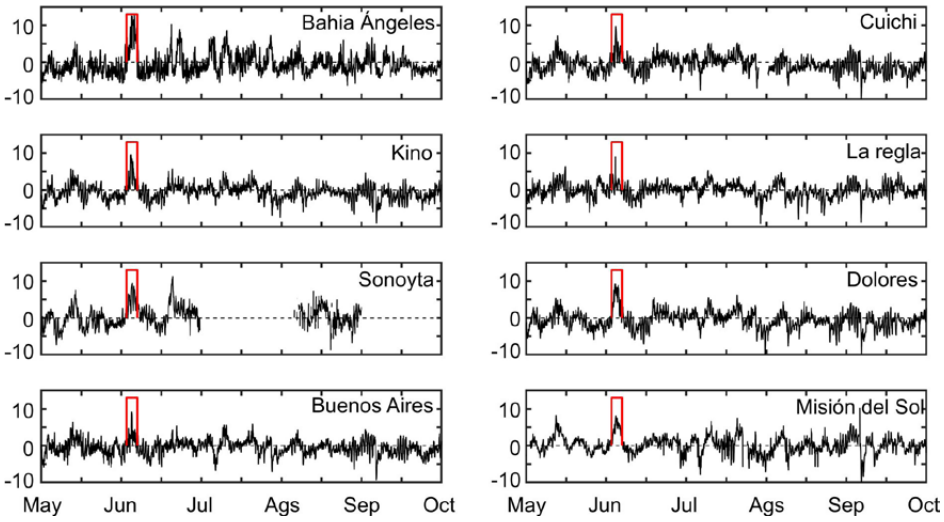
Descripción del evento

La onda de calor que azotó al noroeste de México y la zona fronteriza entre México y Estados Unidos entre el 3 y 5 de junio de 2016 tuvo condiciones atípicas, tanto por su intensidad como por su cobertura. Debido a las consecuencias negativas que generó sobre las actividades agropecuarias, acuícolas y pesqueras se declaró desastre natural para estos sectores en el noroeste de Sonora (DOF, 2016a). Su mayor intensidad tuvo lugar el día 4 de junio en la parte occidental de Sonora, donde se observaron las mayores temperaturas, con máximos que superaron los 45°C y donde las anomalías horarias correspondientes para esta fecha del año fueron superiores a 8°C (Figura 2). Lo sorpresivo de este suceso fue que el incremento de temperatura ocurrió en unas cuantas horas, entre las 3 y 10 de la noche, hora local, causado por un anticiclón a 500 hPa (~6 km) posicionado sobre el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos (ver más abajo), el cual se desplazó, el día 1 de junio, desde el Pacífico nororiental hacia el continente hasta alcanzar su mayor cobertura el día 4 de junio. Una selección de estaciones meteorológicas automáticas (Figura 2) con observaciones históricas en la región (Tabla 1) muestra consistencia en las mayores anomalías (entre 8.2 y 12.9 °C) dentro de la serie de tiempo (Figura 3), indicando que la onda de calor afectó un amplio territorio del occidente de Sonora y que la magnitud de la anomalía de este evento superó a las anomalías restantes del verano de 2016, con excepción de la estación Sonoyta en donde, a principios de julio de 2016, se observó una anomalía superior a la del 4 de junio, aunque más localizada, ya que aparece mucho más reducida en el resto de las series.



► **Figura 2.** Posición de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas por la magnitud de la anomalía observada. Entre paréntesis se muestra la temperatura máxima horaria y su anomalía correspondiente (°C) durante la onda de calor del 4 de junio de 2016. Cada anomalía resulta del análisis de anomalías horarias para cada día del año descrito en la sección (a).

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 3.** Series horarias de anomalías de temperaturas máximas (°C) en las ocho estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas (Figura 2, Tabla 1), en el periodo de mayo y octubre de 2016. En rojo se resaltan las anomalías de la onda de calor del 4 de junio, las cuales superan en duración y magnitud al resto de las anomalías en el periodo de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

Carácter histórico y regional del evento

Las temperaturas extremas asociadas a esta onda de calor tuvieron su máxima intensidad en el transcurso del 4 de junio de 2016 en varios sitios del noroeste de México. Según las observaciones horarias, sitios al norte y centro de Sonora presentaron las temperaturas más altas de la región (Figuras 4 y 5) durante las horas de la tarde y hacia la noche del día 4 de junio. A partir de los datos diarios de temperatura máxima, las estaciones Hermosillo (Sonora), San José del Cabo, Mulegé y Cabo San Lucas (BCS) registraron sus valores históricos de temperatura máxima, superando el umbral definido por el P99 (Tabla 2) y superando las normales climatológicas (1991-2020) de

la temperatura máxima promedio mensual para el mes de junio documentadas por el Servicio Meteorológico Nacional (Hermosillo–41.4, San José del Cabo–38.7, Mulegé–38.4 y Cabo San Lucas–36.3 °C). Las estaciones de San José del Cabo y Hermosillo marcaron su récord histórico, sin precedente, de temperatura máxima al alcanzar los 44 y 48.5 °C, respectivamente.

En la Tabla 3 observamos que las temperaturas mínimas diarias registradas durante este episodio también rebasaron significativamente su P90 de temperatura mínima diaria en la mayoría de los sitios de observación. Sobresalen Hermosillo, Santa Rosalía y San José del Cabo al registrar temperaturas mínimas cercanas o mayores a los 30 °C. La ocurrencia de estas altas temperaturas durante las primeras horas del día, en la mayoría de los sitios de observación, antecedió al máximo de temperaturas extremas de la onda de calor.

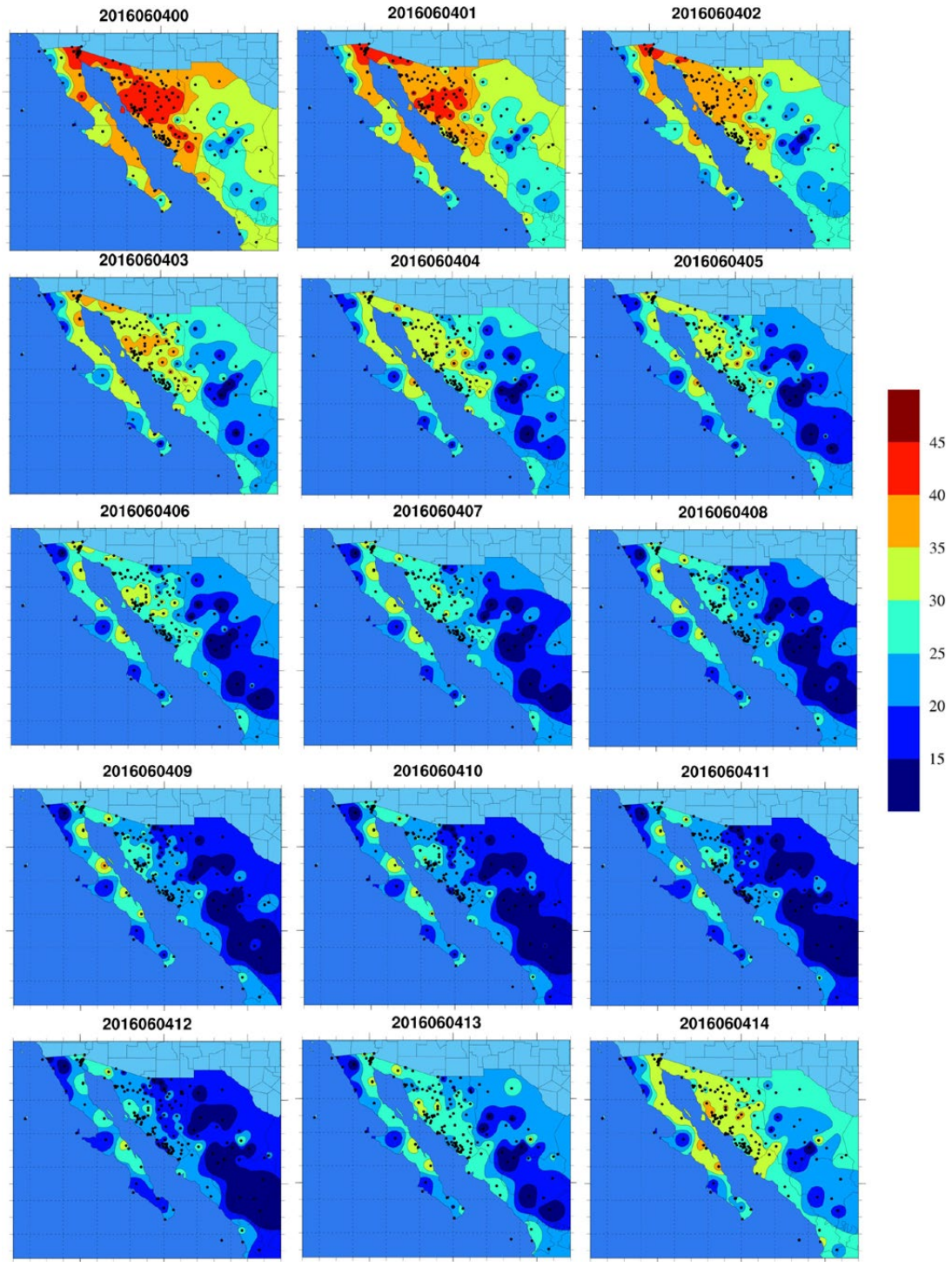
Tabla 3. Valores máximos de temperatura mínima (°C) registrada durante la onda de calor y el correspondiente percentil 90 (°C) de temperatura mínima.

Nombre	Tmín	P90
Hermosillo (DGE)	29.0	21.5
Presa Rodríguez	16.0	13.5
Santiago Papasquiaro (SMN)	11.0	12.0
Guanaceví	5.0	10.0
Santiago	18.5	20.5
Santa Rosalía	29.0	23.0
San José del Cabo	31.0	26.0
Mulegé	26.0	21.5
Comondú	19.0	18.0
La Paz	23.8	19.9
Cabo San Lucas	22.0	21.0

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. Elaboración propia.

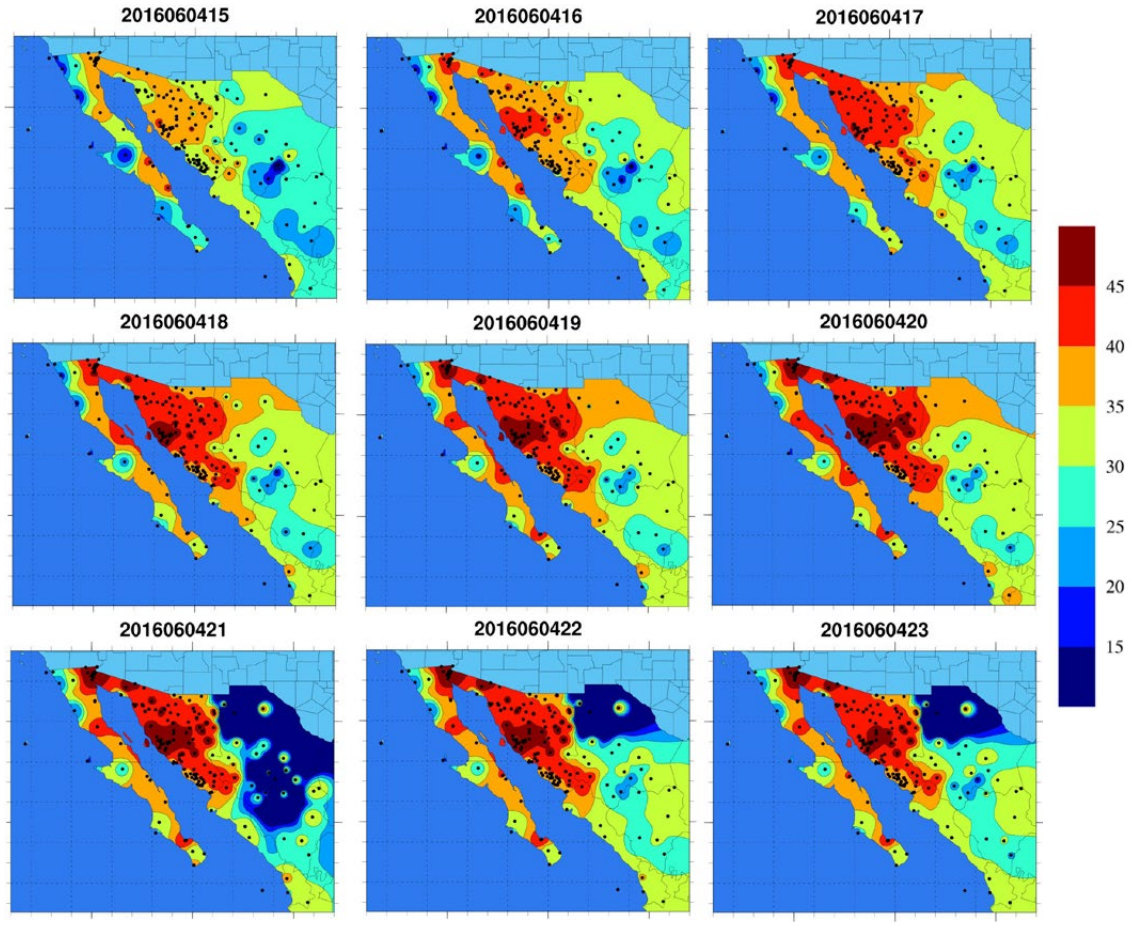
En la Figura 4 se muestra el desarrollo de la onda de calor desde la hora 00:00 hasta la hora 14:00 (UTC) del 4 de junio de 2016, es decir, la tarde anterior y el amanecer del 4 de junio en la hora local. En esta figura se observa que el norte y centro de Sonora ya presentaban temperaturas mayores a los 40 °C horas previas al máximo de la onda de calor. En la hora local, las zonas centro y norte de Sonora amanecieron el 4 de junio con temperaturas alrededor de los 25 °C (Figura 4, 2016-06-04_11:00–12:00 UTC). Se puede observar que en las primeras horas de la mañana del 4 de junio, en la hora local, gran parte de la región de estudio comenzaba a registrar temperaturas por arriba de los 30 °C, en algunos sitios la temperatura alcanzó más de 35 °C (Figura 4, 2016-06-04_13:00–14:00 UTC).

La Figura 5 es una continuación de la evolución horaria de la temperatura durante el desarrollo de esta onda de calor. Regionalmente, las temperaturas extremas registradas en varios sitios de observación alcanzaron su máximo hacia las 20:00 horas UTC del 4 de junio. Tal y como se muestra en la Figura 2, el centro y norte de Sonora tienen la distribución de temperaturas más altas durante el pico de la onda de calor, la extensión de estas temperaturas extremas es amplia y al parecer cubre algunos puntos del centro y sur de la península de Baja California (Tablas 2 y 3). Desafortunadamente, son insuficientes los registros de las estaciones meteorológicas automáticas en el sur de la península para estimar la anomalía del 4 de junio (ver Tabla 1 y Figura 1).



► **Figura 4.** Evolución de la temperatura del aire (°C) cada hora durante las primeras 15 horas (UTC) del 4 de junio de 2016. Los puntos negros representan los sitios de las estaciones meteorológicas del SMN y la REMAS utilizadas para el análisis horario.

Fuente: Elaboración propia.



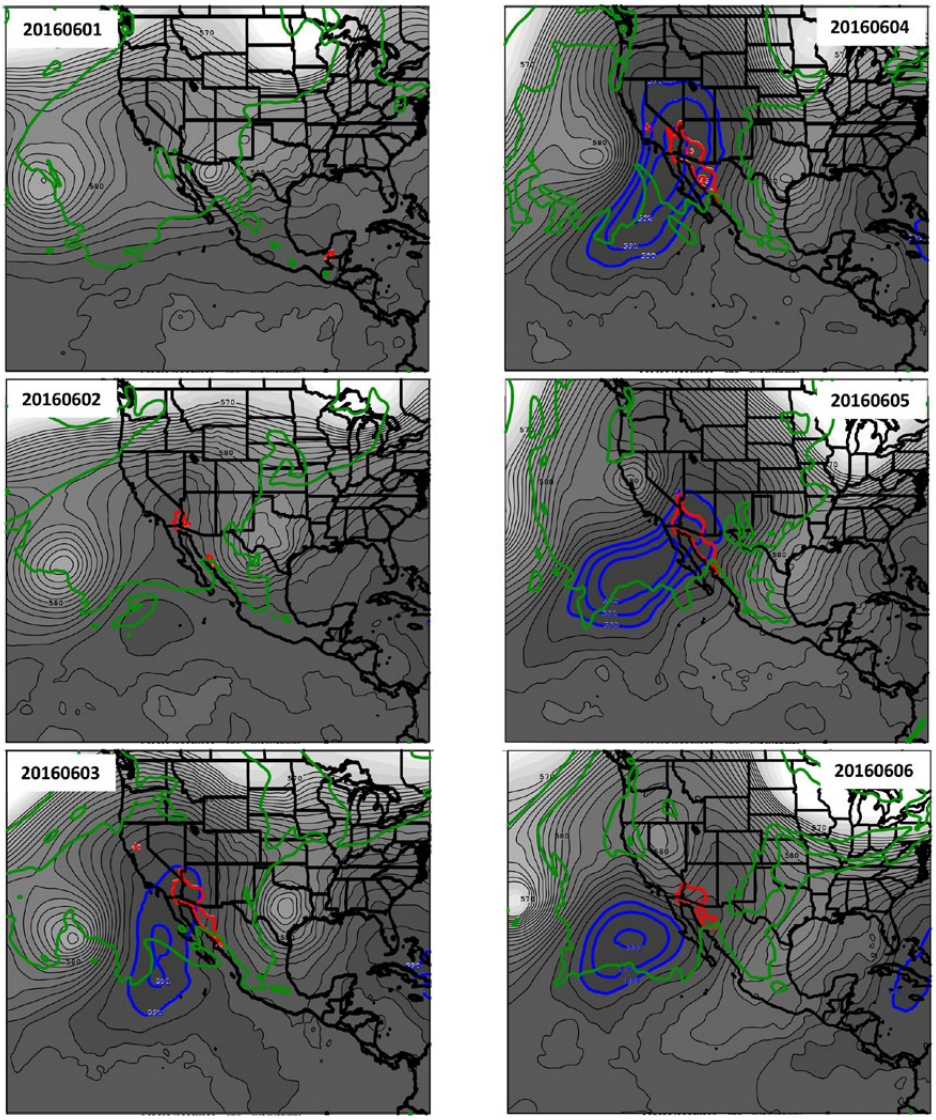
► **Figura 5.** Evolución de la temperatura del aire (°C) previo al máximo de la onda de calor ocurrido a las 20:00 UTC del 4 de junio de 2016. Los puntos negros representan los sitios de las estaciones meteorológicas del SMN y la REMAS utilizadas para esta representación.

Fuente: Elaboración propia.

Condiciones sinópticas durante el desarrollo y evolución de la onda de calor

Para documentar la estructura de la atmósfera durante el desarrollo de la onda de calor, se utilizaron variables de reanálisis global ERA5 durante el periodo 1-6 de junio de 2016. Una de estas variables es la altura geopotencial a 500 hPa, localizada a alrededor de 6 kilómetros sobre el nivel del mar, para determinar la presencia de regiones con flujo anticiclónico que son favorables para el desarrollo de zonas de aire que se calientan por compresión atmosférica.

La Figura 6 muestra un resumen gráfico en el que contornos mayores a 590 dm se usan para identificar la región anticiclónica, así como las de temperatura del aire más alta. Esto último en la superficie, a 2 metros sobre el nivel del terreno o mar, mediante contornos de 40 y 45°C que son evidentes a partir del día 3, con la mayor cobertura espacial e intensidad el día 4 sobre Sonora y el extremo noreste de Baja California en México, así como partes del estado de Arizona y California en Estados Unidos. También se encontró consistencia al revisar la distribución de humedad relativa y agua precipitable, que en ambos casos alcanzan valores relativamente bajos, consistentes con la presencia de aire seco y extremadamente cálido. Para simplificar este trabajo no se muestran las figuras correspondientes.

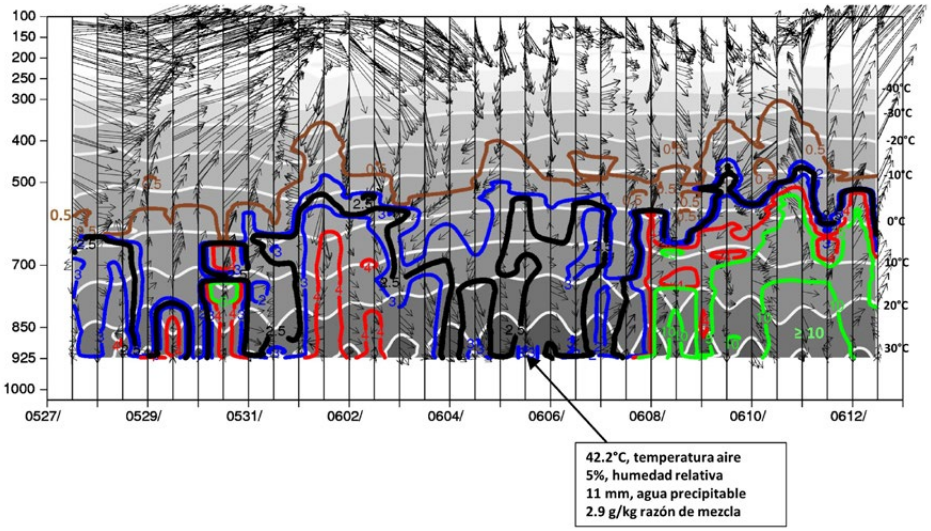


► **Figura 6.** Altura geopotencial (500 hPa, líneas negras) y temperatura del aire a 2 metros (40, 45 °C, líneas rojas) a las 21 UTC del 1-6 de junio, 2016. Las líneas azules muestran alturas > 590 dm, cada 10 dm. Las líneas verdes simbolizan el agua precipitable (20 mm).

Fuente: Elaboración propia.

Evolución de la onda de calor vista desde los radiosondeos

Una fuente directa de datos disponibles son los radiosondeos que indican la estructura vertical de temperatura, humedad y viento desde la superficie hasta más de 15 kilómetros de altura. Se revisaron los radiosondeos existentes en la zona de estudio: Chihuahua, Mazatlán, La Paz, Guadalajara, Zacatecas, en México; y Tucson, Arizona, en Estados Unidos, siendo este último sitio el único donde se identificó mejor el fenómeno al contar con radiosondeos lanzados mañana y tarde. De los radiosondeos en Tucson se construyó una serie de tiempo de 17 días alrededor de la intensidad máxima del evento. La Figura 7 muestra que, para los niveles menores a 500 hPa, la temperatura del aire se incrementó gradualmente a partir del 2 de junio. Se alcanzó una intensidad máxima el día 5 con temperatura de 42.2°C en el nivel más bajo, humedad relativa de 6% y agua precipitable de 11 mm, que corresponden a condiciones extremadamente cálidas y secas. Se construyó una serie de tiempo similar para La Paz, BCS, y se compararon con los valores del periodo de datos históricos disponibles desde que la estación inició operaciones en julio de 1991. Para el 3 de junio, se encontró que a 500 hPa la observación de altura geopotencial (602 dm) y temperatura (–0.3°C) registró valores extremos que no se habían presentado en otros periodos.

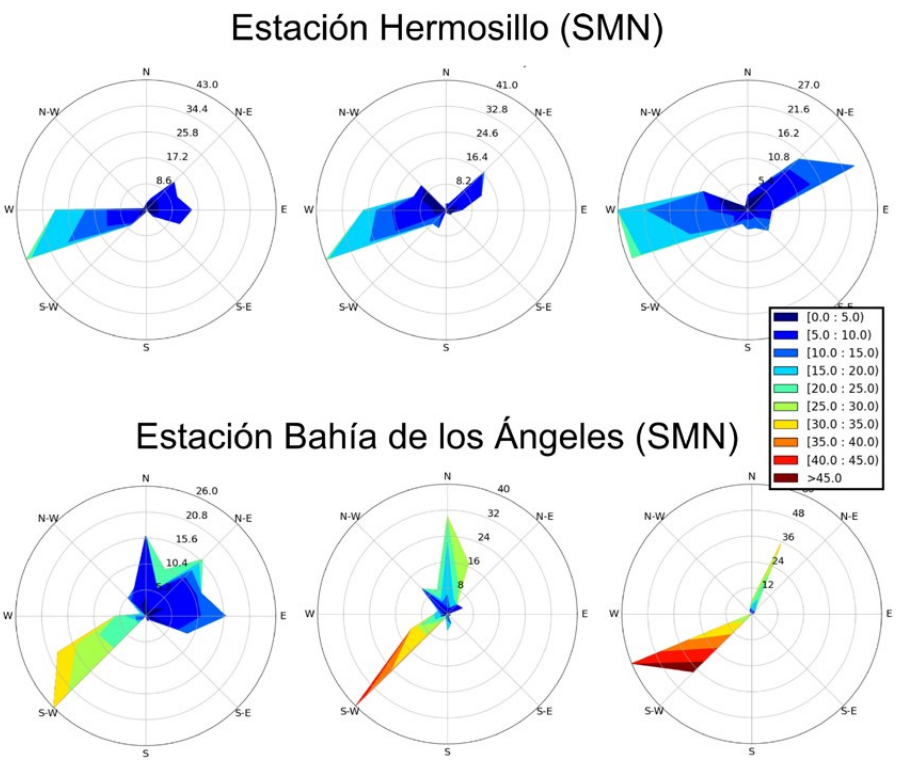


► **Figura 7.** Radiosondeos en Tucson, Arizona: 27 de mayo–12 de junio, 2016. Se despliegan el viento (vectores), la temperatura (°C, contornos blancos) y razón de mezcla de humedad (g/kg, contornos verdes) del aire. Los colores representan contornos seleccionados de razón de mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

Patrones predominantes del viento durante la onda de calor

Durante el transcurso del 4 de junio de 2016 el patrón dominante de los vientos, en dos de los puntos cercanos al máximo de intensidad de la onda de calor, muestra un aporte importante de los vientos provenientes del oeste y suroeste en la estación de Hermosillo (SON) y Bahía de los Ángeles (BC), respectivamente. Las intensidades máximas, registradas en la estación Bahía de los Ángeles ubicada en la zona rural homónima, corresponden con la configuración sinóptica de la atmósfera media durante el episodio de onda de calor (Figura 8, líneas geopotenciales en azul), la cual muestra valores de alta presión sobre la región noroeste de México que permiten la circulación de aire caliente sobre la superficie, promoviendo la entrada de viento cálido del golfo de California hacia la zona continental de Sonora, aumentando en pocos días la temperatura del aire hacia sus valores extremos.



► **Figura 8.** Patrón dominante de los vientos registrados en dos estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas en la zona de intensidad máxima de la onda de calor del 4 de junio de 2016. La escala de colores representa la velocidad del viento en km/h. De acuerdo con la convención de los vientos W representa en Español el oeste.

Fuente: Elaboración propia.

Impactos de la onda de calor en la región

Efectos económicos: gasto energético, infraestructura, actividad turística

Los registros de gasto energético del *Anexo Estadístico del Informe de Gobierno 2010-2019* de la Secretaría de Energía (publicación de la Secretaría de Energía del gobierno de México) muestran que, en el periodo de mayo a junio de 2016 (Tabla 4), la entidad con el mayor registro de consumo de energía eléctrica fue Sonora, seguido por Baja California. La diferencia de Gigawatts-hora consumidos en Sonora para el periodo mayo a junio de 2015, 2016 y 2017 tuvo su mayor registro en 2016, lo mismo para Baja California. De mayo a junio de 2017, la diferencia de Gigawatts-hora consumidos en Sonora mostró un descenso con respecto a lo registrado en 2016, algo fuera de lo esperado, ya que por lo general se prevé un aumento anual del consumo energético. La generación de energía eléctrica por centrales solares no indicó un claro aumento entre el periodo 2015-2016.

De acuerdo con el *Reporte Anual del Mercado Eléctrico Mayorista* (2016) en las semanas posteriores al máximo de la onda de calor del 4 de junio, entre el 23 y 24 de junio de 2016 se registró el Precio Marginal Local (PML) máximo del mes, para todas las horas en los nodos localizados en el norte del país, con un valor de $6,855.00 por MW/h, explicado por valores en el componente de congestión superiores a los $4,121,03.00 por MWh. Según estos reportes los factores que influyeron en este valor máximo fueron el incremento de la demanda por estacionalidad y clima.

Del 3 al 30 de junio de 2016, dadas las altas demandas y al ser insuficiente la generación disponible en el ámbito de la Gerencia de Control de Baja California, se realizaron importaciones de energía por confiabilidad y se transfirió carga a la empresa Arizona Public Service Company en asistencia a la emergencia. La energía por importaciones de confiabilidad fue de 45,774 MWh y por asistencia de emergencia fue de 2,835 MWh de acuerdo con el *Informe Anual de Autoevaluación de la Gestión Primer Semestre* (2016).

Tabla 4. Variaciones en el consumo energético de los estados del noroeste de México entre mayo y junio de 2015 a 2017.

Entidad	may-15	jun-15	Diferencia Gigawatts-hora	may-16	jun-16	Diferencia Gigawatts-hora	may-17	jun-17	Diferencia Gigawatts-hora
Baja California	746.077	802.512	56.435	767.3	929.026	161.726	816.538	917.802	101.264
Baja California Sur	165.794	171.688	5.894	175.817	188.541	12.724	178.739	185.223	6.484
Chihuahua	1,060.19	1,247.51	187.311	1,206.96	1,291.84	84.881	1,228.31	1,320.07	91.763
Durango	236.594	266.659	30.065	313.433	274.352	-39.081	303.879	309.497	5.618
Nayarit	125.251	136.041	10.79	130.977	142.145	11.168	126.727	135.67	8.943
Sonora	743.264	862.935	119.671	738.344	932.262	193.918	797.115	948.54	151.425

Fuente: *Anexo Estadístico del Informe de Gobierno 2010-2019* de la Secretaría de Energía.

Efectos en la salud humana

Según la información registrada por el Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Daños a la Salud por Temperaturas Naturales Extremas (SINAVE *et al.*, 2016), para la semana epidemiológica número 22 (30 mayo 2016 – 5 junio 2016) aumentaron en dos los casos de agotamiento por calor en el estado de Sonora, sumando 14 casos de agotamiento por calor relacionados con la temporada de calor 2016. Para ese estado, la

Unidad Estatal de Protección Civil (UEPC) recomendó a la Secretaría de Educación y Cultura (SEC) modificar el horario escolar ante la alerta meteorológica por ambiente extremadamente caluroso (*Escobar, A.*, 2016). En esta recomendación se establece adelantar (desde el día viernes 3 de junio al lunes 6) la salida de clases una hora en el turno matutino y retrasar la entrada una hora en el vespertino para las 4,693 escuelas de preescolar, primaria y secundaria (públicas y particulares) que brindan el servicio educativo en toda la entidad.

Incendios

Según los informes emitidos por la Gerencia de Manejo del Fuego de la Comisión Nacional Forestal, para el estado de Sonora en el año 2016 se registró el mayor número de incendios forestales dentro del periodo 2010–2022. Ese mismo año se registró un descenso en el aprovechamiento forestal de Sonora, con una pérdida aproximada de 30,000 hectáreas respecto al 2015 (DGFFS, 2018). Estos cambios podrían estar ligados a las condiciones de humedad, el nivel de sequía, el uso de suelo y las condiciones de temperatura en la superficie. Por lo tanto, un evento de onda de calor de gran intensidad como el ocurrido en junio de 2016 pudo haber detonado un mayor número de incendios en un tiempo breve posterior a su ocurrencia, tal y como ocurrió en el mes de junio de 2021 en Oregon y Washington en los Estados Unidos (Overland, 2021). Según aseguran Shaposhnikov *et al.* (2014), los incendios posteriores a la ocurrencia de eventos de onda de calor tienen repercusiones en la salud de la población/personas, debido a las partículas contaminantes emitidas a la atmósfera.

Probabilidad de ocurrencia de una onda de calor en la región

Considerando los impactos de una onda de calor, como la ocurrida el 4 de junio de 2016, es útil conocer la probabilidad de ocurrencia de una onda de calor de temperaturas y duración similares con base en los datos históricos para diferentes sitios del noroeste de México. Como parte del análisis realizado, se calcularon las probabilidades de ocurrencia para distintos intervalos de tiempo por medio de un proceso puntual de Poisson Homogéneo (Cox & Lewis, 1966), el cual es un caso particular de los procesos estocásticos.

Un proceso puntual de Poisson $\{N(t) : t \geq 0\}$ se define como un tipo de proceso estocástico de conteo de ocurrencias de un tipo de evento particular en un intervalo de tiempo dado, en nuestro caso, la ocurrencia de una onda de calor. Un proceso de Poisson tiene el conjunto discreto $\{0, 1, 2, \ldots, n\}$ como espacio de estados. Por lo tanto, las ocurrencias de los eventos están definidas en el conjunto de los números naturales. Este proceso adquiere su nombre a partir del siguiente resultado:

Para cualquier $t \geq 0$ y $n = 0, 1, \ldots$

$$P\,(N\,(t) = n) = e^{-\theta t}\frac{(\theta t)^n}{n!} \quad \textbf{(1)}$$

Es decir, la variable $N(t)$ tiene una distribución de Poisson (θt).

Aunque la ecuación (1), llamada función de densidad proporciona una medida de la probabilidad de que un evento ocurra exactamente n veces en un intervalo de tiempo t, nosotros hemos decidido evaluar la probabilidad de que al menos un evento ocurra en un intervalo de tiempo determinado, es decir, la probabilidad complementaria a la probabilidad de ocurrencia de cero eventos ($n > 0$ *en* t) a partir de la función de sobrevivencia definida como:

$$S(t) = 1 - e^{-\theta t} \quad \textbf{(2)}$$

Donde t es el intervalo de tiempo y θ el parámetro de la distribución Poisson. La ecuación (2) resulta más útil en términos de peligro y riesgo.

En la Tabla 5 se muestran los resultados para la probabilidad de ocurrencia de que al menos una onda de calor de duración de dos o más días y definida por los P90 y P95 ocurra en los próximos 1, 3, 5, 10 y 20 años, proporcionando una componente cuantitativa de la evaluación del riesgo asociado a las ondas de calor en la región. La estimación fue obtenida desde la base de datos de los eventos de onda de calor registrados en cada uno de los sitios de observación histórica seleccionados.

Tabla 5. Probabilidad de que al menos una onda de calor (umbrales P90, P95) con duración mayor o igual a dos días ocurra en un intervalo de T (años) para diferentes puntos en el noroeste de México. En gris se resaltan aquellas probabilidades mayores al 90%.

Percentil	90					95				
T (años)	1	3	5	10	20	1	3	5	10	20
Hermosillo (DGE)	0.237	0.556	0.742	0.933	0.996	0.099	0.268	0.406	0.647	0.875
La Paz	0.291	0.643	0.820	0.968	0.999	0.151	0.389	0.560	0.806	0.963
Presa Rodríguez	0.338	0.709	0.872	0.984	1.000	0.172	0.431	0.610	0.848	0.977
Santa Rosalía	0.211	0.509	0.694	0.907	0.991	0.070	0.195	0.303	0.514	0.764
Cabo San Lucas	0.154	0.393	0.565	0.811	0.964	0.087	0.239	0.365	0.597	0.838
Guanaceví	0.203	0.494	0.678	0.896	0.989	0.116	0.310	0.461	0.710	0.916
Santiago Papasquiaro (SMN)	0.338	0.710	0.873	0.984	1.000	0.169	0.427	0.605	0.844	0.976
Comondú	0.169	0.427	0.605	0.844	0.976	0.079	0.219	0.338	0.562	0.808
San José del Cabo	0.107	0.288	0.433	0.678	0.896	0.070	0.195	0.303	0.514	0.764
Mulegé	0.186	0.461	0.643	0.873	0.984	0.079	0.219	0.338	0.562	0.808
Santiago	0.178	0.444	0.623	0.859	0.980	0.089	0.243	0.371	0.605	0.844

Reflexiones finales

La onda de calor ocurrida entre el 3 y el 5 de junio de 2016, con su máximo el día 4 de junio, presentó valores máximos de temperatura por arriba de los 40 °C que rebasaron los rangos de temperatura dominantes para el mes de junio (ver Tablas 2 y 3). Cubrió gran parte del noroeste de México, con su mayor impacto reflejado en el occidente de Sonora (ver Figuras 2 y 5). Nuestro análisis muestra las distintas facetas del ciclo de vida de esta onda de calor: origen, evolución, intensidad, duración e impacto. Además de conocer las características sinópticas asociadas al inicio y desarrollo del evento, calculamos la probabilidad de ocurrencia de una onda de calor de magnitud y duración similares a la del evento atípico del 4 de junio de 2016: los P90 y P95 como umbrales de temperatura máxima y dos días de duración. En cien años es muy probable que al menos un evento de esta magnitud se repita simultáneamente en gran parte del noroeste de México. Anualmente, los episodios de onda de calor en la región son de corta duración (menores a dos días), sin embargo, la probabilidad de registrar ondas de calor con temperaturas extremas por al menos dos días aumenta hacia los 5 y 10 años (Tabla 5).

El desarrollo de la onda de calor del 4 de junio de 2016 cubrió un territorio amplio dominado por flujo anticiclónico en la columna atmosférica, desde la superficie hasta unos 6 km de altura (500 hPa). Estas condiciones son favorables para el desarrollo de zonas que se calientan por compresión atmosférica (Wallace & Hobss, 2006). El anticiclón, posicionado sobre el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos (Figura 6), fue desplazándose desde el Pacífico nororiental hacia el continente, desde el primero hasta el día cuatro de junio, cuando alcanzó su máximo de extensión. La onda mostró su máxima intensidad en el occidente de Sonora, donde se observó que la magnitud de la anomalía de temperatura superó a todas las demás del verano de 2016 (Figura 2).

A pesar de la búsqueda detallada en los acervos digitales de las fuentes oficiales de gobierno (CENAPRED, 2023), así como en las bases de datos de desastres (DESINVENTAR, 2023; EM-DAT, 2023), no logramos encontrar información acerca del daño a los ecosistemas por la onda de calor. Esto se debe, tal vez, a que no es sencillo discernir los impactos producidos por una onda de calor de manera inmediata, salvo los que se relacionan con los incendios forestales en zonas boscosas o las inundaciones repentinas en zonas con deshielos (White *et al*., 2023). De manera indirecta, el aumento en el número de incendios y la baja en el aprovechamiento forestal (ver subsección Incendios) sugieren que los ecosistemas se tuvieron que ver alterados también por el efecto de temperaturas altas, humedad baja (Figura 7) y los incendios.

Los análisis y dictámenes realizados por la Comisión Nacional del Agua, a través del Monitor de Sequía de México, muestran que en el estado de Sonora (al 31 de mayo de 2016) se registraba algún tipo de sequía en el 76% de sus municipios. Para el siguiente reporte quincenal (onda de calor), el 87% del estado contaba con alguna categoría de sequía. Para la última semana de junio, la cobertura de municipios con registro de sequía descendió a 72%. En este sentido, la coexistencia de ambos eventos, la onda de calor y la sequía, pudieron causar sinergia y acentuar los efectos negativos en los ecosistemas y las actividades productivas, ya que por lo general el origen de ambos fenómenos responde a anomalías similares en la circulación atmosférica (Feng *et al*., 2021).

Los registros son escasos en materia de salud pública, pero para el estado de Sonora el agotamiento por calor tuvo dos casos documentados (SINAVE *et al*., 2016). En materia de servicios, sólo el ramo energético se vio alterado por la onda de calor, Sonora fue el estado que mayor consumo de energía registró entre los meses de mayo y junio 2016 (Tabla 4). No obstante, si contáramos con más detalle, tal vez, podría notarse un incremento en la demanda energética del 4 de junio, dado el súbito aumento de las temperaturas a nivel histórico durante el transcurso del día; debido, por ejemplo, al uso de aire acondicionado y sistemas de enfriamiento domésticos y comerciales. A consecuencia de esta onda de calor y su extensa cobertura (Figuras 4–6), el gobierno mexicano emitió una declaratoria de desastre natural en el *Diario Oficial de la Federación* el día 15 de noviembre de 2016 para el sector agropecuario, acuícola y pesquero (*DOF*, 2016a).

Como parte de las acciones ante los efectos de las altas temperaturas y las condiciones de sequía en la región (*DOF*, 2016b), la Comisión Nacional del Agua exhortó a los usuarios de aguas nacionales de los municipios que presentaron alguna condición de sequía, conforme al reporte quincenal del Monitor de Sequía de México, a implementar las medidas preventivas y de mitigación contenidas en el "Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequía", mediante la reducción provisional de volúmenes a los usuarios de las cuencas que se encuentren en condición de sequía severa, extrema o excepcional, a fin de abastecer agua para uso doméstico y público urbano a las poblaciones afectadas. También, las autoridades de Protección Civil tomaron precauciones mediante un cambio de horario en la entrada y salida de los estudiantes en más de cuatro mil escuelas de la entidad de Sonora (*Escobar, A*., 2016).

Para 2016, aún no se consideraba el fenómeno de onda de calor como parte de las declaratorias de contingencia climática, emergencia y desastre natural emitidas por las autoridades mexicanas en el *Diario Oficial de la Federación*. Fue hasta 2017 cuando se incluyeron en las declaratorias los eventos de altas temperaturas y las ondas de calor como fenómenos naturales que causan desastres. Este evento histórico pudo haber llamado la atención de las autoridades mexicanas con respecto a la ocurrencia de eventos de temperatura extrema. Por lo tanto, esta investigación es sólo el comienzo de nuevos estudios sobre las condiciones de calor extremo que predominan en regiones cálidas como el noroeste de México.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Red Temática SECIHTI "REDESClim". El Servicio Meteorológico Nacional (México) proporcionó acceso al archivo histórico de observaciones de temperatura diaria y Iowa State University los radiosondeos atmosféricos. Los datos ERA5 se obtuvieron a partir del Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (https://cds.climate.copernicus.eu). Un agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al CICESE-Unidad La Paz por el Programa "Investigadores por México" y el Proyecto 497. Se agradece al Ing. Julio Egrén Félix Domínguez por el apoyo técnico otorgado en el formateo y descarga de datos meteorológicos. En especial a CESAVE - SIAFESON, 2023. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (www.siafeson.com/remas).

» Referencias bibliográficas

Bicknell, J., Dodman, D., & Satterthwaite, D. (2012). *Adapting Cities to Climate Change* (D. Dodman, J. Bicknell, & D. Satterthwaite, Eds.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849770361

Bradley, C. M., & Colodner, D. (2020). The Sonoran Desert. In *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 110–125). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11939-6

CENAPRED. (2023). *Declaratorias sobre emergencia, desastre y contingencia climatológica a nivel municipal entre 2000 y 2016*. Datos Abiertos. https://datos.gob.mx/busca/dataset/declaratorias-sobre-emergencia-desastre-y-contingencia-climatologica

Cox, D. R., & Lewis, P. A. W. (1966). *The Statistical Analysis of Series of Events*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7801-3

DESINVENTAR. (2023). *DesInventar Sendai*. https://www.desinventar.net/

DGFFS. (2018, December 31). *Información del Estado de Sonora en Materia Forestal*. Gobierno de Sonora. http://hunting.sonora.gob.mx/principal.php?op=19

DOF. (2016a, June 6). Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de La Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5440064&fecha=06/06/2016#gsc.tab=0

DOF. (2016b, November 15). Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de La Federación*. https://www.dof.gob.mx/index_113.php?year=2016&month=11&day=15#gsc.tab=0

EM-DAT. (2023). *The Emergency Events Database. Université catholique de Louvain (UCL) – CRED*. University of Louvain. https://www.emdat.be/database

Escobar, A. (2016, June 2). Cambian horario escolar en Sonora por ola de calor. *El Universal*. https://www. eluniversal.com.mx/articulo/estados/2016/06/2/cambian-horario-escolar-en-sonora-por-olade-calor/

Espinoza-Tamarindo, B. E. (2013). *Variabilidad de las ondas de calor observadas en el noroeste de México*. [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2747

Feng, Y., Liu, W., Sun, F., & Wang, H. (2021). Changes of compound hot and dry extremes on different land surface conditions in China during 1957–2018. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1085-E1099. https://doi.org/10.1002/joc.6755

García-Amaro, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen* (5 Vol.). Instituto de Geografía; UNAM.

García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Luterbacher, J., & Fischer, E. M. (2010). A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(4), 267–306. https://doi.org/10.1080/10643380802238137

Henderson, S., McLean, K., Lee, M., & Kosastsky, T. (2021). Extreme heat events are public health emergencies. *British Columbia Medical Journal*, 63, 366–367.

Herrera-Alanís, J. L. (2012). *Análisis de las Olas de Calor en la República Mexicana* [Tesis Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/analisis-de-las-olas-de-calor-en-la-republica-mexicana-79993?c=J9A39W&d=true&q=*:*&i=2&v=1&t=search_0&as=0

Hintz, M. J., Luederitz, C., Lang, D. J., & von Wehrden, H. (2018). Facing the heat: A systematic literature review exploring the transferability of solutions to cope with urban heat waves. *Urban Climate*, 24, 714–727. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.011

Jano-Pérez, J. A. (2020). *Análisis de Tendencia de Temperaturas Máximas en la Costa Norte Del Golfo* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de las Américas Puebla. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/jano_perez_ja/

Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 70.

Karimi, A., Sanaieian, H., Farhadi, H., & Norouzian-Maleki, S. (2020). Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park. *Energy Reports*, 6, 1670–1684. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.015

Martinez-Austria, P., & Bandala, E. (2017). Temperature and Heat-Related Mortality Trends in the Sonoran and Mojave Desert Region. *Atmosphere*, 8(3), 53. https://doi.org/10.3390/atmos8030053

Martínez-Austria, P. F., & Bandala, E. R. (2016). Maximum Temperatures and Heat Waves in Mexicali, Mexico: Trends and Threshold Analysis. *Air, Soil and Water Research*, 9, 21-28. https://doi.org/10.4137/ASWR.S32778

Martínez-Austria. P.F., & Bandala, R. E. (2018). Heat Waves: Health Effects, Observed Trends and Climate Change. In *Extreme Weather. InTech*. https://doi.org/10.5772/intechopen.75559

Mechler, R., Hochrainer, S., Aaheim, A., Salen, H., & Wreford, A. (2010). Modelling economic impacts and adaptation to extreme events: Insights from European case studies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(7), 737–762. https://doi.org/10.1007/s11027-010-9249-7

Overland, J. E. (2021). Causes of the Record-Breaking Pacific Northwest Heatwave, Late June 2021. Atmosphere, 12(11), 1434. https://doi.org/10.3390/atmos12111434

Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., & Herrmann, F. R. (2007). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus. Biologies*, 331(2), 171–178. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001

Secretaría de Salud. (2020). *Manual de procedimientos estandarizados para la vigilancia epidemiológica de daños a la salud por temperaturas naturales extremas*. www.gob.mx/salud

Shaposhnikov, D., Revich, B., Bellander, T., Bedada, G. B., Bottai, M., Kharkova, T., Kvasha, E., Lezina, E., Lind, T., Semutnikova, E., & Pershagen, G. (2014). Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010. *Epidemiology*, 25(3), 359–364. https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000090

Sharma, A., Andhikaputra, G., & Wang, Y.-C. (2022). Heatwaves in South Asia: Characterization, Consequences on Human Health, and Adaptation Strategies. *Atmosphere*, 13(5), 734. https://doi.org/10.3390/atmos13050734

SINAVE, DGE, & SS. (2016). *Temperaturas Naturales Extremas (Temporada de Calor 2016)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103920/TNE_2016_SE22.pdf

Stanaway, J. D., Afshin, A., Gakidou, E., Lim, S. S., Abate, D., Abate, K. H., Abbafati, C., Abbasi, N., Abbastabar, H., Abd-Allah, F., Abdela, J., Abdelalim, A., Abdollahpour, I., Abdulkader, R. S., Abebe, M., Abebe, Z., Abera, S. F., Abil, O. Z., Abraha, H. N., … Murray, C. J. L. (2018). Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 392(10159), 1923–1994. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32225-6

Wallace, J. M., & Hobss, P. V. (2006). *Atmospheric Science An Introductory Survey* (R. Dmowska, D. Hartman, & H. T. Rossby, Eds.; 2nd ed., Vol. 92). University of Washington.

White, R. H., Anderson, S., Booth, J. F., Braich, G., Draeger, C., Fei, C., Harley, C. D. G., Henderson, S. B., Jakob, M., Lau, C.-A., Mareshet Admasu, L., Narinesingh, V., Rodell, C., Roocroft, E., Weinberger, K. R., & West, G. (2023). The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021. *Nature Communications*, 14(1), 727. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36289-3

1.5 Extremos termopluviométricos del estado de Morelos

Antonio Luna-Díaz
Universidad Veracruzana
Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica, A.C.
Miembro de REDESClim

Ignacio Garay-Peralta
Tecnológico Nacional de México Campus Úrsulo Galván.
Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica, A.C.
Miembro de REDESClim

Palabras Clave: Termopluviométricos, hidrometeorológicos, datos climáticos erróneos, eventos extremos.
ODS: 2, 4, 12 y 13

Introducción

El clima está determinado por diversos elementos y factores, es un conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo de un dominio espacial determinado. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define clima como la medición de la media y la variabilidad de cantidades relevantes de ciertas variables (como la temperatura, la precipitación o el viento) durante un período de tiempo, que va desde meses hasta miles o millones de años. El periodo normal es de 30 años, un sentido más amplio es el estado, incluida una descripción estadística del sistema climático (OMM, 2021). El clima de un lugar también está determinado por las variables latitud y altitud.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) define clima como el estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado, comprende los extremos y todas las variaciones, analizados en un periodo largo de tiempo. Se considera que para poder establecer el clima de un lugar determinado se necesitan registros de por lo menos 30 años (SMN, 2022).

El estado de Morelos, según el INEGI, cuenta con 4 sub-tipos de clima (INEGI, 2022). Para medir el clima de Morelos se cuenta con una red de 74 estaciones climatológicas de consulta pública administradas por el SMN, quien depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), este organismo es el encargado oficial de administrar y almacenar la información climatológica a nivel nacional (SMN, 2022).

El estado de Morelos cuenta con una red climatológica que, bajo las normas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), no está bien distribuida en lo espacial ni en lo temporal (OMM, 2011), aunque algunas estaciones climatológicas tienen registros de más 98 años y en otras comenzaron a funcionar en el año 2002. Dicha información puede ser analizada por internet, aunque para algunos casos debe ser solicitada directamente a la dependencia (SMN, 2022).

La red climatológica del estado de Morelos presenta información de temperatura máxima, mínima y promedio, precipitación diaria, acumulada mensual y acumulada anual, así como en algunos casos se cuenta con datos de evaporación y viento, además de su ubicación geográfica, fechas de datos disponibles, cuenca hidrológica a la que pertenece y su entidad federativa. Asimismo, contiene datos.

Tanto en fuentes oficiales gubernamentales, medios de comunicación, como en la sociedad se ha hecho popular la frase “esta temperatura tan alta nunca había sucedido” o “nunca se había presentado una lluvia tan fuerte como la de hoy”, sin embargo, los datos pueden mostrar qué tan ciertas o falsas son esas expresiones. Por ello, en esta investigación nos enfocaremos en los valores extremos registrados histórica-

mente de la temperatura y la precipitación, considerando las normas establecidas por la OMM, organismo oficial que se encarga de reglamentar la información climatológica, estas normas se especifican en las *Guías de Prácticas Hidrológicas* y en las *Guías de Prácticas Climatológicas* (OMM, 2011).

Es importante destacar que México tiene un problema con la calidad de datos climatológicos. Luna Díaz Peón, Valdés Rodríguez y Villanueva Solís (2018) han evidenciado la mala calidad de la información climatológica del SMN, mostraron que a pesar de las 5,491 estaciones climatológicas en México, sólo 3,154 de ellas funcionaban hasta junio de 2021; también, encontraron problemas en los instrumentos de medición, unos por deterioro y otros por mala colocación. No obstante, lo más grave podría ser el personal no capacitado que opera las estaciones. Coria *et al.* (2016) destaca la necesidad de comprobar el buen estado de la información climatológica de México. Iriza (2016) destaca que la mala calidad de los datos influye en la certeza de los pronósticos meteorológicos, debido a que los modelos con los que se realizan requieren de dicha información y esto puede sobreestimar los valores resultantes.

Por su parte, el tema de cambio climático es de relevancia a nivel mundial, en México se han realizado estudios al respecto (Bruckner T. *et al.*, 2014; Conde y Gay, 2008; Delgado y Gay, 2010; IPCC, 2007), utilizando la información climatológica existente, complicando los resultados de escenarios climáticos futuros de las investigaciones como lo mencionan algunos autores (Becker y Berbery, 2008; Carrera-Hernández y Gaskin, 2007; Cattle *et al.*, 2002; Gilleland *et al.* 2010; Janowiak *et al.*, 2005; Moral, 2010).

Se han realizado investigaciones sobre el clima del estado de Morelos utilizando la temperatura máxima, se han construido índices de cambio climático (Mendoza *et al.* 2004; Jiménez-Ávila *et al.* 2014; Figueroa-Gallegos, 2017), incluso se han hecho investigaciones sobre el impacto que podría tener en algunas plantaciones por el cambio climático. Ejemplo de ello es el cambio de uso de suelo como lo menciona Escandón-Calderón *et al.* (2018). Así como en los recursos hídricos del suelo, pues de acuerdo con Luna-Nemecio *et al.* (2020). A causa de los efectos del cambio climático, se ha ocasionado una crisis en la subcuenca del río Cuautla.

El estado de Morelos, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), tiene una población de 1,971,520 habitantes, 36 municipios (INEGI, 2022), sin embargo, realmente no se conoce su clima y mucho menos los valores extremos climatológicos de temperatura y precipitación.

Metodología

El SMN cuenta con una base de datos climatológicos que se puede consultar de manera virtual. La información puede consultarse en su totalidad u organizarse por estados, cuencas o cada una por separado, ya que tienen claves de identificación que se asignan de acuerdo al estado donde se localizan los equipos (SMN, 2022). Para nuestra investigación se analizó toda la información del estado de Morelos (Figura 1).

Se cuenta con información de precipitación (mm), evaporación (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C), además de la ubicación geográfica, la fecha en la que se actualizó la información, la cual podría no corresponder con el último dato de registro. En algunos casos, la base de datos del SMN muestra registros faltantes. Por ejemplo, la estación 17037 Escuela de Biología UAEM ubicada en Cuernavaca, Morelos, en la base de datos que muestra el (SMN, 2022) pareciera que sus datos son continuos, sin embargo, entre el 1 de enero de 1980 al 1 de diciembre de 2006 no se cuenta con información (Figura 2), en total esta estación tiene un 64.9 % de datos faltantes. En contraste, existen dos estaciones que no tienen datos faltantes, por lo anterior se tuvieron que analizar y, en su caso, corregir todas las estaciones que presentaban este problema, de tal manera que se contara con una base de datos de forma continua en serie de tiempo.

► **Figura 1.** Puntos de ubicación de las estaciones climatológicas del SMN.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

CNA-SMN-CG-GMC-SMAA-CLIMATOLOGIA
BASE DE DATOS CLIMATOLOGICA
DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A MARZO 2020;
CON LA INFORMACION SUMINISTRADA POR LAS OFICINAS REGIONALES

ESTACION : 17037
NOMBRE : ESCUELA DE BIOLOGIA UAEM
ESTADO : MORELOS
MUNICIPIO : CUERNAVACA
SITUACI►N : OPERANDO
ORGANISMO : CONAGUA-SMN
CVE-OMM : Nulo
LATITUD : 018.983►
LONGITUD : -099.233►
ALTITUD : 1,893 msnm

EMISION : 06/04/2020

FECHA	PRECIP (MM)	EVAP (MM)	TMAX (►C)	TMIN (►C)
11/03/1975	0	Nulo	Nulo	Nulo
12/03/1975	0	Nulo	28	12.3
13/03/1975	0	Nulo	26.3	11.3
14/03/1975	0	Nulo	23	12
15/03/1975	0	Nulo	28	13
16/03/1975	0	Nulo	28	13
17/03/1975	0	Nulo	28	12
18/03/1975	0	Nulo	28	12.5
28/12/1979	0	Nulo	25	10
29/12/1979	0	Nulo	25	11
30/12/1979	0	Nulo	26	12
31/12/1979	0	Nulo	25	11
01/12/2006	0	4.4	27	10
02/12/2006	0	4.6	27	9
03/12/2006	0	2.9	25	13
04/12/2006	0	4.1	23	10
05/12/2006	0	2.4	22	6.5
06/12/2006	0	2.5	23	7
07/12/2006	0	2.4	23	8
08/12/2006	0	1.4	23	10
09/12/2006	0	4.9	23	10
10/12/2006	0	1.8	23	8
11/12/2006	0	2.2	23.5	7
12/12/2006	0	2.6	24	8.5
13/12/2006	0	4.1	24	10
14/12/2006	0	3.9	24	10
15/12/2006	0	3.2	24	9

Discontinuidad

► **Figura 2.** Estación climatológica 17037 Escuela de Biología UAEM, Morelos.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

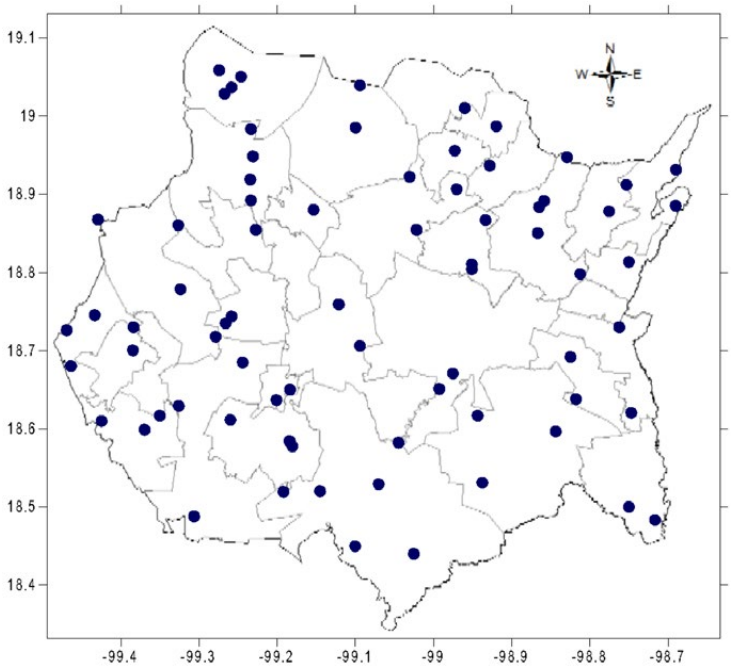
Las bases de datos se ordenaron por número consecutivo de la estación climatológica, tomando en cuenta las normas que se deben aplicar determinadas por la OMM, la cual menciona que las observaciones sumarias, tales como las temperaturas extremas o las precipitaciones totales correspondientes a un período de 24 horas (por ejemplo, desde las 08.00 horas de un día hasta las 08.00 del día siguiente), no son equivalentes a las efectuadas con respecto a un período de 24 horas por ejemplo, desde las 00.00 hasta 24.00 horas (OMM, 2011).

Posteriormente, se analizaron las bases de datos climatológicas del estado de Morelos con el objetivo de verificar su calidad. Se verificó que las temperaturas máximas no fueran menores que las mínimas o el promedio y que las temperaturas mínimas no estén

por arriba de las máximas o su promedio (Edenhofer *et al.*, 2014; Kunreuther *et al.*, 2014; OMM, 2011). Además, se corroboró que las coordenadas de cada estación estuvieran ubicadas correctamente (Figura 3).

Se verificaron otros errores, considerando las reglas establecidas por la OMM, la cual, además de determinar que las bases de datos deben estar en series de tiempo continuas, establece que las normales climatológicas deben estar conformadas por información de 30 años (OMM, 2011). Finalmente, se revisaron inconsistencias en los datos, tales como fechas repetidas y faltantes, así como la identificación de las estaciones en operación y las suspendidas, tal como lo recomiendan Luna Díaz Peón *et al.* (2018).

Con todo lo anterior, se procedió a detectar los valores extremos climáticos de cada una de las estaciones climatológicas de Morelos, considerando tanto la temperatura máxima extrema histórica como el valor más alto de las temperaturas máximas diarias en toda la serie de tiempo y se ubicó su fecha. Se realizó el mismo procedimiento con la temperatura mínima a fin de encontrar el valor más bajo histórico. Para el caso de la precipitación, se buscó solamente el valor más alto de la variable referida a la precipitación diaria de cada estación climatológica y se ubicó en fecha. Para los casos más representativos, se realizó una consulta en las fuentes periodísticas de México para poder identificar lo que sucedió en esa fecha y el día siguiente en que se registraron los valores extremos. También se buscaron otras fuentes de información como las oficiales de carácter gubernamental para su verificación.



► **Figura 3.** Puntos de ubicación de las 74 estaciones climatológicas del estado de Morelos, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Resultados

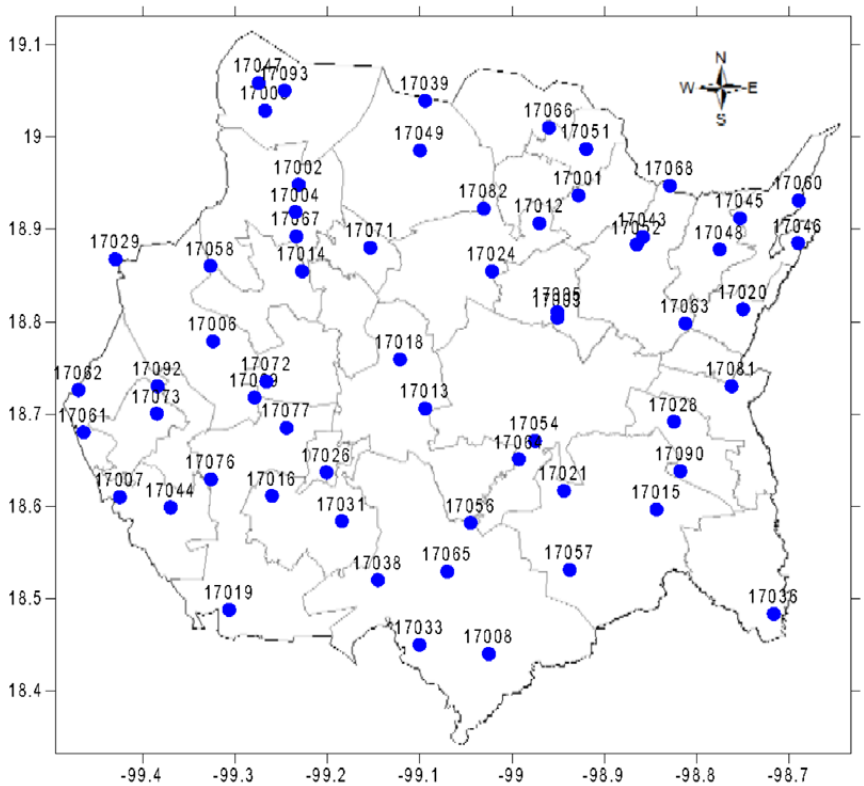
Se encontró que existen sólo 60 estaciones climatológicas operando y que, aunque la reducción no pareciera significativa, los mapas sí lo muestran y resaltan zonas en las que se debería de poner más atención por la vulnerabilidad climatológica a la que se pudieran encontrar.

Se obtuvieron los valores extremos climáticos de las estaciones de Morelos con su respectiva fecha de registro. Para la variable de temperatura se presentan los datos máximos extremos (TXX) y mínimos extremos (TNN), y para la precipitación sólo el valor máximo extremos (PX). Debido a la gran cantidad de información obtenida en la investigación, se muestran los resultados de las primeras estaciones (17001 a 17022) en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones climatológicas que presentaron las temperaturas máximas extremas históricas del estado de Morelos.

Clave	Nombre	Municipio	Txx	Fecha	Tnn	Fecha	Prec X	Fecha
17001	Atlatlahuacan	Atlatlahucan	39.0	03/05/1947	0.0	20/02/1926	186.5	30/06/2011
17002	Colonia Empleado	Cuernavaca	45.0	11/06/1957	0.6	24/02/1989	127.0	10/07/1976
17003	Cuautla (Smn)	Cuautla	46.0	08/04/1951	1.0	24/01/1983	305.0	13/09/1945
17004	Cuernavaca (Dge)	Cuernavaca	39.5	12/04/1978	3.0	13/01/1956	129.0	10/07/1976
17005	Cuautla (Dge)	Cuautla	39.0	26/02/1979	0.0	19/01/1972	108.0	17/09/1969
17006	El Rodeo	Miacatlan	42.0	09/05/1988	3.0	23/11/2006	107.6	26/09/1967
17007	Huajintlan	Amacuzac	48.0	19/03/1991	-5.0	01/01/1929	109.0	21/07/2016
17008	Huautla	Tlaquiltenango	44.0	28/04/2011	0.0	06/12/1999	106.0	23/07/2006
17009	C.b.t.a.154 Huitzilac	Huitzilac	38.0	01/05/2017	-1.5	18/12/1980	150.7	07/10/1976
17012	Oaxtepec	Yautepec	39.0	18/07/1986	0.8	11/12/1973	120.0	30/06/2011
17013	Temilpa	Tlaltizapan	49.0	01/07/1997	2.0	23/11/2002	89.8	24/06/1983
17014	Temixco	Temixco	41.0	13/06/1998	3.5	14/01/1986	112.0	11/06/2001
17015	Tepalcingo	Tepalcingo	43.5	03/05/1976	-3.0	22/11/2002	118.0	27/05/2014
17016	Tequesquitengo	Jojutla	43.0	04/05/1999	4.0	05/01/1956	98.5	03/07/1960
17017	Tetelcingo	Cuautla	43.0	06/04/1957	0.0	29/02/1964	95.0	25/06/1962
17018	Ticuman	Tlaltizapan	44.0	23/07/2000	1.0	13/01/1956	96.0	09/08/2016
17019	Tilzapotla	Puente De Ixtla	46.0	28/04/1962	2.0	13/03/1982	116.0	09/06/1975
17020	Tlacotepec	Zacualpan	39.0	07/05/1998	0.2	25/02/1974	108.3	30/06/2011
17021	Tlacualera	Tepalcingo	36.0	04/05/2003	-2.5	03/01/2008	174.0	30/06/2011
17022	Tres Cumbres	Huitzilac	32.0	26/05/1978	-6.0	20/12/1975	124.5	07/10/1976

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

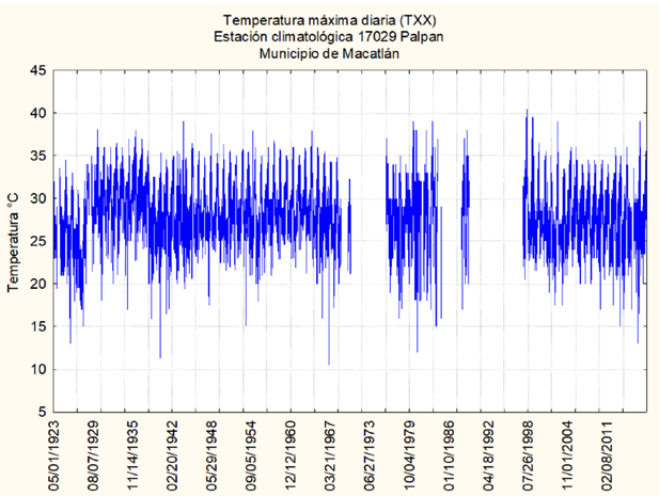


► **Figura 4.** Ubicación de las 60 estaciones climatológicas en operación en el estado de Morelos, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

La estación climatológica más antigua del estado de Morelos

El registro más antiguo con el que se cuenta en el estado de Morelos es del 1 de mayo de 1923 de la estación climatológica 17029 Palpan ubicada en el municipio Miacatlán a una altura de 1,620 msnm (latitud 18.8675° N y longitud 99.429167 ° O). La estación actualmente sigue operando y registrando datos, la temperatura máxima extrema histórica registrada fue el día 9 de mayo de 1998 con 40.5 °C, la temperatura mínima extrema histórica fue el día 27 de enero de 1938 con 2.0 °C y la precipitación máxima diaria histórica fue el día 30 de septiembre de 1965 con 112.0 mm, presenta un 22.3 % de datos faltantes (Figura 5).



► **Figura 5.** Temperatura máxima diaria de la estación climatológica 17029 Palpan del estado de Morelos, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional.

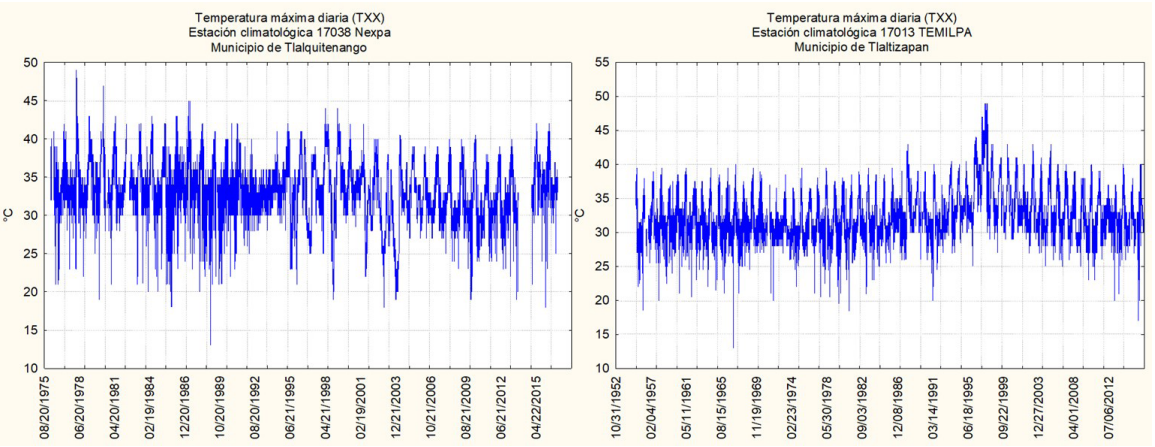
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Los máximos extremos de temperatura

Para el caso de la temperatura máxima extrema (TXX), se buscaron los valores más altos en los datos históricos del estado de Morelos, se presentan por orden de importancia primero los más antiguos en el caso de coincidencia.

El registro extremo máximo histórico de temperatura fue de 49.0 °C, el día 15 de marzo de 1978 en la estación Nexpa, en el municipio de Tlalquitenango; y el día 1 de julio de 1997 en la estación Temilpa, del municipio de Tlaltizapan (Figura 6) (Tabla 2).

Con el fin de identificar el comportamiento que se tuvo con la temperatura máxima extrema registrada el 15 de marzo de 1978 en la estación Nexpa, municipio de Tlalquitenango, se elaboró el mapa de isotermas, se utilizaron sólo 35 estaciones climatológicas con las que se contó información para esa fecha (Figura 7).

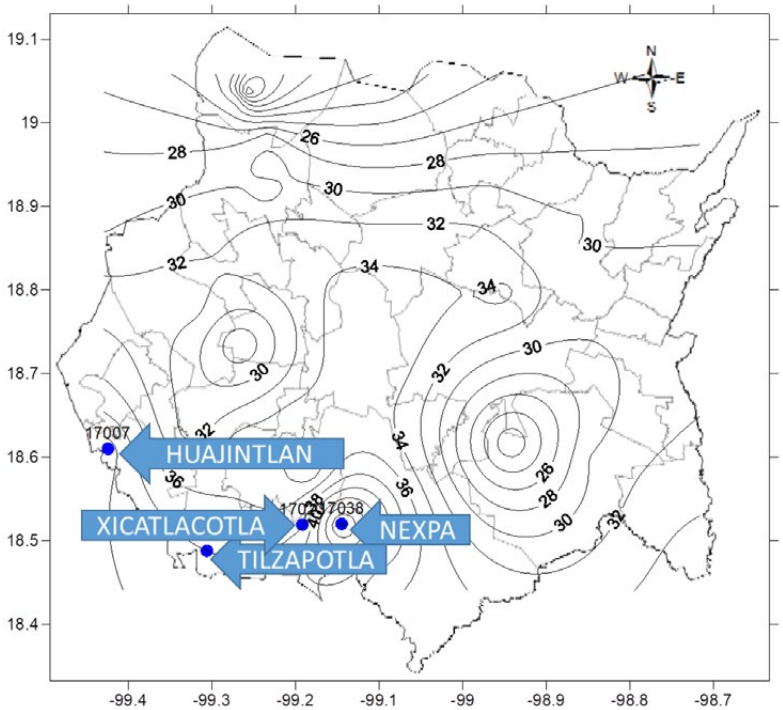


► **Figura 6.** Temperatura máxima diaria de las estaciones climatológicas 17038 Nexpa y 17013 Temilpa del estado de Morelos.
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Tabla 2. Estaciones climatológicas que presentaron las temperaturas máximas extremas históricas en el estado de Morelos.

Clave	Nombre	Municipio	Txx	Fecha
17038	Nexpa	Tlaquiltenango	49.0	15/03/1978
17013	Temilpa	Tlaltizapan	49.0	01/07/1997
17007	Huajintlan	Amacuzac	48.0	19/03/1991
17065	Valle de Vazquez	Tlaquiltenango	47.5	05/04/2016
17032	San Gabriel	Amacuzac	47.2	02/05/1935

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).



► **Figura 7.** Registro de temperatura máxima del día 15 de marzo de 1978 en el estado de Morelos.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Para el caso de los registros de TXX, no se encontraron notas periodísticas ni reportes del Gobierno del estado.

Los mínimos extremos de temperatura

La temperatura mínima extrema (TNN) ha sido de -6.0 °C, registrada en los municipios de Tetela del Volcán y Huitzilac en distintas fechas (Tabla 3). Cabe resaltar que los registros de Huitzilac fueron en tres estaciones distintas, pero de igual manera en diferentes fechas, el municipio presenta un gradiente altitudinal que va desde los 2,550 hasta los 2826.6 msnm.

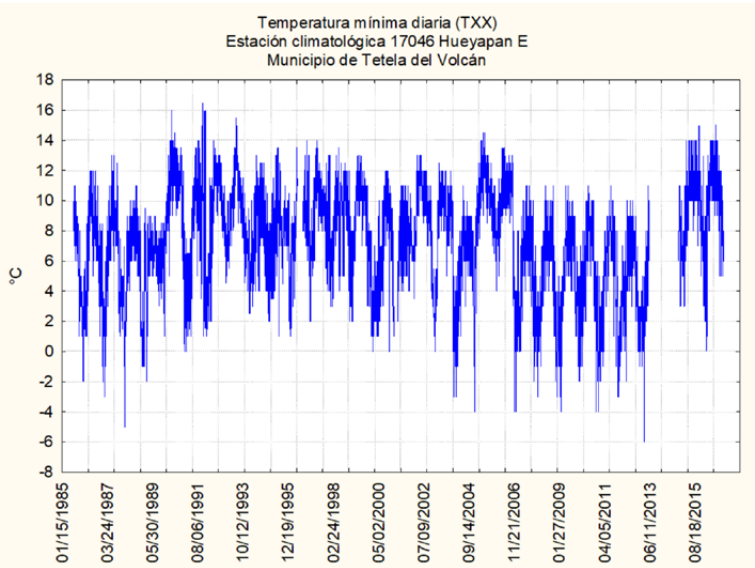
La temperatura mínima diaria de la estación climatológica Hueyapan E, en Tetela del Volcán, muestra un comportamiento variable en sus registros, se puede apreciar un comportamiento irregular, sin embargo, destacan los últimos tres años de registro, en los que se muestra un incremento aparente de la temperatura (Figura 8).

Con el propósito de analizar de manera más puntual el caso de la temperatura mínima diaria extrema histórica de Morelos, registrada el día 3 de marzo de 2013 en la estación climatológica Hueyapan E en el municipio Tetela del Volcán, se construyó el mapa de isotermas con 53 estaciones que contaban con registro a fin de mostrar su comportamiento en todo el estado. Se aprecia un comportamiento correspondiente a sus niveles altitudinales y para la época de registro (Figura 9).

Tabla 3. Estaciones climatológicas que presentaron las temperaturas mínimas extremas históricas en el estado de Morelos.

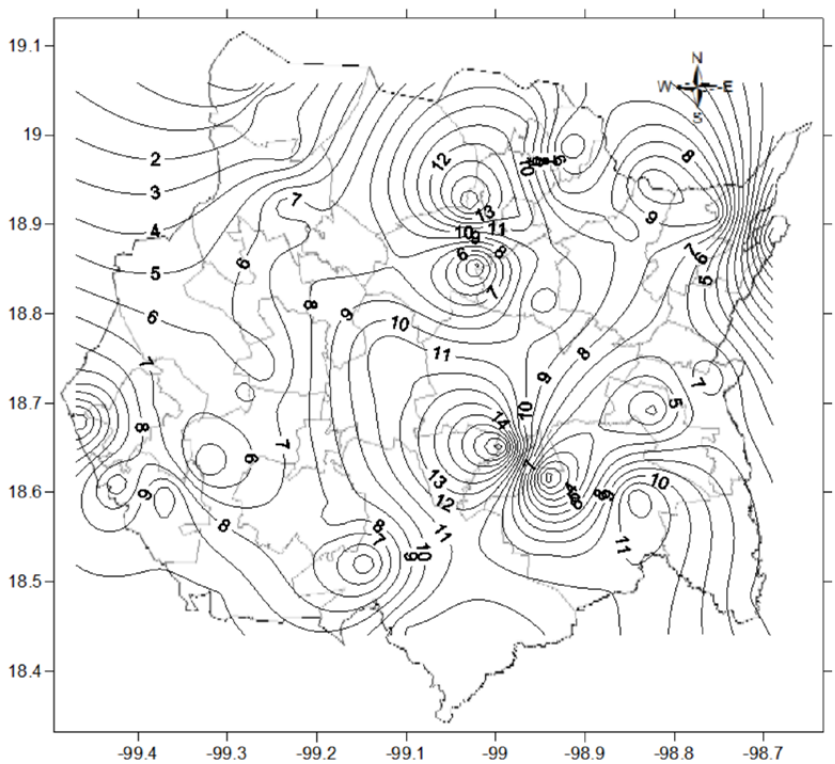
Clave	Nombre	Municipio	Tnn	Fecha
17046	Hueyapan E-	Tetela Del Volcan	-6.0	03/03/2013
17022	Tres Cumbres	Huitzilac	-6.0	20/12/1975
17047	Huitzilac	Huitzilac	-6.0	11/01/1997
17093	Tres Marias	Huitzilac	-6.0	20/01/2001
17007	Huajintlan	Amacuzac	-5.0	01/01/1929

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).



► **Figura 8.** Temperatura mínima diaria de la estación climatológica 17046 Hueyapan E, del estado de Morelos.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).



► **Figura 9.** Temperatura mínima del 3 de marzo de 2013 en el estado de Morelos.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Lamentablemente, no existieron notas periodísticas que resaltaran dichas temperaturas para esa fecha, aunque sí se encontraron publicaciones de ese día, ninguna hizo referencia sobre la temperatura registrada.

Los máximos extremos de la precipitación

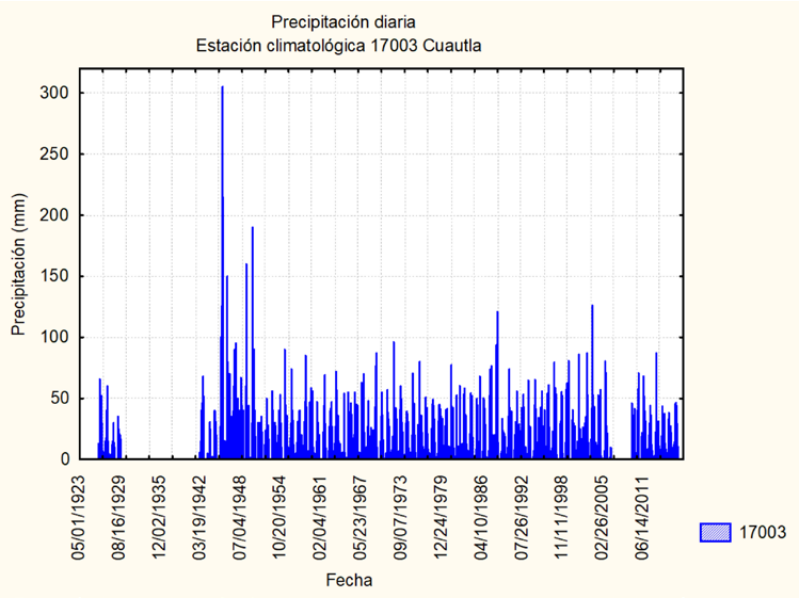
Los cinco registros históricos más altos de precipitación diaria que se tienen en el estado de Morelos rebasan los 155.0 mm, cabe destacar que el más alto fue en 1945 y los cuatro restantes en 2011 (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones climatológicas que presentaron las precipitaciones máximas extremas históricas en el estado de Morelos.

Clave	Nombre	Municipio	Prec X	Fecha
17003	Cuautla (Smn)	Cuautla	305.0	13/09/1945
17039	San Juan Tlacotenco	Tepoztlán	218.3	30/06/2011
17001	Atlatlahuacan	Atlatlahucan	186.5	30/06/2011
17049	Tepoztlán E-	Tepoztlán	182.5	30/06/2011
17021	Tlacualera	Tepalcingo	174.0	30/06/2011

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

El día 13 de septiembre de 1945 se registró la precipitación histórica más alta en el estado de Morelos, en la estación climatológica 17003 Cuautla (SMN), ubicada en el municipio Cuautla (Figura 10).

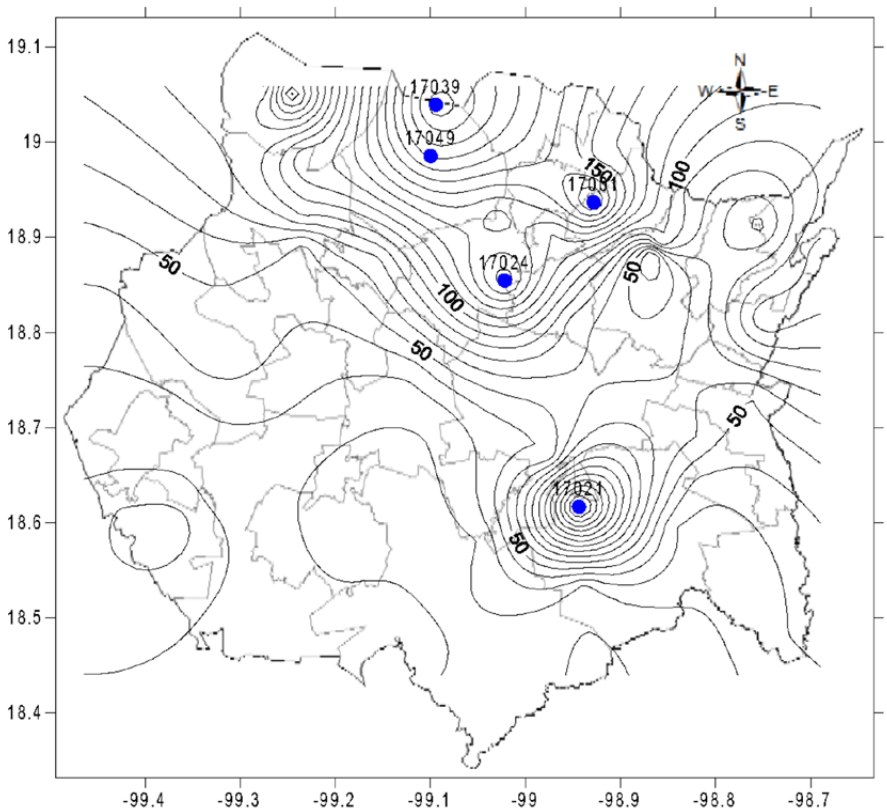


► **Figura 10.** Precipitación diaria de la estación climatológica 17003 Cuautla.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Cabe destacar que el día 30 de junio de 2011 sucedieron los otros cuatro registros más altos de precipitación. Para observar el comportamiento de ese día se construyó el mapa de isoyetas, fueron 48 estaciones climatológicas que presentaron registro, 11 de ellas con precipitación superior a los 100.0 mm (Figura 11).

Las fuentes periodísticas no publicaron ninguna nota al respecto, se consultó las páginas oficiales como la de Protección Civil del estado de Morelos, así como de la Secretaría de Gobernación y no se encontró información alguna al respecto.



► **Figura 11.** Precipitación acumulada en 24 h del día 30 de junio de 2011 en el estado de Morelos.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2022).

Conclusiones y Recomendaciones

El desconocimiento de los valores extremos termopluviométricos ha provocado desinformación en la población y la deficiente actuación de las autoridades encargadas de la toma de decisiones ante eventos hidrometeorológicos.

El estado de Morelos muestra que los registros extremos de temperatura, tanto la máxima como la mínima, son en su mayoría del siglo pasado. Para el caso de la precipitación, es importante destacar que los comportamientos extremos de cada estación presentan una variabilidad interanual, además de que no existen notas periodísticas de consulta por internet, ni si quiera en los casos recientes, lo que dificulta realizar comparaciones o análisis de riesgos por hidrometeoros.

Se recomienda analizar la calidad de la información que se utilizará en futuras investigaciones, todo esto a partir de una auditoría automatizada de los diversos errores que pueden contener los datos registrados y almacenados en la información climatológica del SMN.

» Referencias bibliográficas

Becker, E. J., & Berbery, E. H. (2008). The diurnal cycle of precipitation over the North American monsoon region during the NAME 2004 field campaign. *Journal of Climate,* 21(4), 771–787. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1642.1

Bruckner T., I. A., Bashmakov, Y., Mulugetta, H., Chum, A., De la Vega Navarro, J., Edmonds, A., Faaij, B., Fungtammasan, A., Garg, E., Hertwich, D., Honnery, D., Infield, M., Kainuma, S., Khennas, S., Kim, H. B., Nimir, K., Riahi, N., Strachan, R., Wiser, R., & Zhang, X. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of climate change. *IPCC Fifth Assessment Report*, 527–532. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416

Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336(3–4), 231–249. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.021

Cattle, J. A., McBratney, A. B., & Minasny, B. (2002). Kriging Method Evaluation for Assessing the Spatial Distribution of Urban Soil Lead Contamination. *Journal of Environmental Quality,* 31, 1576–1588. https://doi.org/10.2134/jeq2002.1576

Conde, A. C., & Gay, C. (2008). *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas/54.pdf

Coria, S. R., Gay-García, C., Villers-Ruiz, L., Guzmán-Arenas, A., Sánchez-Meneses, Ó., Ávila-Barrón, O. R., Pérez-Meza, M., Cruz-Núñez, X., & Martínez-Luna, G. L. (2016). Climate patterns of political division units obtained using automatic classification trees. *Atmósfera*, 29(4), 359–377. https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.06

Delgado, G. C., & Gay, C. (2010). México Frente al Cambio Climático. Retos y Oportunidades. In G. C. Delgado & C. Gay (Eds.), *Colección: El Mundo Actual: Situación y Alternativas* (1st ed.). https://www.pincc.unam.mx/publicaciones/mexico-frente-al-cambio-climatico/

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Kadner, S., Minx, J., Brunner, S., Agrawala, S., Baiocchi, G., Bashmakov, I. A., Blanco, G., Broome, J., Bruckner, T., Bustamante, M., Clarke, L., Conte Grand, M., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., Dhakal, S., Dubash, N. K., … Zwickel, T. (2014). Technical Summary. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (33–107). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.106002

Escandón Calderón, J., Ordóñez Díaz, J. A. B., Nieto de Pascual Pola, C. del C., & Ordóñez Díaz, M. de J. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 9(46). https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.135

Figueroa-Gallegos, José Alonso. (2017). Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. Tecnología y ciencias del agua, 8(6), 137-143. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-10.

Gilleland, E., Ahijevych, D. A., Brown, B. G., & Ebert, E. E. (2010). Verifying forecasts spatially. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 91(10), 1365–1373. https://doi.org/10.1175/2010BAMS2819.1

INEGI. (2022). *Instituto Nacional de Geografía*. https://www.inegi.org.mx/

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal; Pachauri, R.K. y Reisinger, A.] In *Nature* (Vol. 446, Issue 7137). https://doi.org/10.1038/446727a

Iriza, A., Dumitrache, R. C., Lupascu, A., & Stefan, S. (2016). Studies regarding the quality of numerical weather forecasts of the WRF model integrated at high-resolutions for the Romanian territory. *Atmosfera*, 29(1), 11–21. https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.01.02

Janowiak, J. E., Kousky, V. E., & Joyce, R. J. (2005). Diurnal cycle of precipitation determined from the CMORPH high spatial and temporal resolution global precipitation analyses. *Journal of Geophysical Research Atmospheres,* 110(23), 1–18. https://doi.org/10.1029/2005JD006156

Jiménez-Ávila, M. E., Salina, S., & Ortiz-Hernández, M. L. (2014). Percepción del cambio climático en estudiantes de nivel medio superior del estado de Morelos. *Tomo I. Ambiente y valores*, 64.

Kunreuther, H., Gupta, S., Bosetti, V., Cooke, R., Dutt, V., Duong, M. H., Held, H., Llanes-Regueiro, J., Patt, A., Shittu, E., & Weber, E. (2014). Integrated Risk and Uncertainty Assessment of Climate Change Response Policies. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the IPCC Fifth Assessment Report* (151–206).

Luna Nemecio, J., Bolongaro Crevana-Recaséns, A., & Torres Rodríguez, V. (2020). La crisis hídrica en la región de la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático. *Revista De Geografía Espacios*, 9(18), 70-89. https://doi.org/10.25074/07197209.18.1229.

Luna Díaz Peón, A., Valdés Rodríguez, O. A., & Villanueva Solís, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. In N. Hernández Cortez, L. C. Ruelas Monjardín, & M. E. Nava Tablada (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (p. 317). http://colver.com.mx/2018/SustentabilidadDesarrollo.pdf

Mendoza, V. M., Villanueva, E. E., Maderey, L. E., Martínez, J., & Fernández, A. (2004). Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el Cambio Climático Global. In Martínez, J. y A. Fernández B.(eds.). *Cambio Climático: una visión desde México (*215-226). Instituto Nacional de Ecología. http://centro.paot.org.mx/documentos/ine/437.pdf

Moral, F. J. (2010). Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: Application to precipitation. *International Journal of Climatology,* 30(4), 620–631. https://doi.org/10.1002/joc.1913

OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas* (O. M. M. OMM (ed.)). https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf

OMM. (2021). *Organización Meteorológica Mundial*. https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate

SMN. (2022). *Servicio Meteorológico Nacional*. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica

1.6 Tendencias en la temperatura ambiental e índices climáticos en Actopan, Veracruz

Nubia Zoé Lara Rodríguez
Maestría en Economía Ambiental y Ecológica, Facultad de Economía, Universidad Veracruzana

Ana Cecilia Travieso Bello
Facultad de Economía, Universidad Veracruzana

Carolina Andrea Ochoa Martínez
Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana

Palabras Clave: ODS, fenómenos hidrometereológicos, estaciones.
ODS: 13 acción por el clima.

Introducción

En la actualidad, está ampliamente documentado que vivimos en un periodo de cambio climático (CC), término que se refiere a un cambio a largo plazo en los patrones climáticos promedio que definen los climas locales, regionales y globales de la Tierra (NASA, 2023). De acuerdo con el sexto reporte del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la mayoría de las actividades humanas han sido el principal propulsor del CC que ocurre actualmente. Este es generado por la acumulación de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono y metano, que han elevado gradualmente la temperatura de la superficie terrestre desde la revolución industrial. Tan sólo en la última década, existe una diferencia de +1.1°C con respecto al nivel de temperatura registrado en el periodo preindustrial (1850-1900) (Calvin *et al*., 2023).

Los eventos extremos (e.g., olas de calor, fuertes precipitaciones y sequías) son algunos de los diversos tipos de cambios que se pueden observar en el sistema climático. Se espera que dichos eventos sean mucho más drásticos con el aumento del calentamiento global. Los cambios en la frecuencia o intensidad de los eventos climáticos extremos tienen graves efectos en cascada sobre las poblaciones y los ecosistemas (Calvin *et al*., 2023). Por esta razón, el Equipo de Expertos en Detección, Monitoreo e Índices de Cambio Climático (ETCCDMI, por sus siglas en inglés) y científicos del clima a nivel mundial monitorean un conjunto de índices climáticos. Éstos son calculados a partir de datos diarios de variables climáticas, como temperatura y precipitación, y permiten detectar valores extremos que pudieran estar relacionados con el CC (ETCCDI, 2020; Peterson, 2005).

Las evidencias científicas muestran que los cambios observados en el clima tienen efectos diversos y complejos en los sistemas naturales y humanos, ocasionando problemas sociales, ambientales y económicos, afectando a la población, infraestructura, sistemas productivos y ecosistemas (Calvin *et al*., 2023). Ante esta problemática, en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas se incluyó el Objetivo de

Desarrollo Sostenible (ODS) 13, denominado "Acción por el clima", que exhorta a la humanidad a adoptar medidas urgentes para combatir el CC y sus efectos (ONU, 2020). La detección del CC a nivel local es uno de los primeros pasos para contribuir a este ODS. Por ello, la Agenda 2030 emplea variables o indicadores climáticos, los cuales son objetivos, cuantificables, están basados en datos disponibles para la mayoría de los países y permiten detectar cambios a través del tiempo (Williams & Eggleston, 2017).

El estado de Veracruz, por su localización geográfica, ha sido identificado como una de las regiones con mayor vulnerabilidad al CC en México y se han reconocido cambios generales en el clima muy evidentes: llueve menos en el estado, pero en las montañas llueve más y ocurren fuertes tormentas de corta duración, mientras que en cuencas bajas hay sequías más pronunciadas. Además, los frentes fríos y las ondas de calor son más fuertes y de mayor duración, el nivel del mar ha aumentado nueve centímetros en 50 años (Tejeda-Martínez, del Valle-Cárdenas, *et al.*, 2020), se ha registrado el retroceso del glaciar de Jamapa (Soto-Molina, 2014), entre otros fenómenos.

Es importante destacar que, en México y particularmente en el estado de Veracruz, existen pocos estudios sobre el cambio y la variabilidad climática y su relación con eventos extremos a escala local, que permitan evaluar un cambio en su intensidad, duración o frecuencia. Esto puede deberse a la escasa información de calidad con la que se cuenta, pues, en el caso de México, existen problemas en la red de estaciones meteorológicas, que son las captadoras de las principales variables, por lo que las investigaciones de este tipo están sujetas a la escasa información que cubre los requisitos de control de calidad de los datos. Por ello, resulta fundamental que las investigaciones en este ámbito cuenten con un mayor número de puntos de observación, que permitan una mayor cobertura espacial de información.

Para contribuir al conocimiento de las variaciones del clima a nivel local, el objetivo de este trabajo es identificar posibles manifestaciones de CC en el centro de Veracruz, a través del análisis de la tendencia de la temperatura ambiental y algunos índices climáticos. Para ello se estudia el caso del municipio de Actopan, Veracruz, el cual cuenta con una estación meteorológica que, de manera excepcional, tiene registros confiables al menos desde el año 1952.

Métodos

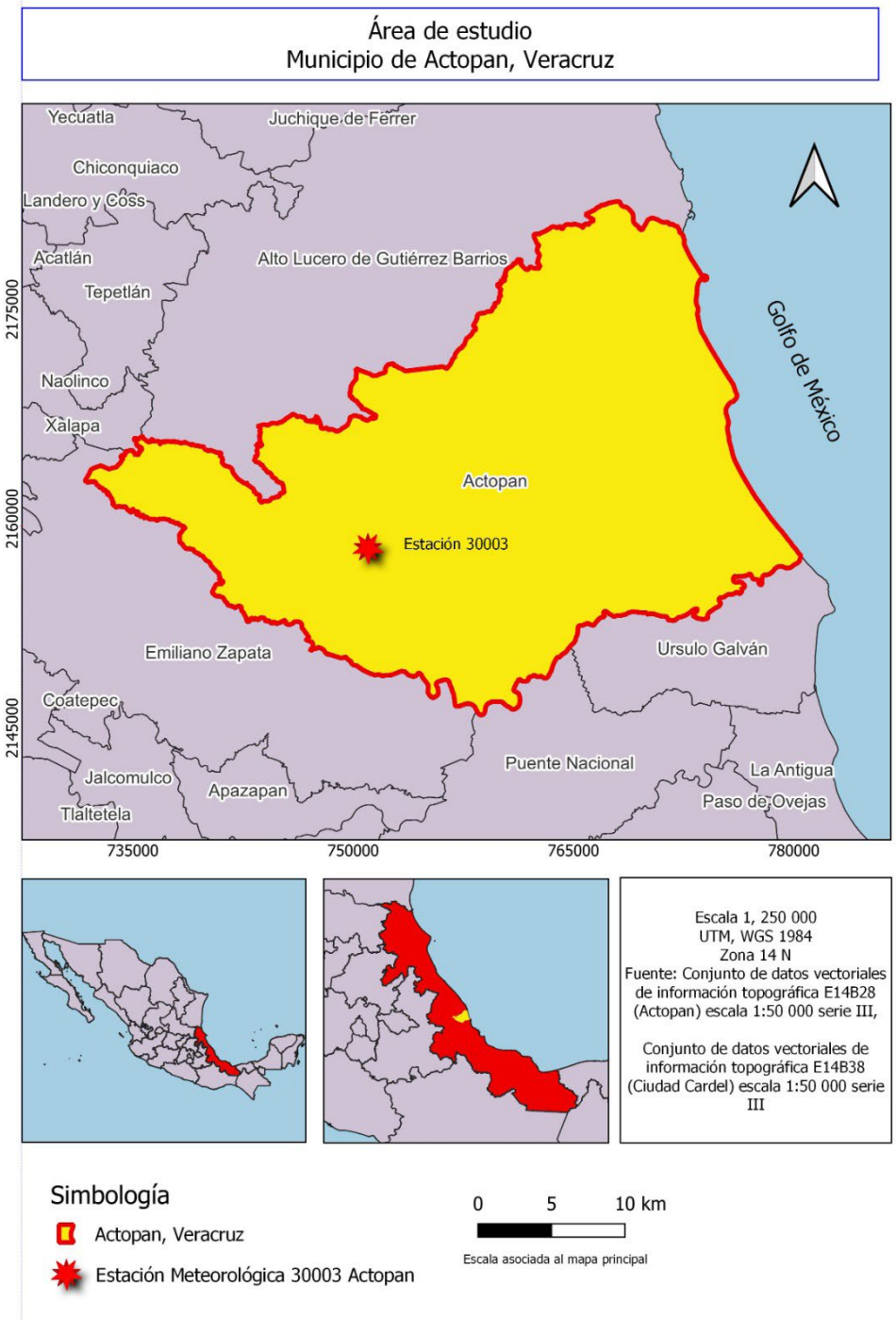
Área de estudio

El municipio de Actopan tiene una superficie de 859.5 km^2, delimitada entre las coordenadas geográficas 19°23'y 19°44'de latitud norte y 96°20'y 96°48'de longitud oeste (Figura 1). El clima preponderante es cálido subhúmedo con lluvias en verano (93% del territorio) y en menor superficie (7%) se encuentra el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (SEFIPLAN, 2021). De acuerdo con las normales climatológicas 1991-2020 del Servicio Meteorológico Nacional, la temperatura media anual es de 25°C y las temperaturas mínima y máxima promedio de 18.9 y 31.2°C, respectivamente (SMN, 2023). Su altitud varía de 0 a 800 msnm. En la zona montañosa de origen volcánico (norte, centro, poniente del municipio) se cultivan principalmente chayote y mango, mientras que en la planicie (zona costera), predominan la ganadería bovina y el cultivo caña de azúcar (Cisneros-Solano, 2016).

Recopilación de datos

Los datos meteorológicos analizados en este trabajo se obtuvieron a través de un requerimiento explícito a la Gerencia Regional Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La información analizada corresponde a la estación climatológica denominada Actopan (clave 30003), perteneciente al municipio de Actopan, Veracruz

y tomada de CLICOM (CLImate COMputing Project: sistema de software de datos climatológicos desarrollado por Naciones Unidas). Esta se localiza en las coordenadas 19°30'10" latitud norte y 96°36'40" longitud oeste (Figura 1), a 250 msnm y pertenece a la cuenca del río Actopan y subcuenca río Actopan-Barra de Chachalacas (IMTA, 2022). Se seleccionó esta estación climatológica porque cuenta con datos de un periodo de tiempo relativamente amplio, comparado con otras estaciones que se encuentran en la región central de la vertiente del Golfo de México, donde la información meteorológica generalmente es escasa (Tejeda-Martínez, Pérez-Méndez, *et al.*, 2020).



► **Figura 1.** Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La información obtenida corresponde a diarios de las variables cuantitativas temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) y precipitación (Prec) para el periodo de 1952 a 2019. Las variables temperatura máxima y mínima se refieren a la temperatura máxima y mínima registrada por día en grados Celsius (°C), respectivamente; y la variable precipitación es la precipitación total diaria en milímetros (mm).

Análisis de control de calidad (QC)

La Organización Mundial de Meteorología (OMM) recomienda evaluar el QC de las series de tiempo antes de proceder con cualquier análisis climático. Algunos de los problemas más comunes que suelen detectarse mediante este análisis previo son (OMM, 2020): la ausencia de un gran número de datos, valores erróneos, comportamientos o tendencias sospechosos (e.g., Tmax en un día < Tmin en un día, valores de precipitación negativos, *outliers* que sobresalen del rango intercuartílico, muchos valores iguales consecutivos) que podrían afectar los análisis consecutivos de los datos. Se llevó a cabo un QC de los datos diarios para las variables Tmax, Tmin y Prec con el programa RStudio (RStudio, 2021) y el paquete RClimDex (Zhang & Feng, 2004). Los valores erróneos de las bases de datos de las variables Tmax, Tmin y Prec fueron reemplazados como datos no observados.

Análisis de homogeneización

Después de realizar el QC, se recomienda probar la homogeneidad de la serie de tiempo, ya que la homogeneidad de los datos climáticos a través del tiempo incide directamente en la posibilidad o no de calcular y analizar tendencias (Groisman *et al.*, 2005). Esto resulta relevante en los estudios de CC, pues permite verificar que las series de tiempo de las estaciones estén representando señales asociadas al sistema climático en la zona correspondiente y que no se deben a errores de edición, medición, desplazamiento de la estación, cambio del medio circundante a la estación, entre otros (OMM, 2020).

En este estudio se realizó un proceso de homogeneización estadística, el cual procede cuando se observan saltos en las series temporales y se realizan cálculos para hacer correcciones estadísticas, ya que no fue posible obtener información sobre la estación meteorológica que pudiera indicar una posible causa de alteración, debido a algún componente en la medición de las variables (e.g., cambios en ubicación de un emplazamiento, en el entorno local, en los instrumentos, en el observador, en los procedimientos de observación, en el proceso de los datos, así como errores de digitalización o en las bases de datos) (OMM, 2020).

Las pruebas de homogeneidad y homogeneización se llevaron a cabo para las variables Tmax, Tmin con el programa RStudio (RStudio, 2021) y el paquete de análisis estadístico RHtest V4 (Wang & Feng, 2013). En el caso de la variable Prec, se utilizó el paquete RHtests_dlyPrcp (Wang & Feng, 2013). Para ello, se utilizaron los archivos corregidos, obtenidos del proceso de QC. El programa RHtestV4 aplica diversas pruebas de detección de rupturas, teniendo en cuenta autocorrelaciones y la distancia respecto de los bordes. Este permite homogeneizar conjuntos de datos sin estaciones de referencia. En los casos donde la red de estaciones es demasiado dispersa y no hay referencias que en la práctica puedan utilizarse, la única opción es la homogeneización absoluta mediante programas computacionales como RHtests (OMM, 2020). Este paquete de software se puede utilizar para detectar y ajustar múltiples puntos de cambio o corte que podrían existir en una serie de datos que pueden tener errores autorregresivos de primer orden (Wang & Feng, 2013).

De acuerdo con lo descrito por Wang & Feng (2013), estos análisis estadísticos se basan en la prueba t máxima penalizada y la prueba F máxima penalizada, que están integradas en un algoritmo de prueba recursiva, con la autocorrelación de retardo-1

(si existe) de las series de tiempo que se contabilizan empíricamente. La serie de tiempo que se está probando puede tener tendencia cero o una tendencia lineal a lo largo de todo el periodo de registro.

Comportamiento estacional de las variables climáticas

Se realizó un diagrama de Walter y Lieth para el periodo de datos 1960-2019, el cual describe el comportamiento estacional de las variables Prec y temperatura promedio, para esto se utilizó el programa R versión 4.2.2 (R Core Team, 2022) y la librería Climatol version 4.0.0 (Guijarro, 2023). Además, se realizó un climograma clásico con el programa Excel para observar el comportamiento mensual de las variables Tmax, Tmin y Prec.

Cálculo de las anomalías de las temperaturas máxima y mínima

Una anomalía es la diferencia o desviación de un valor con respecto al promedio de un periodo de referencia. Su observación a lo largo de un periodo de tiempo constituye un indicador de CC (OMM, 2017). Se calcularon y graficaron las anomalías anuales para las variables Tmax y Tmin por año, usando décadas completas (periodo de 1960 a 2019). El valor de referencia corresponde al promedio anual de cada variable para el periodo de datos de 1960-1990. Se empleó el test no paramétrico de Mann-Kendall para verificar la existencia de tendencias significativas en las series de tiempo de cada variable, utilizando el programa RStudio (RStudio, 2021). Si el p-valor es menor que el nivel de alfa establecido, la hipótesis nula (H0: no existe una tendencia) es rechazada. Por tanto, el rechazo de H0 indica que existe una tendencia en la serie de tiempo.

Cálculo y tendencia de índices climáticos

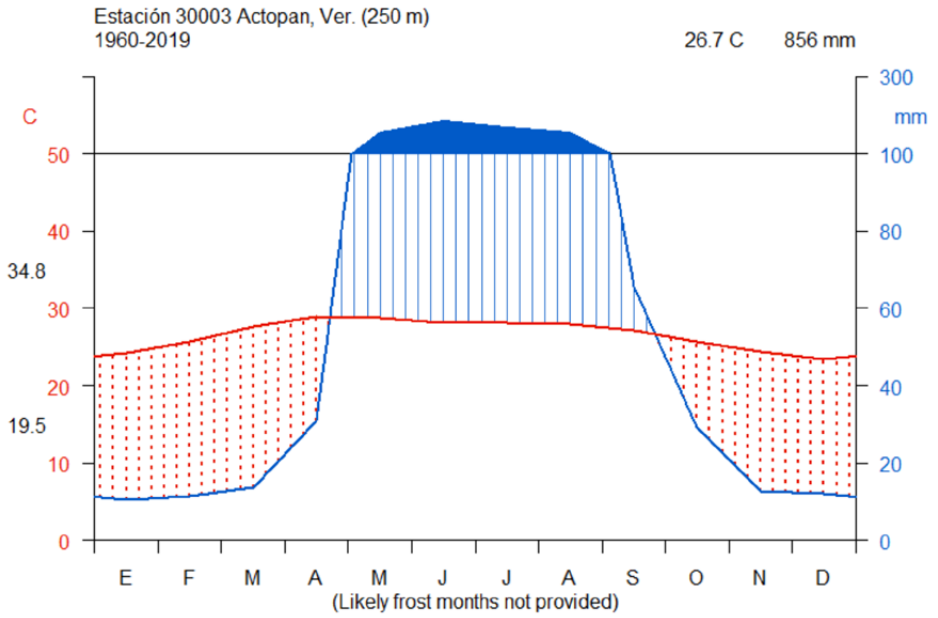
Se calculó el conjunto de 27 índices climáticos básicos sugeridos por el ETCCDMI (Zhang & Feng, 2004) y su tendencia para el total de datos del periodo 1952-2020, con el programa RClimDex (Tabla 1). Estos índices son derivados de datos diarios de Tmax, Tmin y Prec y se enfocan en los valores extremos (Peterson, 2005). La observación de dichos índices en un periodo de tiempo permite detectar cambios en estos indicadores y si existe una tendencia a lo largo del tiempo, que sugieran cambios en el clima, sin que pueda ser atribuido al CC.

Resultados

Se obtuvieron los valores con los errores corregidos por el QC y el proceso de homogeneización estadística de las variables Tmax, Tmin y Prec, y se trabajó con las series corregidas. De acuerdo con los datos obtenidos, la precipitación anual promedio del periodo es de 856 mm, con un patrón de tipo monzónico. Los valores máximos de precipitación ocurren en verano, en los meses mayo a agosto (época de lluvias), registrándose el mayor valor en junio. La menor cantidad de precipitación ocurre de septiembre a abril (época de secas), siendo febrero el mes más seco (Figura 2).

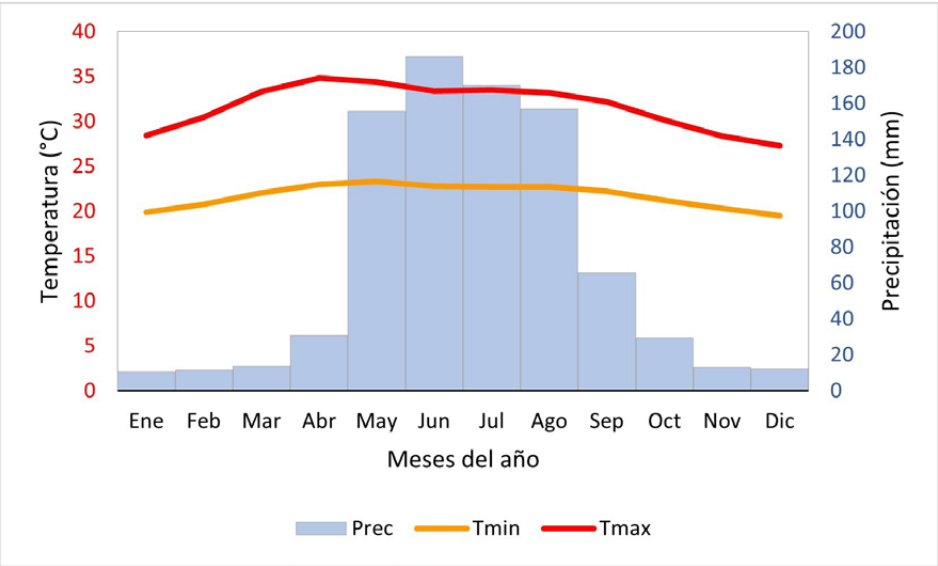
La temperatura promedio para el periodo 1960-2019 es de 26.7 °C, misma que oscila entre 19.5°C y 34.38°C a lo largo del año (Figura 2). Los meses más cálidos son abril y mayo, mientras que los más fríos son diciembre y enero. Los valores más altos de Tmax y Tmin se alcanzan durante los meses de abril y mayo y los más bajos, para ambas variables, ocurren en diciembre y enero (Figura 3).

Con respecto a las anomalías de temperatura, se detectó una tendencia positiva significativa en la Tmax (tau = 0.359, p-value < 0.05). Se observa que a partir del año 1982 han sido más frecuentes los años que han registrado un aumento en la Tmax promedio, con respecto al valor promedio (31.36°C) del periodo de referencia (Figura 4).



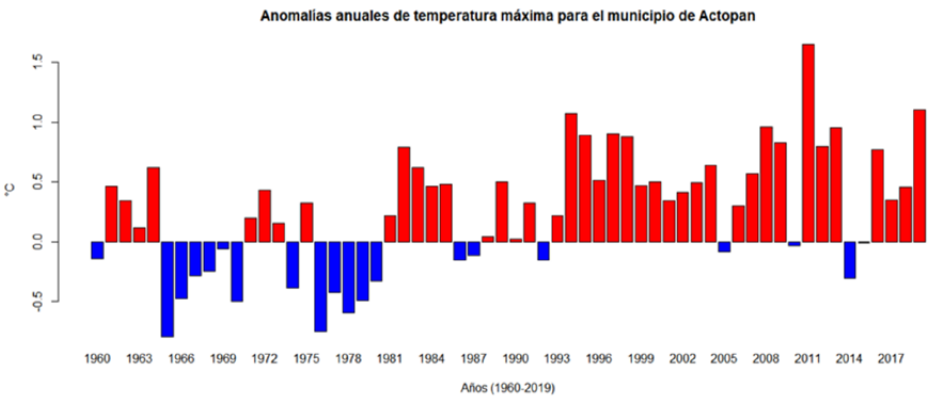
► **Figura 2.** Diagrama de Walter y Lieth para la estación de Actopan.

**Nota. La línea roja corresponde a la temperatura promedio.*
Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (1960-2019).



► **Figura 3.** Climograma de los promedios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación para la estación de Actopan.

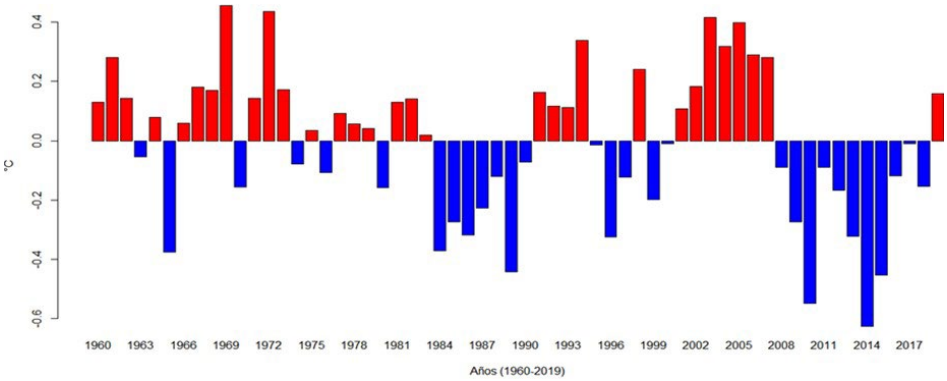
Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (1960-2019).



► **Figura 4.** Anomalías de la temperatura máxima para la estación de Actopan.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (1960-2019).

En los últimos 10 años, se detectaron diferencias de hasta -0.6°C en la Tmin, con respecto al valor del periodo de referencia (Figura 5). Sin embargo, la serie no muestra una tendencia significativa (tau =-0.161, p-value > 0.05).



► **Figura 5.** Anomalías de la temperatura mínima para la estación de Actopan.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (1960-2019).

Los valores obtenidos para cada uno de los índices climáticos se muestran en la Tabla 1. Sólo cinco índices resultaron estadísticamente significativos (p<0.05): valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (TNx), número de días cálidos (TX90p), duración del periodo cálido (WSDI), duración de la ola de frío (CSDI) y días secos consecutivos (CDD).

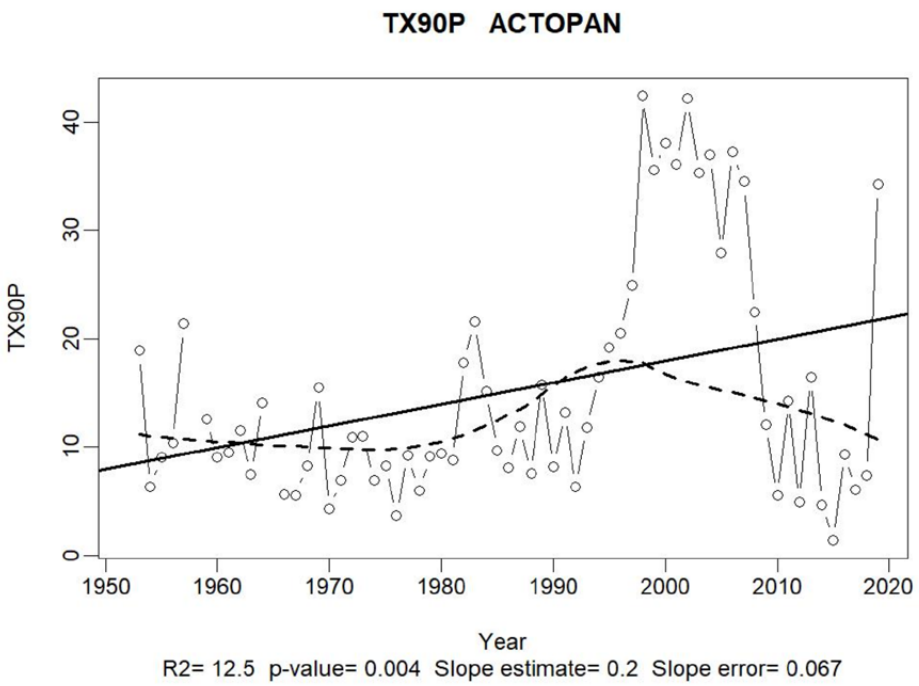
Tabla 1. Índices climáticos para la estación de Actopan.

Índice	Descripción	Pendiente	Desviación estándar	p-valor
Días de heladas (FD0)	Número de los días en los que la temperatura mínima diaria es menor que cero.	0	0	NaN
Días de verano (SU25)	Número de días en los que la temperatura máxima del día supera los 25°C.	-0.034	0.063	0.596
Días de hielo (ID0)	Número de días en los que la temperatura máxima diaria es menor que 0°C.	0	0	NaN
Noches tropicales (TR20)	Número de días en que la temperatura mínima diaria es mayor que 20°C.	0.027	0.235	0.909
Duración de la temporada de crecimiento (GSL)	Número de días entre la primera ocurrencia de al menos seis días consecutivos en que la temperatura media del día es mayor a 5°C y la primera ocurrencia después del 1° de julio en que al menos seis días consecutivos la temperatura media del día es menor que 5°C.	-0.001	0.003	0.859
Tmax Max (TXx)	Valor máximo de la temperatura máxima diaria del mes (°C).	-0.006	0.011	0.565
Tmin Max (TNx)	Valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (°C).	-0.018	0.005	0.001**
Tmax Min (TXn)	Valor mínimo de la temperatura máxima diaria.	0.004	0.015	0.769
Tmin Min (TNn)	Valor mínimo de la temperatura mínima diaria.	0.019	0.011	0.088
Noches frescas (TN10p)	Porcentaje de días en que la temperatura mínima diaria es menor al valor del percentil 10 del día calendario centrado en una ventana de cinco días.	0.024	0.031	0.435
Días frescos (TX10p)	Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria es menor al valor del percentil 10 del día calendario centrado en una ventana de cinco días.	0.035	0.027	0.211
Noches cálidas (TN90p)	Porcentaje de tiempo (días) en que la temperatura mínima diaria es mayor al percentil 90 del día calendario centrado en una ventana de cinco días.	0.075	0.065	0.252
Días cálidos (TX90p)	Porcentaje de días en que la temperatura máxima diaria es mayor al percentil 90 del día calendario centrado en una ventana de cinco días.	0.2	0.067	0.004**
Duración del período cálido (WSDI)	Número de días por período donde, en intervalos de al menos cinco días consecutivos, la temperatura máxima diaria es mayor al percentil 90.	0.481	0.134	0.001**
Duración de la ola de frío (CSDI)	Número de días por período donde, en intervalos de al menos seis días consecutivos, la temperatura mínima diaria es menor al percentil 10.	0.118	0.043	0.008**
Rango de temp diurna (DTR)	Diferencia entre la temperatura máxima y mínima por periodo (°C).	0.005	0.005	0.3

Índice	Descripción	Pendiente	Desviación estándar	p-valor
Prec máxima en un día (RX1day)	Cantidad de precipitación diaria (mm).	0.115	0.296	0.7
Prec máxima en cinco días (Rx5day)	Cantidad máxima de precipitación en un periodo de cinco días (mm).	-0.321	0.492	0.516
Índice de intensidad simple (SDII)	Conteo del número de días húmedos por periodo donde la precipitación es mayor o igual a 1mm (mm /día).	-0.013	0.017	0.459
Días con precipitaciones fuertes (R10)	Conteo del número de días en los que la precipitación diaria es mayor o igual a 10mm.	-0.055	0.035	0.123
Días con precipitaciones intensas (R20)	Conteo del número de días en los que la precipitación diaria es mayor o igual a 20mm.	0.008	0.024	0.758
Días por encima de 25 mm (R25)	Conteo del número de días en los que la cantidad de precipitación diaria es mayor o igual que cualquier valor razonable de la precipitación diaria (25mm).	0.001	0.022	0.972
Días secos consecutivos (CDD)	Conteo del número de días consecutivos más largo en que la precipitación diaria es menor que 1mm.	-0.247	0.12	0.044**
Días lluviosos consecutivos (CWD)	Conteo del número de días consecutivos más largo en que la precipitación diaria es mayor o igual que 1mm.	0.002	0.02	0.908
Días muy húmedos (R95p)	Conteo del número de días consecutivos más largo en que la precipitación diaria es mayor o igual que el percentil 95.	-0.569	1.023	0.58
Días extremadamente húmedos (R99p)	Conteo del número de días consecutivos más largo en que la precipitación diaria es mayor o igual que el percentil 99.	0.185	0.754	0.807
Prec total anual en días húmedos (PRCPTOT)	Cantidad de precipitación en días húmedos (mm).	-0.727	1.325	0.585

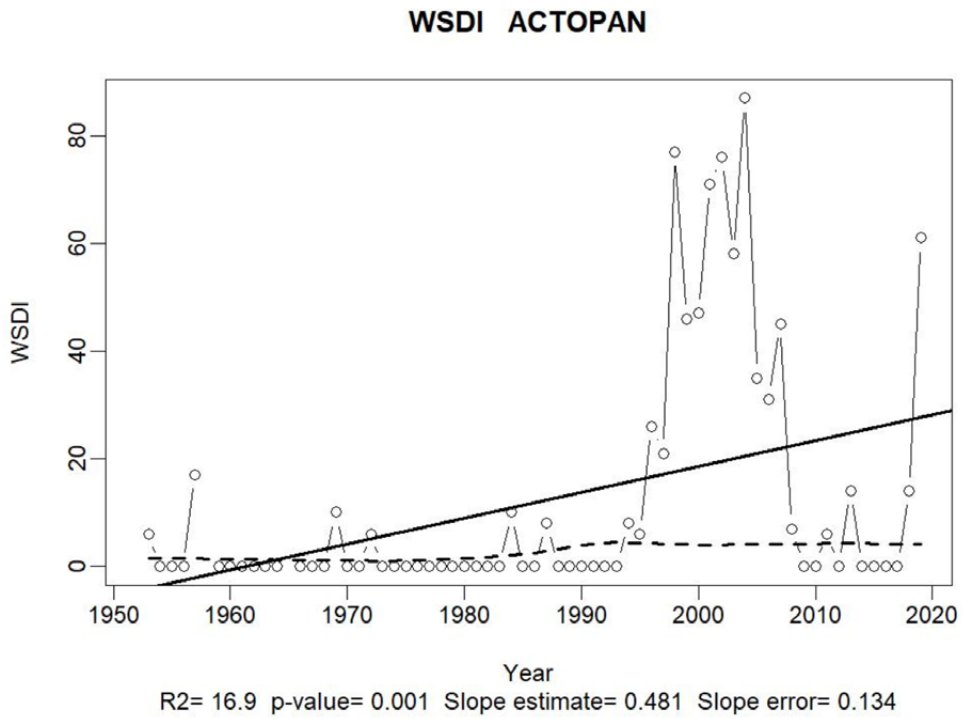
*Nota: ** Valor estadísticamente significativo (p <0.05).*
Fuente: Cálculos propios con datos de CONAGUA (1952-2019).

Los índices climáticos que mostraron una tendencia positiva significativa (p<0.05), es decir, un aumento a lo largo del periodo estudiado, fueron el número de días cálidos (TX90p) (Figura 6), la duración del periodo cálido (WSDI) (Figura 7) y la duración de la ola de frío (CSDI) (Figura 8).



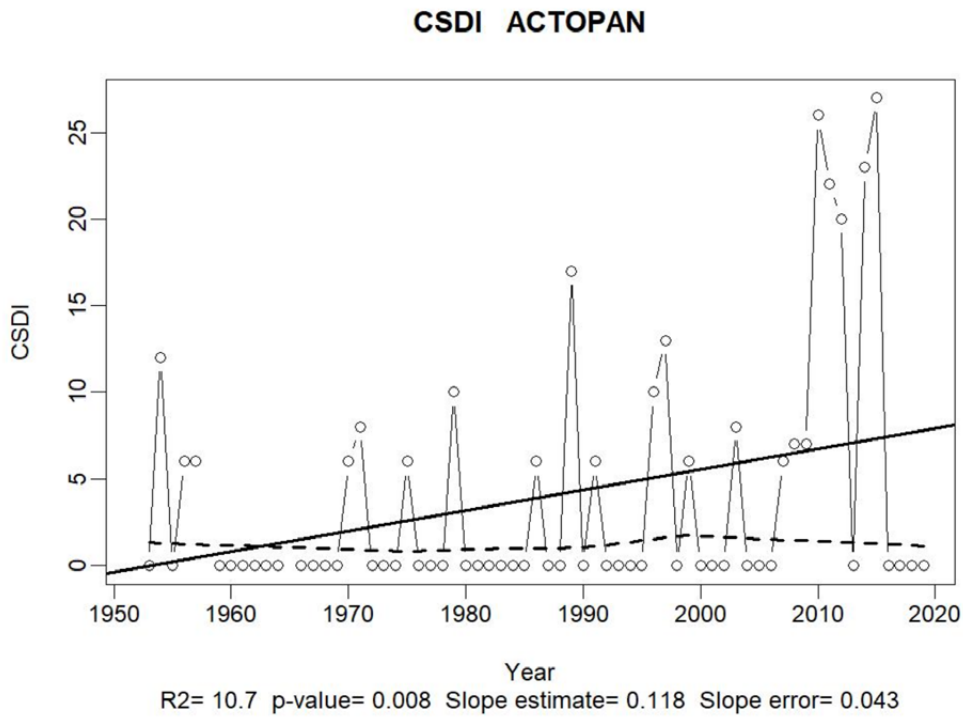
► **Figura 6.** Número de días cálidos (TX90p).

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 7.** Duración del periodo cálido (WSDI).

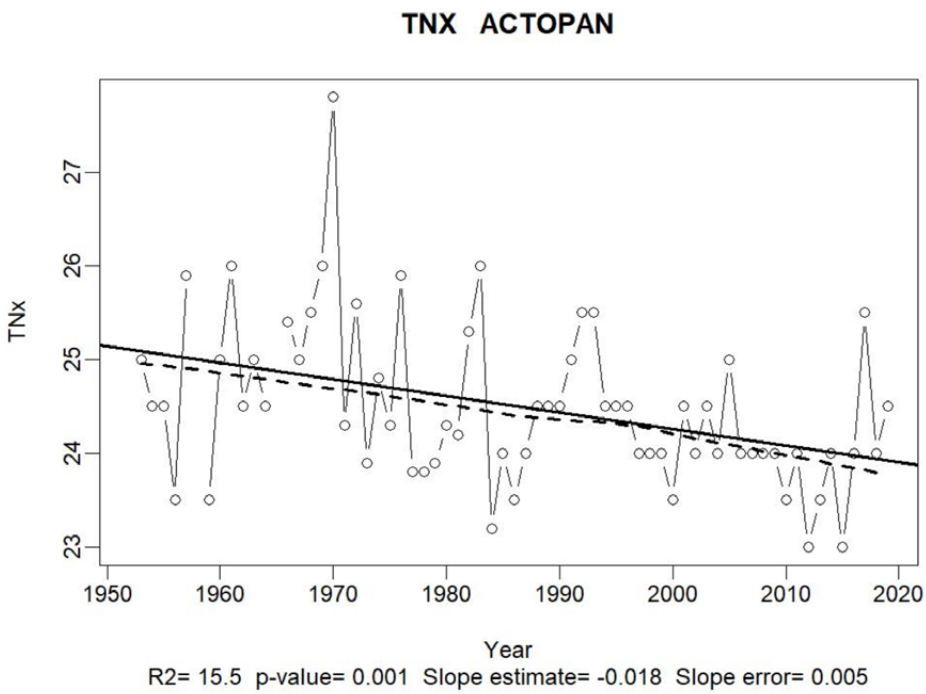
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 8.** Duración de la ola de frío (CSDI).

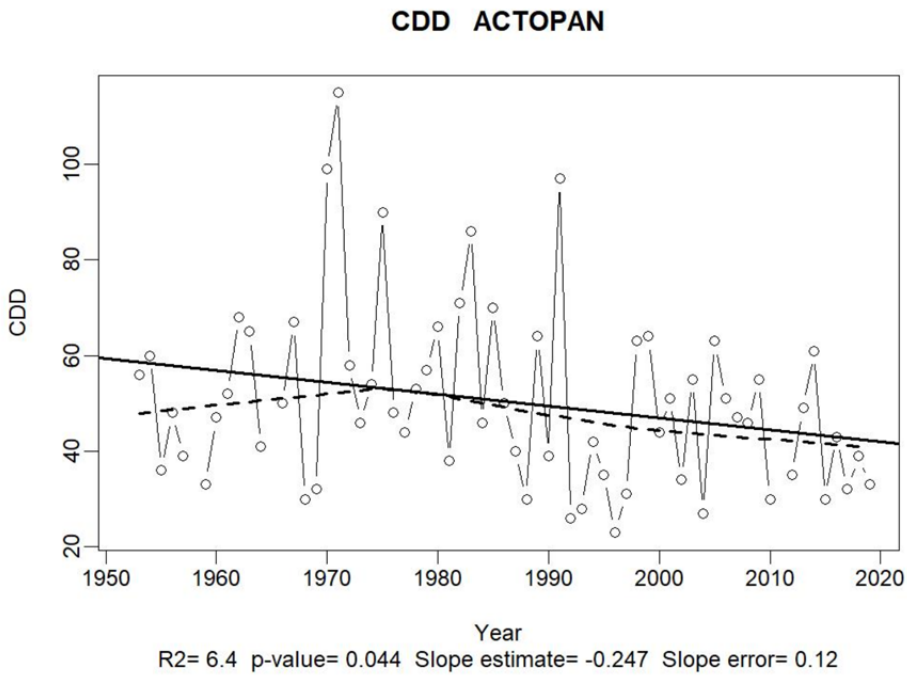
Fuente: Elaboración propia.

Los índices que presentaron una tendencia negativa significativa ($p<0.05$), esto es una disminución a lo largo del tiempo, fueron: el valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (TNx) (Figura 9) y los días secos consecutivos (CDD) (Figura 10).



► **Figura 9.** Valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (TNx).

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 10.** Días secos consecutivos (CDD).

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Comportamiento general de las variables climáticas

El Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (UV, 2009) reportó que el ciclo anual de la temperatura y la precipitación cambia en el territorio veracruzano. En general, el mes de enero es el más frío, mientras que mayo es el más cálido para el centro (aquí se ubica Actopan) y sur del estado; y junio, para el norte. Esta diferencia se explica por la invasión paulatina de las masas de aire tropical de sur a norte, concordando con los resultados obtenidos en este trabajo.

Por otra parte, la región central de la vertiente del Golfo de México, donde se encuentra la zona de estudio, presenta lluvias de menor intensidad de octubre a abril, comparadas con el periodo de mayo a noviembre, donde se presentan los valores de precipitación más altos (Tejeda-Martínez, Pérez-Méndez *et al.*, 2020), lo que coincide con el presente estudio.

Anomalías en la temperatura

El análisis de las anomalías de la temperatura mostró un incremento significativo de la temperatura máxima, lo que indica un calentamiento en el área de estudio. Se dificulta la comparación con otros trabajos, por los periodos de tiempo estudiados y el uso de la variable temperatura media, en lugar de la temperatura máxima y mínima, que se emplearon en este trabajo. En general, los resultados obtenidos son similares a los de Estrada-Porcayo *et al.* (2023), quienes encontraron anomalías en la temperatura media de México en el año 2020, que están en el rango de 1.59 a 1.81°C (dependiendo de la base de datos utilizada), tomando como referencia el periodo 1900-1930. Estas anomalías varían espacialmente, registrándose mayores incrementos de la temperatura en el norte y sureste del país.

A nivel global, también se reportó un incremento de la temperatura de la superficie en el año 2022, en comparación con el promedio a largo plazo del periodo 1951-1980 y una anomalía promedio anual de entre 0.89°C y 1.6°C (NASA, 2023).

Índices climáticos de temperatura

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran un aumento a lo largo del tiempo del número de días cálidos (TX90p) y de la duración del periodo cálido (WSDI), unido a una disminución del valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (TNx). Esto muestra una tendencia de calentamiento en la zona de estudio y coincide con lo reportado para el índice TX90p en áreas urbanas de México, durante el periodo 1980-2010 (García-Cueto *et al.*, 2019). Se observó una tendencia similar para la república mexicana, donde los días cálidos, en relación con el periodo de referencia (1961-1990), casi se han duplicado desde el año 1970, con diferencias entre las distintas regiones (Estrada-Porcayo *et al.*, 2023)

Por otra parte, Villa-Falfán *et al.* (2023) analizaron 18 estaciones climatológicas del estado de Veracruz, para el periodo 1979-2018, y encontraron un incremento en la tendencia de los índices temperatura máxima extrema (TXx), porcentaje de días con temperatura por encima del valor de la mediana (TXgt50p) y temperatura máxima de al menos 35°C (TXge35) en 56%, 89% y 67% de los sitios analizados, respectivamente. Estos resultados también sugieren un calentamiento en distintas zonas de esta entidad federativa. De manera similar, se encontró una clara tendencia de calentamiento, a través del análisis de varios índices climáticos para el periodo 1961-1994, en dos cuencas contrastantes de México: la del río Conchos, al norte del país, y la del río Usumacinta, al sur (Montero-Martínez *et al.*, 2018).

En este estudio también se registró un aumento de la amplitud de la oscilación térmica, coincidiendo con los hallazgos de Pita-Díaz & Ortega-Gaucin (2020) en el estado de Zacatecas (periodo 1976-2015). Esto se debe al incremento de la tendencia positiva significativa en la temperatura máxima y la tendencia decreciente en la temperatura mínima.

Los resultados obtenidos en este trabajo son congruentes con lo señalado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, quienes señalaron en su sexto reporte de evaluación que existe un aumento en el número de días y noches cálidas, así como una disminución en los días y noches frías en distintas regiones del planeta (Calvin *et al.*, 2023).

Índices climáticos de precipitación

El único índice climático de precipitación que tuvo una tendencia negativa significativa en este trabajo fue el de días secos consecutivos (CDD). Esto coincide, en lo general, con la tendencia negativa reportada para este índice en la mayoría de las estaciones climatológicas de las cuencas del río Conchos y del río Usumacinta, sin embargo, sólo fue estadísticamente significativa en dos estaciones de la cuenca del río Conchos (Montero-Martínez *et al*., 2018).

Los índices precipitación máxima en cinco días (Rx5day) y precipitación total anual en días húmedos (PRCPTOT) mostraron, en este estudio, una tendencia negativa no significativa, lo que coincide con los reportado por Villa-Falfán *et al*. (2023) para la estación Los Ídolos (300068), ubicada muy cerca de la estación Actopan (30003). También se encontró similitud con la cuenca del río Usumacinta, ubicada en el sureste de México, donde se observó una tendencia negativa no significativa, en 17 estaciones climatológicas de un total de 22 (Montero-Martínez *et al*., 2018).

Por otra parte, en la estación Los Ídolos (300068) se observó una tendencia negativa no significativa (Villa-Falfán *et al*., 2023) para el índice días con precipitaciones intensas (R20), en contraste con este trabajo que registró una tendencia positiva no significativa.

El análisis de los índices de precipitación para la ciudad de Veracruz, en el periodo de 1980-2010 (García-Cueto *et al*., 2018), no mostró tendencia para el total de días con precipitación igual o mayor a 25 mm (R25), similar a lo encontrado en este estudio. Tampoco se encontró tendencia para los días muy húmedos (R95p) (García-Cueto *et al*., 2018), lo que difiere de este trabajo que registró una tendencia negativa no significativa.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis de las anomalías de la temperatura mostró un incremento significativo de la temperatura máxima. También se registró una tendencia positiva significativa del número de días cálidos (TX90p) y de la duración del periodo cálido (WSDI), así como una tendencia negativa significativa del valor máximo de la temperatura mínima diaria del mes (TNx). Estos hallazgos en conjunto muestran una tendencia de calentamiento en Actopan, Veracruz, lo que coincide con las tendencias documentadas a escala nacional y global. Estos resultados contrastan con el incremento significativo de la duración de la ola de frío (CSDI), lo que sugiere que el clima de Actopan puede volverse más extremo si continúan dichas tendencias.

El único índice de precipitación que mostró una tendencia negativa significativa en este trabajo fue el de días secos consecutivos (CDD), lo que indica cambios en los patrones de precipitación.

A partir de los resultados obtenidos, se destaca la importancia de los estudios de detección de cambios en las variables climáticas a escala local, ya que estos permiten identificar los cambios y, a partir de ahí, se puede continuar con la etapa de identificación de las causas del cambio.

Los cambios en los patrones de temperatura y precipitación pueden tener impactos negativos en la salud de la población y los ecosistemas, así como en las actividades económicas, por lo que se recomienda difundir los resultados de este trabajo y diseñar e implementar estrategias de adaptación a dichos cambios.

» Referencias bibliográficas

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Ha, M. (2023a). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Cisneros-Solano, V. M. (2016). Despigmentación del chayote Sechium edule (Jacq) Sw en Actopan, Veracruz, México. *Agro Productividad*, 9(8).

Estrada-Porcayo, A. W., Ramírez-Sánchez, L. G., & Chávez-Alvarado, R. (2023). Clasificación de los paisajes físico-geográficos de la Unidad de Gestión Ambiental 33, Quintana Roo, México a escala 1:50000. *Estudios Geográficos*, 84(294), e130. https://doi.org/10.3989/estgeogr.2023136.136

ETCCDI. (2020). Cimate Change Indices. https://etccdi.pacificclimate.org/

García-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., López-Velázquez, E., Reyes-López, J., Cruz-Sotelo, S., & Ojeda-Benítez, S. (2019). Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2), 775–790. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2620-4

Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., & Razuvaev, V. N. (2005). Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal of Climate*, 18(9), 1326–1350. https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1

Guijarro, J. A. (2023). Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). In *CLIMATOL*. https://CRAN.R-project.org/package=climatol.

IMTA. (2022). *SIG ERIC*. http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/.

Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I., Pita-Díaz, Ó., & Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Advances in Science and Research*, 15, 231–237. https://doi.org/10.5194/asr-15-231-2018

NASA. (2023). *Global Climate Change*. https://climate.nasa.gov/global-warming-vs-climate-change/

OMM. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima* (1 vol.). Organización Meteorológica Mundual.

OMM. (2020). *Directrices sobre homogeneización*. Organización Metereológica Mundial.

ONU. (2020). *Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/

Peterson, T. C. (2005). Climate change indices. *World Meteorological Organization Bulletin*, 54(2), 83–86.

Pita-Díaz, O., & Ortega-Gaucin, D. (2020). Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico. *Climate*, 8(4), 55. https://doi.org/10.3390/cli8040055

R Core Team. (2022). *A language and enviromental for statical computing*. R Foundation for statical. R Studio. https://www.R-project.org/.

RStudio. (2021). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio. http://www.rstudio.com/

SEFIPLAN. (2021). Atopan. *Cuadernillos municipales*, 2021.

SMN. (2023). *Monitor de Sequía en México. Servicio Meteorológico Nacional*. CONAGUA. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico

Soto-Molina, V. H. (2014). *Glaciar norte del Citlaltépetl y su relevancia hidrológica para las localidades de la parte alta de la Cuenca Jamapa-Cotaxtla* [Tesis de maestría]. Universidad Veracruzana. https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/41964

Tejeda-Martínez, A., del Valle-Cárdenas, B., Welsh-Rodriguez, C. M., Ochoa-Martínez, C. A., & Méndez-Pérez, I. R. (2020). *Veracruz, una década ante el Cambio Climático*. Gobierno del Estado de Veracruz.

Tejeda-Martínez, A., Pérez-Méndez, M., & Méndez-Pérez, I. R. (2020). *Un Laboratorio Natural del Clima: Interacción Costa-Montaña en el Centro del Golfo de México* (É. Valencia-García, Ed.). Universidad Veracruzana. https://libros.uv.mx/index.php/UV/catalog/view/QC021/1470/1355-1

UV. (2009). Programa veracruzano ante el cambio climático. Título. Universidad Veracruzana. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164947/2009_vz_pacc.pdf

Villa-Falfán, C., Valdés-Rodríguez, O. A., Vázquez-Aguirre, J. L., & Salas-Martínez, F. (2023). Climate Indices and Their Impact on Maize Yield in Veracruz, Mexico. *Atmosphere*, 14(5), 778. https://doi.org/10.3390/atmos14050778

Wang, X., & Feng, Y. (2013). *RHtestsV4 user manual. Environment Canada Science and Technology Branch Atmospheric Science and Technology Directorate Climate Research*. Division Res. Rep.

Williams, M., & Eggleston, S. (2017). Uso de Indicadores para explicar nuestro clima cambiante a las instancias normativas y a la opinión pública. Organización Metereológica Mundial. https://wmo.int/es/media/magazine-article/uso-de-indicadores-para-explicar-nuestro-clima-cambiante-las-instancias-normativas-y-la-opinion

Zhang, X., & Feng, Y. (2004). *RClimDex Manual Usuario. Climate Research Branch Environment Canada Downsview.*

2 » Sección II Peligros hidrometeorológicos

2.1 Inventario multitemporal de flujos y deslizamientos en una montaña intertropical de México

Alejandro César Valdés Carrera
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México

Manuel E. Mendoza
Instituto de Geofísica, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México. Centre for Natural Hazard Research (CNHR), Department of Earth Science Simon Fraser University, Canada

Palabras Clave: Estrato volcán Pico de Tancítaro, Gestión del riesgo, Peligros hidrogeomorfológicos.
ODS: 13 y 15 Acción por el Clima y Vida de Ecosistemas Terrestres.

Introducción

Los procesos de remoción en masa en montañas intertropicales son frecuentes y principalmente detonados por lluvias torrenciales, sismos, vulcanismo y cambios en el uso de suelo. Estos procesos peligrosos tienen un alto impacto en la población humana, debido a que las zonas intertropicales concentran la mayor densidad poblacional a nivel mundial (Huddleston *et al*., 2003; Slaymaker & Embleton-Hamann, 2018; Terzi *et al*., 2019).

La comprensión de la distribución espacial de los procesos de remoción en masa apoya la adecuada gestión del riesgo (Solís-Castillo *et al*., 2019), para lo cual se requiere de la identificación y clasificación tipológica de los eventos en su contexto espacio-temporal (Alcántara-Ayala & Murillo-García, 2008). Se ha demostrado que los mapas de inventario sirven para documentar la extensión de los eventos de remoción en masa, conocer su distribución, tipología, patrones y recurrencia, lo que permite conformar una base estadística para los estudios de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo (Alcántara-Ayala & Murillo-García, 2008; Guzzetti *et al*., 2012; Solís-Castillo *et al*., 2019). La generación de cartografía de inventarios se basa en el uso de diferentes técnicas y herramientas de análisis espacial. La selección de las técnicas y herramientas depende del propósito del inventario, la extensión del área de estudio, la escala de la cartografía base, la escala de análisis, la resolución espacial, las características de los insumos (imágenes satelitales, fotografías aéreas, ortofotos), los recursos disponibles para la investigación, así como las habilidades y experiencia de los investigadores (Van-Westen *et al*., 2006, 2008).

Los mapas de inventario se han producido utilizando técnicas convencionales como el mapeo geomorfológico (Moreiras *et al*., 2008), la interpretación de fotografías aéreas (Harp *et al*., 2002; Moreiras, 2004) y la recopilación de información histórica (Murillo-García & Alcántara-Ayala, 2017). También, se han utilizado técnicas como el análisis morfológico del terreno mediante el uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución; y el análisis visual y multiespectral de imágenes satelitales, auxilián-

dose de herramientas como Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en Inglés), Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) y Sistema de Información Geográfica (SIG) (Guzzetti *et al*., 2012; Salinas-Jasso *et al*., 2018).

Las regiones montañosas intertropicales en México son zonas geomorfológicamente activas, afectadas frecuentemente por eventos de remoción en masa (CENAPRED, 2014; Enríquez-Guadarrama *et al*., 2010; Franco-Ramos *et al*., 2018). La mayoría de estos eventos han sido detonados por precipitaciones intensas que provienen del océano Pacífico y del Golfo de México, sismos y colapsos de laderas volcánicas, afectando negativamente a la población y generando grandes pérdidas económicas (Aceves-Quesada *et al*., 2016; Legorreta-Paulín *et al*., 2014; Macías, 2005). Los inventarios en las zonas montañosas de México se han desarrollado principalmente para identificar áreas susceptibles, zonificar áreas de peligro, analizar los factores detonantes y gestionar el riesgo de desastre por procesos de remoción en masa (Pola *et al*., 2014; Salinas-Jasso *et al*., 2018; Solís-Castillo *et al*., 2019). Las principales técnicas para el desarrollo de inventarios han sido la fotointerpretación, el trabajo de campo y el análisis espacial con el apoyo de SIG (García-Palomo *et al*., 2006; Ramos-Bernal *et al*., 2018; Salinas & López-Blanco, 2010).

En México, los estudios sobre procesos de remoción en masa se han impulsado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), dicho centro ha desarrollado el atlas de riesgo a nivel nacional, estatal y municipal (Guevara *et al*., 2014). Atendiendo al planteamiento de Enríquez-Guadarrama *et al*. (2010), quienes indican que la reducción de los daños y los riesgos asociados a esta amenaza requiere la elaboración de estudios espacio-temporales, de prevención y de mitigación. Lo cual permitirá prevenir el riesgo de desastre ante los eventos de remoción en masa, ocurridos en las zonas vulnerables y de difícil acceso (CENAPRED, 2014; Solís-Castillo *et al*., 2019).

Específicamente, el estado de Michoacán está sujeto a la influencia frecuente de ciclones tropicales cuya precipitación satura los suelos, desencadenando procesos de remoción en masa e inundaciones que afectan recurrentemente los asentamientos humanos y las vías de comunicación (CEPCM, 2023). Entre los eventos con mayores efectos desastrosos destacan las lluvias acumuladas en el mes de febrero del año 2010; la tormenta tropical Manuel y el huracán Ingrid del año 2013; así como el huracán Patricia del año 2015 (Alcántara-Ayala *et al*., 2012; CEPCM, 2023).

El estratovolcán pico de Tancítaro, ubicado en el estado de Michoacán, es frecuentemente afectado por lluvias de origen ciclónico, las cuales se presentan comúnmente de mayo a octubre (Fuentes-Junco *et al*., 2004). Estos eventos han afectado a la población de la región del Tancítaro, así como las vías de comunicación, zonas de cultivo y forestales. Por ejemplo, en el mes de octubre de 2015 el huracán Patricia provocó deslizamientos en tramos carreteros y el desbordamiento de cauces en las localidades de Peribán y Tancítaro (Magaña, 2015); así como también, en el mes de septiembre de 2018, la depresión tropical DT19E provocó el desbordamiento del río Cutio, a causa de la concentración de flujos de detritos, los cuales causaron pérdidas humanas y materiales en la localidad de Peribán (Arrieta, 2018; SMN, 2021b).

Debido a la problemática descrita, planteamos como objetivo realizar un inventario multitemporal de los procesos de remoción en masa en el estratovolcán pico de Tancítaro, considerando la evaluación de sus factores condicionantes y el análisis espacio-temporal de los eventos peligrosos.

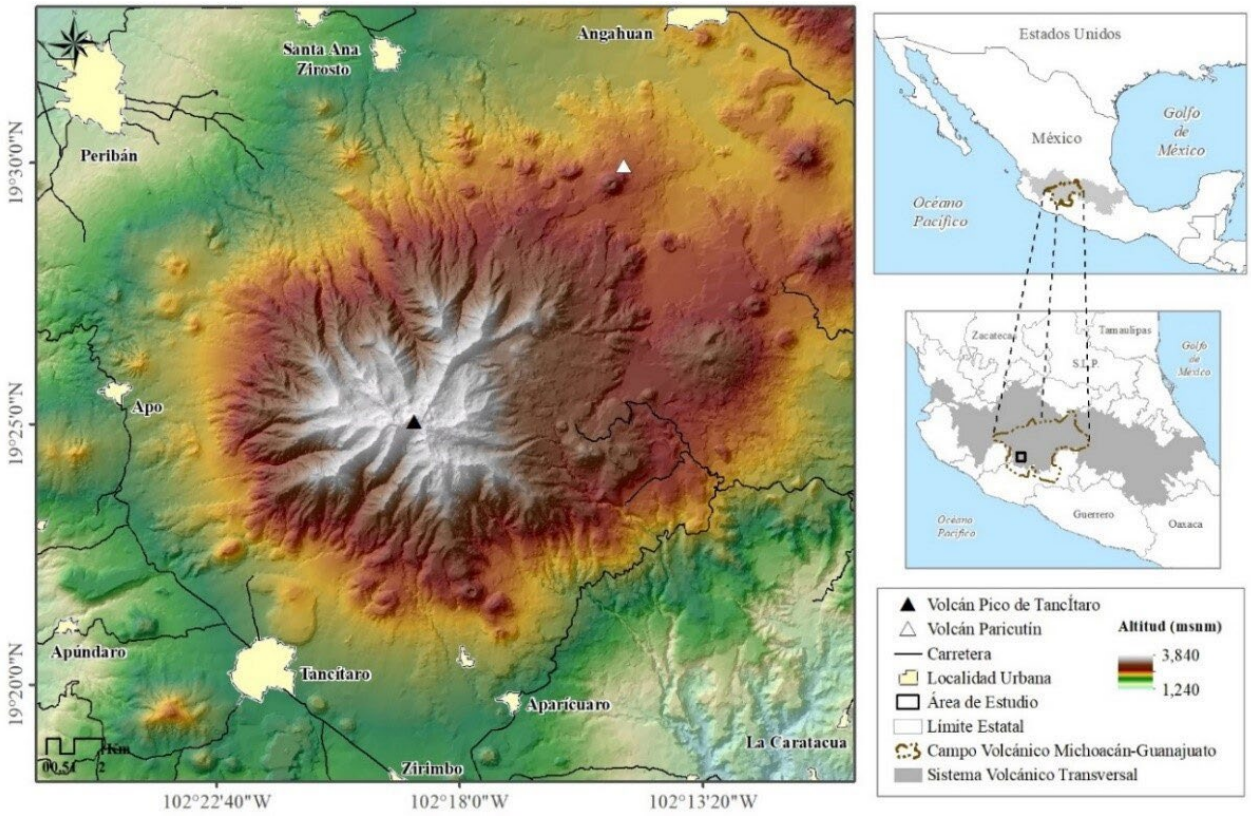
Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio cubre una superficie de 782 km^2, se ubica al oeste del estado de Michoacán entre las coordenadas: 102°10'12.36" y 102°26'26.49" de longitud oeste, y 19°33'01.49" y 19°18'06.02" de latitud norte. En la parte central del área se localiza el

estratovolcán pico de Tancítaro, la montaña con la mayor altitud en el estado (3,840 m s.n.m.), la cual forma parte de la provincia fisiográfica conocida como Sistema Volcánico Transversal (Figura 1), constituida por un relieve formado por rocas del Terciario y Cuaternario, caracterizado por la presencia de sistemas montañosos de origen volcánico y una tectónica activa generada por la subducción de la placa de Cocos y Rivera debajo de la placa Norteamericana (Larrea *et al*., 2019). Consecuentemente, hay una gran variedad de geoformas representadas por laderas, cimas, conos, domos, derrames, mesas y piedemontes; principalmente conformados por materiales volcánicos (ceniza y lavas), sobre los que se desarrollan Andosoles, Regosoles, Luvisoles, Leptosoles y Cambisoles (INEGI, 1983).

Los climas predominantes, desde la cima al pie de la montaña, son: semifríos subhúmedos C(w) (>3,000 msnm), templados subhúmedos con lluvias en verano C (w2) (2,000 a 3,000 msnm), semicálidos subhúmedos con lluvias en verano (A) C(w1) (1,600 a 2,000 msnm), y cálidos subhúmedos con lluvias en verano Aw0 (1,600 a 2,000 msnm) (Fuentes *et al*., 2004). A los cuales se asocian comunidades vegetales como: el bosque de pino de altura, pastizal de montaña, matorrales, bosque de oyamel, bosque mixto y bosque mesófilo de montaña (Medina-García *et al*., 2020). Además, forma parte del Área Natural Protegida con la mayor superficie a nivel estatal (23,405 ha) (Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro) (Fuentes-Junco *et al*., 2004). Dentro de su territorio se localizan cuatro municipios: Nuevo San Juan Parangaricutiro, Uruapan, Peribán y Tancítaro; donde viven 440,609 habitantes que se dedican principalmente al cultivo de aguacate y a la producción forestal maderable (Carlón- Allende *et al*., 2021; INEGI, 2021).



► **Figura 1.** Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de la INEGI (2013,2014).

Factores condicionantes de los procesos de remoción en masa

Los factores condicionantes fueron seleccionados con base en el método para la evaluación de susceptibilidad, peligro y riesgo por procesos de remoción en masa de Highland y Bobrowsky (2008) y Van-Westen *et al.* (2008). Estos factores están representados por las características geológicas, edáficas, geomorfológicas, inclinación y orientación de laderas, cobertura vegetal y uso de suelo, los cuales fueron analizados a escala 1:50,000 y fueron tomados de Valdés-Carrera (2024).

Inventario multitemporal de procesos de remoción en masa

El inventario multitemporal se basó en la interpretación visual a escala 1:50,000. Los insumos utilizados comprendieron el periodo de 1995 al 2020 y fueron ortofotos digitales con resolución 2m x 2m (INEGI, 1995); e imágenes satelitales Landsat-7 (2004-2020) con resolución de 30m x 30m (Google Earth Pro ©); imágenes SPOT 5,6,7 (2016-2019) con resolución de 2.5m x 2.5m y 1.5m x 1.5m del Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2016); e imágenes SENTINEL-3 (2020) con resolución de 10m x10m (COAH, 2020). Los procesos de remoción en masa fueron descritos con base en el sistema de clasificación de Cruden & Varnes (1996), actualizado por Hungr *et al.* (2014). Se realizó el mapeo de los eventos de remoción en masa, se diferenció el tipo de proceso, el material, la fecha y la velocidad de ocurrencia. La cartografía de los eventos de remoción en masa se validó mediante observaciones directas en campo de las cicatrices dejadas en el paisaje y de las características físico-geográficas de cada proceso de remoción en masa.

Resultados

Factores condicionantes de los procesos de remoción en masa

Los factores condicionantes de mayor antigüedad son las rocas, las estructuras y las formas del relieve. La actividad geológica de la zona de estudio corresponde al periodo Cuaternario. Durante el Pleistoceno Inferior (2.59 Ma-780 ka) se desarrollaron tres unidades litológicas (clave: z, aa, ab) de composición andesítica y andesítica basáltica. En este periodo destaca el inicio de la actividad eruptiva del estratovolcán pico de Tancítaro (793 +/- 22 ka). En el Pleistoceno Medio (780 ka-127 ka) se emplazaron el mayor número de unidades (g-y), cuya composición es predominantemente andesítica. La actividad efusiva más reciente del pico de Tancítaro se concentra en este último periodo (m, n). El Pleistoceno Superior (127 ka-10 ka) contempla cuatro unidades (g-j) con rocas de composición andesítica y andesítica basáltica. En el Holoceno (10 ka a la fecha) se formaron seis unidades (a-f) de litología andesítica y andesítica basáltica, en este periodo destaca la actividad del Paricutín (1943-1952 d.C). Durante el Pleistoceno Medio ocurrieron dos avalanchas compuestas por depósitos de escombros y hummocks, la más antigua se ubica al oeste (694 - 571 ka) y la más reciente al sureste (261 - 238 ka), la cual fue desencadenada por el colapso del flanco este del estratovolcán. Las fracturas en la zona de estudio siguen dos direcciones principales: NE-SO y SE-NO. Los aparatos volcánicos más abundantes son los conos de escoria y los domos de composición andesítica y andesítica basáltica.

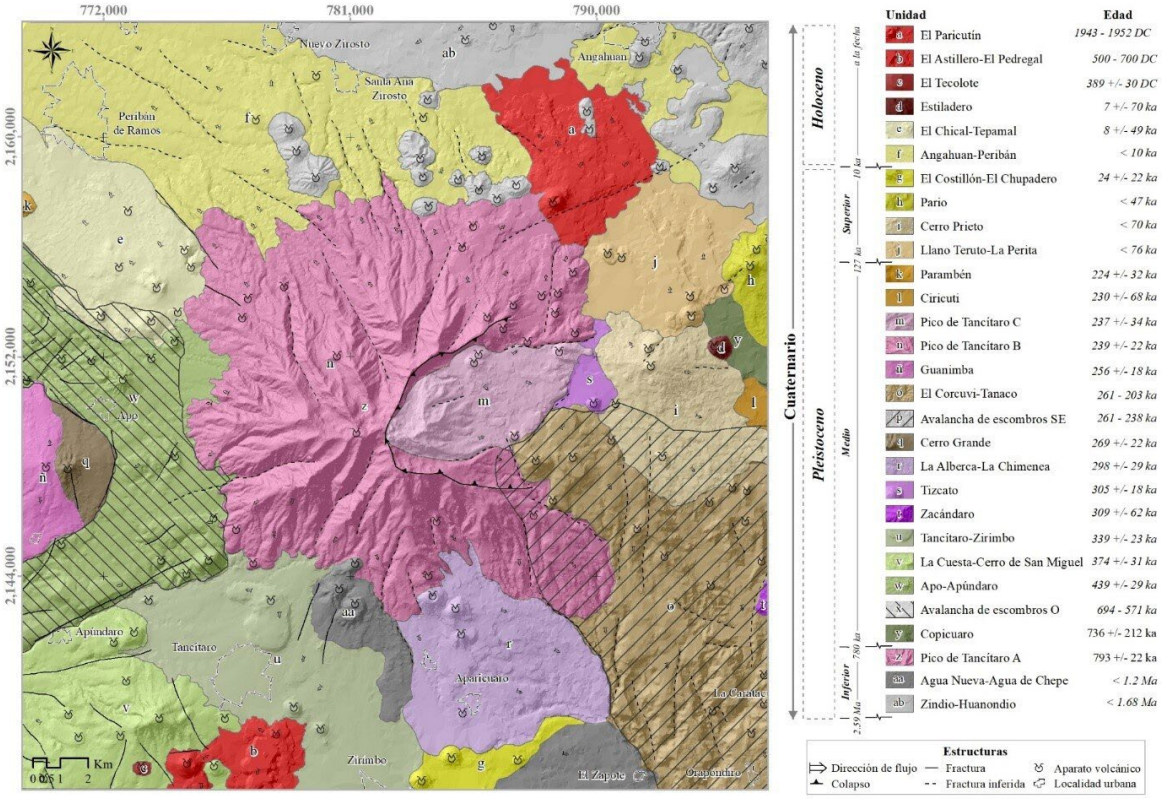
Su evolución y dinámica geológico-geomorfológica ubican a la zona de estudio en el ambiente morfogenético conocido como Sistema Volcánico Transversal. La investigación ha permitido identificar seis paisajes geomorfológicos. De los cuales el piedemonte representa la unidad de mayor superficie (382 km^2), ésta rodea la base del estratovolcán, conectando los lomeríos y colinas con las planicies y valles. Se diferencia según su altura relativa en superior e inferior y conforme al grado de disección en ligera, mediana o fuertemente disectado, presenta también valles fluviales. La unidad con la segunda mayor superficie es la montaña (133 km^2), está

representada por el estratovolcán pico de Tancítaro. En esta unidad se diferencian cimas en domo e irregulares, valles glaciares y fluviales, laderas muy escarpadas a escarpadas y medias a suaves. Los lomeríos representan la unidad con la tercera mayor superficie (117 km^2) y, al igual que las colinas que ocupan el cuarto lugar (80 km^2), se asocian a derrames lávicos antigüos y recientes, conos volcánicos, domos lávicos y valles fluviales. La unidad con el quinto lugar es la planicie (39 km^2), que está representada por planicies interlávicas y valles fluviales, estas unidades pueden observarse al noreste y sureste. Finalmente, con la menor superficie se encuentran los valles (31 km^2) que se dividen en laderas muy escarpadas a escarpadas y medias a suaves, terrazas y valles fluviales, concentrándose al sureste.

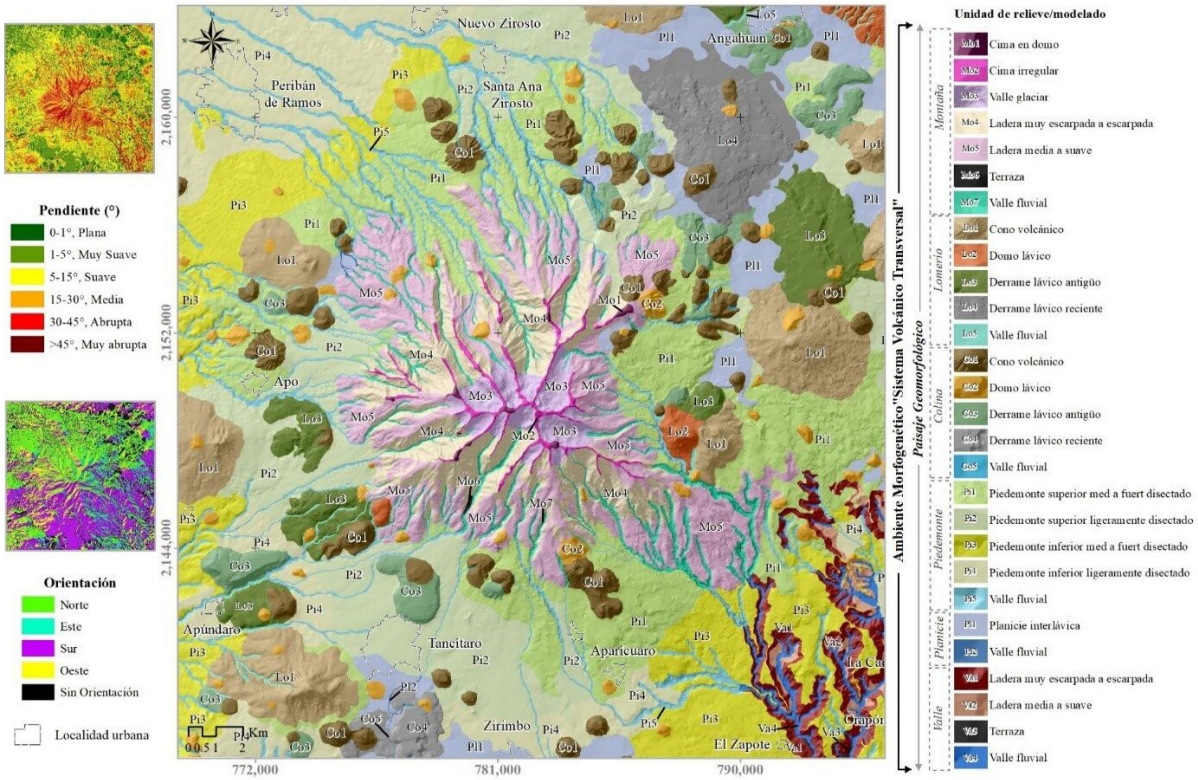
La estructura de las geoformas determina la orientación y la pendiente de las laderas, siendo indicadores claves en la evaluación de su estabilidad. Predominan las laderas con orientación sur (265 km^2), concentrándose al centro, sur y este; seguidas de las laderas orientadas al norte (223 km^2), localizándose al norte y oeste del área; al noreste y suroeste se localizan las superficies sin orientación (118 km^2); al noroeste, oeste y suroeste se encuentran las laderas con orientación oeste (100 km^2); por último, al este y norte las laderas, orientadas al este (69 km^2). En la zona de estudio predominan las pendientes suaves, entre 5 y 15° (295 km^2), y las medias, entre 15 y 30° (181 km^2), representativas del piedemonte, las terrazas y las laderas medias y suaves. Las pendientes de 0 a 1° fueron clasificadas como planas (127 km^2) y las pendientes entre 1 y 5° como muy suaves (106 km^2), coincidiendo con las planicies y los fondos de valles. Las pendientes de 30 a 45° (abruptas) (63 km^2) y mayores a 45° (muy abruptas) (10 km^2) están asociadas a las laderas del estratovolcán pico de Tancítaro.

Los suelos representan uno de los factores condicionantes de moderada estabilidad. El grupo predominante es el Andosol (578 km^2), presentando tipos como el húmico, ócrico, mólico y vítrico, se distribuyen principalmente en el estratovolcán pico de Tancítaro. Los Regosoles (110 km^2), dístricos y eútricos, se distribuyen al norte y este. Los Leptosoles (41 km^2) se localizan en las cimas del estratovolcán pico de Tancítaro y en los derrames lávicos recientes. Los Luvisoles (35 km^2) crómicos se concentran al sureste. Finalmente, los Cambisoles (15 km^2) crómicos y húmicos (noroeste, centro); los Fluvisoles (1 km^2) eútricos (sureste), y los Vertisoles (0.4 km^2) Pélicos (noroeste), representan los tipos de suelo que cubren las menores superficies.

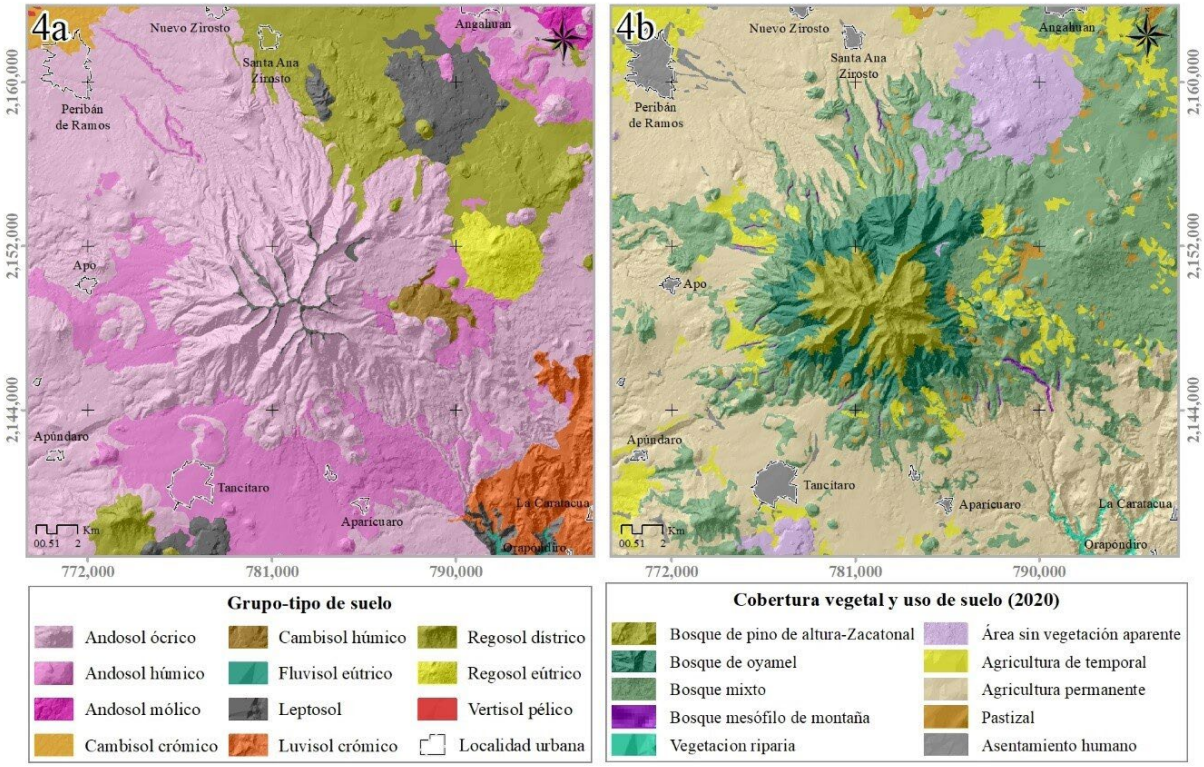
El factor condicionante más joven, y de mayor dinamismo, está constituido por la cobertura vegetal y el uso de suelo. En el área predomina el bosque mixto (247 km^2), representado por la asociación de pinos, encinos, ailes, enebros, madroños y tepozanes, se localiza en las laderas medias y suaves del estratovolcán pico de Tancítaro, así como sobre derrames, lomeríos y colinas al suroeste, oeste y este. Posteriormente, se registra el bosque de oyamel (45 km^2) que se desarrolla en las laderas del estratovolcán; a las áreas sin vegetación aparente (40 km^2) que coinciden con los derrames lávicos recientes; y al Bosque de pino de altura-Zacatonal (28 km^2), distribuido en las cimas y valles glaciares del estratovolcán pico de Tancítaro. Con la menor cobertura se encuentran la Vegetación riparia (3 km^2) y el Bosque mesófilo de montaña (2 km^2). La agricultura permanente de aguacate y cítricos cubre la mayor superficie (332 km^2) y se ubica, principalmente, en el piedemonte (norte, oeste, sur y sureste); seguida por la agricultura de temporal (60 km^2) de maíz y hortalizas, la cual está localizada al noroeste, noreste, este, sur, suroeste y oeste; los asentamientos humanos se ubican al pie del volcán (15 km^2) y el pastizal (11 km^2) está localizado al centro, este y noreste (Figura 2,3, 4a,4b).



► **Figura 2.** Mapa geológico con elementos estructurales del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 3.** Mapa de unidades de relieve, pendientes y orientación de laderas del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 4.** 4a) Grupo-tipo de suelo, 4b) Cobertura vegetal y uso de suelo (2020) del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

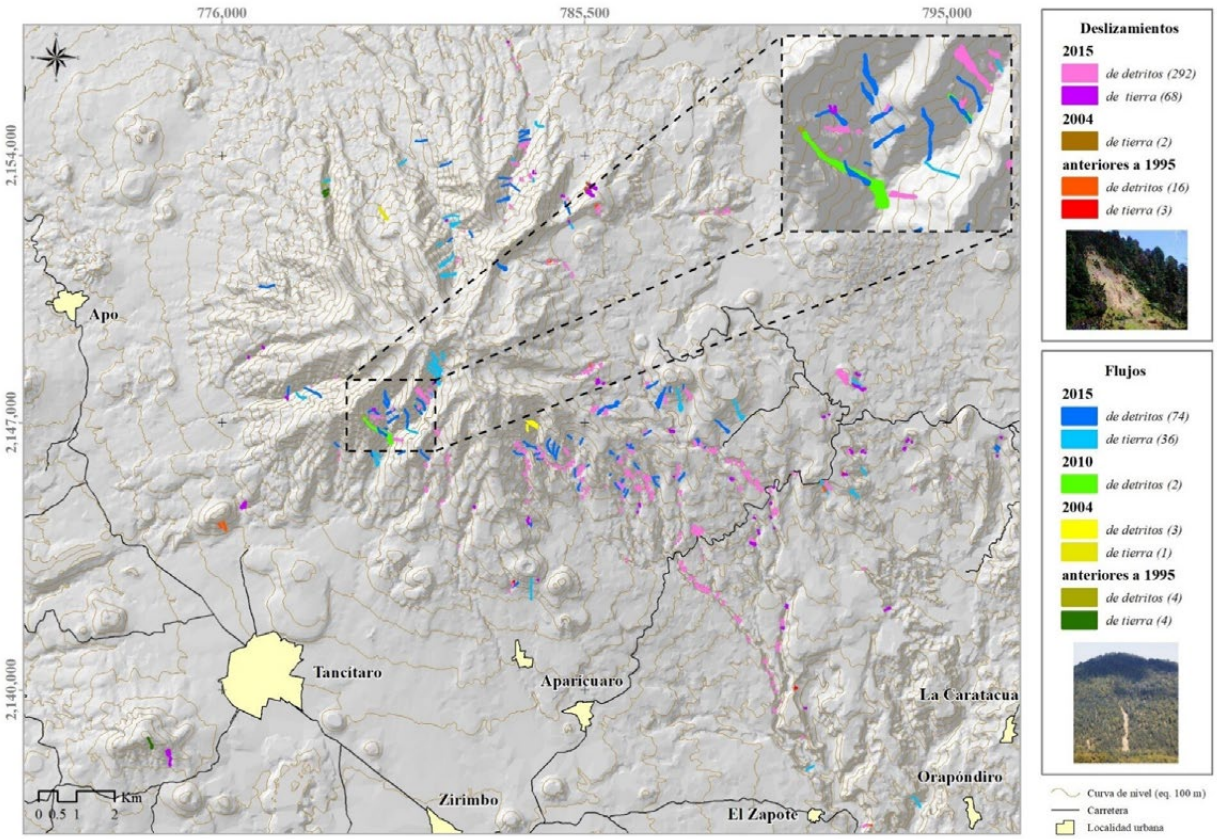
Inventario multitemporal de procesos de remoción en masa

Se identificaron 505 procesos de remoción en masa en la zona de estudio, se clasificaron en deslizamientos y flujos compuestos por detritos y tierra, los eventos datan de los años 1995, 2004, 2010 y 2015 (Tabla 1). Se observó coincidencia espacial de algunos eventos recientes con eventos antiguos (17 eventos en 1995; 3 en 2004; 4 en 2010; 15 en 2015), evidenciando la reactivación de procesos y la afectación de antiguas cicatrices (Figura 5).

Tabla 1. Descripción de los eventos de remoción en masa del inventario multitemporal.

Fecha	Tipo/Material		No. de eventos
Anterior a 1995	Deslizamiento (19)	Detritos	16
		Tierra	3
	Flujo (8)	Detritos	4
		Tierra	4
2004	Deslizamiento (2)	Tierra	2
	Flujo (4)	Detritos	3
		Tierra	1
2010	Flujo (2)	Detritos	2
2015	Deslizamiento (360)	Detritos	292
		Tierra	68
	Flujo (110)	Detritos	74
		Tierra	36

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 5.** Inventario multitemporal y tipología de los procesos de remoción en masa en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en la metodología.

De acuerdo con Hungr *et al*., (2014), por sus características mecánicas, la velocidad de los flujos fue de 1.8 metros/hora, mientras que la de los deslizamientos es de 13 metros/mes. Los eventos se distribuyen principalmente en las laderas del estratovolcán pico de Tancítaro, en los valles fluviales de montaña y en los conos volcánicos. Los deslizamientos predominaron en las orientaciones SO-NE y SE-NO, las cuales se asocian al sistema de fracturas del área. Además, se desarrollan sobre rocas de composición andesítica y andesítica basáltica; en pendientes abruptas (30-45°); en laderas orientadas al sur, norte y este; en Andosoles y Leptosoles de textura gruesa; así como en bosques mixtos y de oyamel.

El factor detonante de los eventos identificados fue la lluvia torrencial ocasionada por huracanes y tormentas tropicales. Para los eventos registrados en 1995, el detonante fue el huracán Calvin, cuyas lluvias acumularon una lámina de 100 a 125 mm, del 4 al 9 de julio de 1993. En 2004 se sumaron las lluvias de la tormenta tropical Lester con 50 a 60 mm acumulados, del 12 al 13 de octubre, con las lluvias de la depresión tropical DT16E con 50 a 60 mm acumulados, el 26 de octubre del mismo año. Los eventos del 2010 se asocian al huracán Alex (100 a 125 mm) del 1 al 2 de julio. Finalmente, los eventos del 2015 son consecuencia de la lluvia generada por el huracán Patricia, el cual acumuló una lámina de lluvia de entre 125 y 150 mm, del 22 al 24 de octubre.

Deslizamientos

Los deslizamientos representan el 75% de los procesos de remoción en masa identificados en la zona de estudio (381), siendo de tipo traslacional. Éstos se observaron en el año 1995, 2004 y 2015. Según Hungr *et al*. (2014), su velocidad de ocurrencia es

de 13 metros/mes. El año con el mayor número de deslizamientos fue el 2015 (360), en el que se reportó el evento con la mayor superficie (2.5 ha). El 81% de los deslizamientos se clasifican como deslizamientos de detritos (308), los cuales se concentran al sureste, norte y suroeste del estratovolcán Pico de Tancítaro (Figura 5).

Se presentan en conos volcánicos, valles fluviales y laderas muy escarpadas a escarpadas de montaña. El mayor número de éstos se desarrolló sobre andesita en pendientes abruptas (30-45°) que coinciden con la presencia de fracturas, y con orientaciones al sur y al este. Este tipo de deslizamientos coinciden, principalmente, con Andosoles, Leptosoles, Regosoles de textura gruesa y bosque mixto. El 19 % restante (73) es clasificado como deslizamientos de tierra, los cuales se concentran en laderas muy escarpadas a escarpadas, valles fluviales de montaña y conos volcánicos, sobre rocas de composición andesítica y en pendientes abruptas, orientadas principalmente al sur y norte. Se desarrollan sobre Andosoles y Leptosoles de textura gruesa, Andosoles de textura media y se presentaron en coberturas de bosque mixto y de oyamel.

Flujos

El 25% de los eventos inventariados (124) corresponde a flujos, siendo los procesos de menor presencia en la zona de estudio. Se localizan con mayor abundancia al norte, este, suroeste y sureste del estratovolcán pico de Tancítaro. Según Hungr *et al*. (2014), su velocidad de ocurrencia es de 1.8 metros/hora. Se encontraron rasgos asociados a este tipo de eventos en los años 1995, 2004, 2010 y 2015. Los eventos de mayor magnitud se presentaron en el 2010 (5.3 ha) y 2015 (3.4 ha). Del total de flujos, 67% corresponde a flujos de detritos (83), los cuales se ubican, principalmente, en laderas muy escarpadas y escarpadas de montaña, superficies fracturadas orientadas al sur y este (de constitución andesítica, con desarrollo de Andosoles y Leptosoles de textura grues) y en bosque de oyamel. El 33 % corresponde a flujos de tierra (41), éstos se localizan tanto en laderas muy escarpadas a escarpadas de montaña, orientadas al sur y norte (formadas por andesita, Andasoles y Leptosoles) como en zonas con bosque de oyamel y bosque de pino-zacatonal.

Discusión

Los componentes biofísicos del paisaje (rocas, geoformas, pendientes, orientación de laderas, suelos, vegetación y uso del suelo) han sido identificados en diversos estudios como factores condicionantes de los procesos de remoción en masa y analizados con frecuencia en inventarios de procesos gravitacionales ocurridos en zonas montañosas (Van-Westen *et al*., 2006; Guzzetti *et al*., 2012).

El análisis espacial permitió identificar los factores con mayor presencia en los deslizamientos y flujos en la zona de estudio de la presente investigación. Las unidades de relieve con el mayor número de eventos de remoción en masa fueron las laderas muy escarpadas y escarpadas, los valles fluviales de montaña y los conos volcánicos, con pendientes de 30° a 45°, y con orientación predominante hacia el sur, norte y este. Lo anterior sugiere que el estratovolcán pico de Tancítaro es una montaña con alta susceptibilidad ante procesos de remoción en masa. Además, nuestros resultados coinciden con lo reportado por otros estudios desarrollados en zonas montañosas ubicadas en el mismo ambiente morfogenético (Sistema Volcánico Transversal) (Alcántara-Ayala *et al*., 2012; García-Reyes *et al*., 2018). Nuestros resultados también concuerdan con lo expuesto por Enríquez-Guadarrama *et al*. (2010), quienes señalan que los procesos de inestabilidad de laderas son más comunes en zonas montañosas, en los estratovolcanes y en geoformas con pendientes pronunciadas.

Las rocas más antiguas (andesitas fracturadas) presentaron el mayor número de deslizamientos y flujos como consecuencia de que han estado expuestas a procesos exógenos por un tiempo prolongado, promoviendo la debilidad de las rocas. Resul-

tados similares han sido reportados por Alcántara-Ayala & Murillo-García (2008), Highland & Bobrowsky (2008) y Van-Westen *et al.* (2008), quienes identificaron el tipo de roca y a su acomodo estratigráfico como factores principales para la caracterización de los eventos, mencionado que los procesos de remoción son más frecuentes en superficies fracturadas con lechos rocosos deslizantes subyacentes y en materiales poco consolidados.

Los Andosoles y Leptosoles fueron los grupos de suelos con la mayor coincidencia con los deslizamientos y flujos, esto se debe a la relación de los suelos con el material parental y las geoformas. En las geoformas más abruptas y escarpadas se desarrollan suelos incipientes donde afloran los bloques de andesita con altos grados de fracturación. En cambio, en las laderas medias y bajas se concentran suelos Andosoles profundos que se desarrollaron sobre tobas andesíticas que subyacen a derrames de la misma composición, los cuales actúan como superficies de deslizamiento al saturarse por la acumulación de agua. Este comportamiento se ha observado en suelos de diferentes regiones montañosas intertropicales (Coutinho *et al.*, 2019; Kobiyama *et al.*, 2011; Lacerda, 2007).

En los bosques mixto y de oyamel se identificaron la mayoría de los procesos de remoción en masa en la zona de estudio, esto se debe a que las áreas boscosas referidas se establecen en las superficies de mayor precipitación que coinciden con las laderas montañosas y Andosoles, donde el manejo forestal, recreativo y agropastoril promueven la apertura de caminos, senderos y parcelas, incrementando la susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Fuentes-Junco *et al.*, 2004; Van-Westen *et al.*, 2008). Este comportamiento se ha observado en otras regiones montañosas sometidas a diversos tipos de manejo (Franco-Ramos *et al.*, 2018; Lozano & Bussmann, 2005).

La coincidencia espacial de los eventos de remoción en masa más recientes con los de mayor antigüedad en la zona de estudio evidenció la reactivación de procesos, esto concuerda con resultados de Samia *et al.* (2017). De acuerdo con Hungr *et al.* (2014), los tipos de procesos de remoción en masa, identificados de acuerdo con su velocidad de ocurrencia, se clasifican como movimientos rápidos (flujos) y moderados (deslizamientos).

Diversos autores han indicado que uno de los principales detonantes de procesos de remoción en masa en regiones intertropicales son las lluvias torrenciales ocasionadas por eventos hidrometeorológicos extremos como los huracanes provenientes del océano Atlántico o del Pacífico (Aceves-Quesada *et al.*, 2016; Huddleston *et al.*, 2003; Legorreta-Paulín *et al.*, 2014; Terzi *et al.*, 2019). Los resultados obtenidos para la zona de estudio coinciden con este planteamiento, ya que los eventos hidrometeorológicos extremos detonantes de los procesos de remoción inventariados provinieron de los océanos Pacífico y Atlántico, acumulando entre 100 y 125 mm de lluvia (SMN, 2021a), que incorporan agua al suelo, saturándolos y favoreciendo el inicio de procesos de remoción en masa, espacialmente hacia el final de temporada de lluvias.

El factor detonante de los eventos ocurridos en la zona de estudio fue las lluvias torrenciales ocasionadas por eventos provenientes del océano Pacífico como: el huracán Calvin (100 a 125 mm en 6 días) (1993), la tormenta tropical Lester y la depresión tropical DT16E (en conjunto acumularon 100 a 120 mm en tres días) (2004), y el huracán Alex (100 a 125mm en dos días) (2010); así como eventos provenientes del océano Atlántico como: el huracán Patricia (125-150mm en dos días) (2015) (SMN, 2021a). Las lluvias generadas por estos eventos hidrometeorológicos se posicionan entre el umbral medio (117.07 mm) y alto (175.61 mm) de lluvia acumulada en 24 horas, que puede desencadenar procesos de remoción en masa en el Sistema Volcánico Transversal (CENAPRED, 2016). Con base en los datos de precipitación expuestos por Fuentes-Junco *et al.* (2004) y García-Amaro (2004), la cantidad de precipitación acumulada durante estos eventos representa entre el 11% y el 16.5 % de la precipitación anual registrada para la estación Tancítaro (910.5-916.1 mm).

Los sismos son otro detonante de los procesos de remoción en masa (Aceves-Quesada *et al*., 2016; Legorreta-Paulín *et al*., 2014). La zona de estudio de la presente investigación se ubica en la región de sismicidad media en México, es decir, no se registran sismos con frecuencia y cuando se presentan la aceleración del suelo es menor al 70 % (SGM, 2017). En la zona de estudio se registraron 66 sismos entre 1990 y 2020, considerados como microsismos por reportar magnitudes que oscilaron entre los 3.2 y 4.3. Además, su ocurrencia no se originó en los meses previos ni durante el desarrollo de los eventos de remoción en masa, lo cual comprueba que los sismos no influyeron como detonantes de los procesos de remoción en masa (SSN & UNAM, 2021). Sin embargo, los sismos son un detonante que podría coincidir temporalmente con eventos de lluvia, promoviendo el inicio de los procesos de remoción en masa como los inventariados en este trabajo.

Conclusiones

La distribución, tipología, velocidad y composición de los procesos de remoción en masa que ocurren en las regiones montañosas intertropicales de México pueden ser estudiados teniendo una perspectiva geográfica por medio de los inventarios multitemporales. Sin embargo, este tipo de estudios aún son escasos y carentes de información a escalas detalladas, lo cual puede ser atendido mediante la compilación y generación de información cartográfica de mayor resolución espacial referente a los eventos de remoción en masa, así como a los factores condicionantes y detonantes.

El inventario de procesos de remoción en masa identificó las áreas afectadas por eventos de remoción. Por su parte, el análisis espacial de los factores condicionantes permitió identificar las clases de mayor importancia relativa para la evaluación y modelación cartográfica de la susceptibilidad y peligrosidad por procesos de remoción en masa en la zona de estudio.

El inventario multitemporal de los procesos de remoción en masa y el análisis de los agentes condicionantes a escala 1:50,000 permitieron caracterizar, de manera detallada, los eventos de remoción en masa en la zona de estudio, así como entender su frecuencia y magnitud, generando información útil para desarrollar estudios de susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo ante peligros naturales en las zonas de montaña intertropicales.

El desarrollo de este tipo de investigaciones aporta información sustancial sobre la dinámica de los peligros naturales, la cual es de vital importancia para atender los Objetivos de Desarrollo Sostenible que contempla la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para erradicar la pobreza, proteger al planeta y asegurar la prosperidad para todos los seres humanos, en específico el no. 13. Acción por el clima y el no. 15. Vida de ecosistemas terrestres.

Agradecimientos

Alejandro Valdés agradece al SECIHTI por su beca de doctorado. Los autores agradecen los proyectos UNAM PAPIIT "Dendrogeomorfología y evaluación de peligros en ambientes de montañas" y "Dendrogeomorfología: desarrollo e implementación de un esquema para cartografiar y evaluar peligros geomorfológicos en zonas montañosas intertropicales de México"; y Manuel E. Mendoza agradece a PASPA-UNAM por su beca sabática.

» Referencias bibliográficas

Aceves-Quesada, J. F., Legorreta-Paulín, G., Lugo-Hubp, J., Umaña-Romero, J., & Legorreta-Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55. https://doi.org/10.14350/rig.46503

Alcántara-Ayala, I., López-García, J., & Garnica, R. J. (2012). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. *Landslides*, 9(2), 263–273. https://doi.org/10.1007/s10346-011-0291-7

Alcántara-Ayala, I., & Murillo-García, F. G. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 66, 47–64. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56911123004

Arrieta, C. (2018). Aumenta a 5 el número de muertos por inundaciones en Peribán, Michoacán. *El Universal*. https://www.eluniversal.com.mx/estados/aumenta-5-el-numero-de-muertos-por-inundaciones-en-periban-michoacan

Carlón- Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Soto-Castro, G., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120, 106920. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920

CENAPRED. (2014). *Diagnóstico de Peligrosos e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (O. Zepeda-Ramos & S. González-Martínez, Eds.; 1st ed., Vol. 1). Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana.

CENAPRED. (2016). *Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas*. CENAPRED https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/23.pdf

CEPCM. (2023). *Programa Especial Temporada de lluvias y Ciclones Tropicales 2023*.

COAH. (2020). Imágenes del Satélite Sentinel-3. SCI-HUB. https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

Coutinho, R. Q., Silva, M. M., Santos, A. N. dos, & Lacerda, W. A. (2019). Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(8). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002052

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. *Special Report - National Research Council*, Transportation Research Board, 247, 36–57.

Enríquez-Guadarrama, Carlos., Oropeza-Orozco, O., & Ortiz-Pérez, M. (2010). Peligros Geológicos-Geomorfológicos en Cuencas Hidrográficas. In H. Cotler-Avalos, A. Garrido-Pérez, N. Luna-Gonzáles, C. Enríquez-Guadarrama, & M. L. Cuevas-Fernández (Eds.), *Las Cuencas Hidrográficas de México, Diagnóstico y Priorización* (1st ed., Vol. 1, pp. 38–44). SEMARNAT.

Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., & Villanueva-Díaz, J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 191–204. https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200191

Fuentes-Junco, J. de J., Bravo-Espinosa, M., & Bocco, V. G. (2004). Water balance and landscape degradation of an ungauged mountain watershed: case study of the Pico de Tancítaro National Park, Michoacán, México. *Journa of Environmental Hydrology*, 12. http://www.hydroweb.com/jeh/jeh2004/fuente.pdf

García-Amaro, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen* (E. García, Ed.; Vol. 5). Instituto de Geografía, UNAM.

García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., & Concha-Dimas, A. (2006). Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 195–204. https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a2

García-Reyes, S., Legorreta-Paulín, G., & Aceves-Quesada, F. (2018). Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas*, 96. https://doi.org/10.14350/rig.59613

Guevara, O. E., Quaas, W. R., Fernández, V. G., Zepeda, R. O., Muñoz, H. E., & Torres, P. L. (2014). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica*. CENAPRED.

Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali M., Fiorucco, F. Santangelo, M., & Chang K.T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews,* 112 (1–2), 42–66. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001

Harp, E. L., Hagaman, K. W., Held, M. D., & McKenna, J. P. (2002). *Inventario digital de deslizamientos de tierra y los depósitos provocados por éstos que causó el paso del huracán Mitch en Honduras*. GEOLOGICAL SURVEY. https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-0061/OFR0261es_Text.access.pdf

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf

Huddleston, B. A., Ataman, B., de Sales, P., Zannetti, M., Bloise, M., Bel, J., Franceschine, G., & d'Ostini, L. F. (2003). Towards a GIS-based Analysis of Mountain Environments and Populations.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

INEGI. (1983, May 2). *Carta Edafológica. Los Reyes*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825657697 https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Edafologia_hist/1_50_000/702825657697.pdf

INEGI. (1995, April 2). Ortofotos digitales E13B28f "Los Reyes", E13B29de "Paracho", E13B38cf "Tancítaro", E13B39abde "Uruapan". Escala 1:20,000. Aguascalientes. México. . https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas

INEGI. (2021, February 3). *Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda 2020. Entidad federativa Michoacán de Ocampo. Aguascalientes*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos

Kobiyama, M., de Almeida Mota, A., Grison, F., & Nery Giglio, J. (2011). Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. *Natural Hazards*, 59(2), 1077–1086. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9818-4

Lacerda, W. A. (2007). Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. *Geomorphology*, 87(3), 104–119. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.037

Larrea, P., Siebe, C., Juárez-Arriaga, E., Salinas, S., Ibarra, H., & Böhnel, H. (2019). The ~ AD 500–700 (Late Classic) El Astillero and El Pedregal volcanoes (Michoacán, Mexico): a new monogenetic cluster in the making? *Bulletin of Volcanology*, 81(10), 59. https://doi.org/10.1007/s00445-019-1318-5

Legorreta-Paulín, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo Hubp, J., Paredes Mejía, L. M., & Aceves Quesada, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 343–354. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94331762009

Lozano, P., & Bussmann, R. (2005). Importancia de los deslizamientos en el Parque Nacional Podocarpus, Loja, Ecuador Importance of landslides in Podocarpus National Park, Loja, Ecuador. *Revista Peruana de Biologia*, 12, 195–202.

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379–424. https://doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a6

Magaña, G. Y. (2015, May 1). Patricia destruyó carreteras, casas y cultivos en Michoacán. *Ntivideo*. https://www.notivideo.com/noticia/nota,7870/titulo,%E2%80%9CPatricia%E2%80%9D+destruy%C3%B3+carreteras%2C+casas+y+cultivos+en+Michoac%C3%A1n++/

Medina-García, C., Gimenez de Azcarate, J., & Velázquez-Montes, A. (2020). Las comunidades vegetales del bosque de coníferas altimontano en el macizo del Tancítaro (Michoacán, México). *Acta Botanica Mexicana*, 127, e1584. https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1584

Moreiras, S. M. (2004). Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2), 255–266. https://doi.org/10.1002/esp.1056

Moreiras, S. M., Lenzano, M. G., & Riveros, N. (2008). Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconcagua, provincia de Mendoza - Argentina. *Multequina*, 17, 129–146. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42801710

Murillo-García, F. G., & Alcántara-Ayala, I. (2017). Landslide inventory, Teziutlán municipality, Puebla, México (1942–2015). *Journal of Maps*, 13(2), 767–776. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1381194

Pola, A., Macías, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Osorio-Ocampo, S., & Cardona-Melchor, S. (2014). Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.011

Ramos-Bernal, R., Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Arrogante-Funes, P., & Novillo, C. (2018). Evaluation of Unsupervised Change Detection Methods Applied to Landslide Inventory Mapping Using ASTER Imagery. *Remote Sensing*, 10(12), 1987. https://doi.org/10.3390/rs10121987

Salinas, S., & López-Blanco, J. (2010). Geomorphic assessment of the debris avalanche deposit from the Jocotitlán volcano, Central Mexico. *Geomorphology*, 123(1–2), 142–153. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.006

Salinas-Jasso, J. A., Montalvo-Arrieta, J. C., & Reinoso-Angulo, E. (2018). Landslides induced by a low magnitude seismic sequence at continental interiors: a case study of the Santa Rosa Canyon, northeastern Mexico. *Landslides*, 15(4), 783–795. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0963-7

Samia, J., Temme, A., Bregt, A., Wallinga, J., Guzzetti, F., Ardizzone, F., & Rossi, M. (2017). Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslides*, 14(2), 547–558. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0739-x

SGM. (2017, April 2). *Sismología de México. Regiones sísmicas en México*. SMN. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html

Slaymaker, O., & Embleton-Hamann, C. (2018). Advances in global mountain geomorphology. *Geomorphology*, 308, 230–264. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.016

SMN. (2021a). *Información histórica. Consulta de historial y resúmenes de ciclones tropicales*. https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica

SMN. (2021b). *Lluvias asociadas a ciclones tropicales*. Comisión Nacional del Agua. https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales

Solís-Castillo, B., Mendoza, M. E., Vázquez Castro, G., & Bocco, G. (2019). Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacán México. *Physical Geography*, 40(6), 554–577. https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1574136

SSN, & UNAM. (2021, May 6). *Catálogo de sismos. Mapa de epicentros del 01-01-1990 al 01-01-2020. Cuadrante Latitud (mínima 19.19, máxima 19.66) Longitud (mínima -102.62 máxima -102)*. http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/

Terzi, S., Torresan, S., Schneiderbauer, S., Critto, A., Zebisch, M., & Marcomini, A. (2019). Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management*, 232, 759–771. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100

Valdés-Carrera, A. C. (2024). *Análisis de Peligros Geomorfológicos en las Zonas de Montaña del Sistema Volcánico Transversal, México*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000856783

Van-Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010

Van-Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0

2.2 Datos de precipitación y cambio de uso de suelo en Puerto Vallarta

Alondra Cristina Barragán Nava
Licenciatura en Biología, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, México

Julio Cesar Morales Hernández
Departamento de Ciencias Exactas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, México

José Francisco León Cruz
Instituto de Geografía, Unidad Autónoma del Estado de México, México

Bartolo Cruz Romero
Departamento de Ciencias Biológicas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, México

Palabras Clave: Lluvia, Vulnerabilidad, Planeación Urbana, Inundaciones, Cobertura Vegetal.
ODS: 13 Acción por el Clima.

Introducción

Los peligros naturales, especialmente aquellos vinculados a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, representan una amenaza significativa para comunidades en todo el mundo. Cuando estos peligros se convierten en desastres, cobrando vidas humanas y afectando los medios de subsistencia, se convierten en obstáculos clave para el desarrollo sostenible (OMM, 2021).

México, en particular, ha experimentado un aumento en la frecuencia de inundaciones en las últimas décadas, atribuibles no solo a las precipitaciones intensas, sino también a la mala planificación urbana y cambios en el uso de suelo, derivados del crecimiento poblacional, los sectores agrícolas y turísticos.

El incremento en la frecuencia de inundaciones en México ha generado consecuencias adversas, especialmente en cuencas hidrográficas, donde la vulnerabilidad ha aumentado debido a cambios en la cobertura vegetal. En Puerto Vallarta, los cambios en la cobertura vegetal se han podido identificar con un análisis espacial del 2010-2020, donde se observa que la zona agrícola y la zona urbana han aumentado en una proporción muy baja con respecto a las demás coberturas. No obstante, éstas se han aglomerado en la parte del centro y norte de la región.

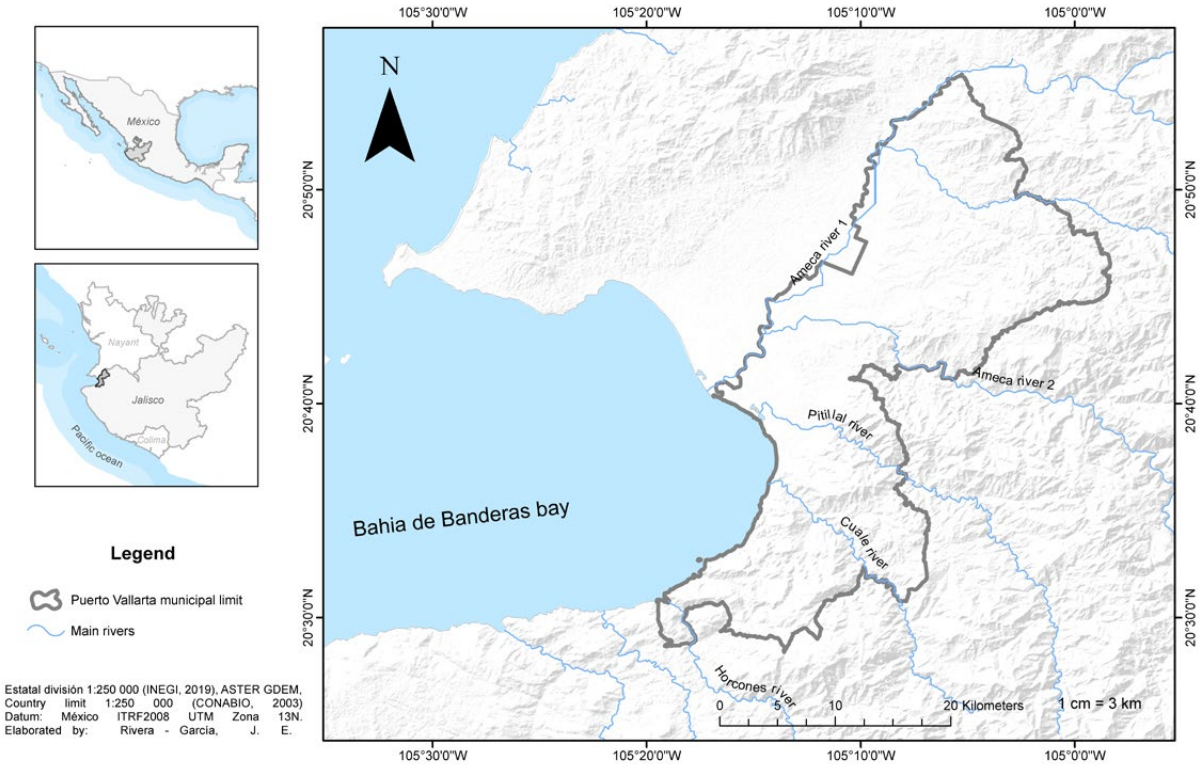
La deforestación, al disminuir la densidad de la cobertura vegetal, ha resultado en una reducción de la evapotranspiración, contribuye al aumento de hasta un 70% de la escorrentía anual en ciertas cuencas (García, López y Mendoza, 2011). La escorrentía, representando el flujo de agua no absorbida por el suelo, se intensifica durante eventos de lluvias intensas, provocando acumulaciones rápidas de agua en ríos, arroyos y zonas bajas, provocando inundaciones.

El cambio en la evapotranspiración y el reciclaje del agua, a largo plazo, puede iniciar un proceso de retroalimentación que conduce a la disminución de las precipitaciones (Li *et al*., 2007). Este fenómeno complica aún más el escenario, exacerbando los problemas asociados con las inundaciones y afectando la disponibilidad de recursos hídricos a largo plazo. Los datos de precipitación son esenciales para comprender los patrones climáticos, monitorear las tendencias a lo largo del tiempo y hacer predicción de inundaciones; pero la disponibilidad de los datos es limitada debido a que las estaciones meteorológicas en el municipio no funcionan adecuadamente, por lo que fue necesario hacer una de otra herramienta. CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) es un conjunto de datos que combina información de satélites y estaciones meteorológicas para proporcionar estimaciones precisas de la precipitación a nivel global (Funk *et al*., 2015).

Esta integración de datos ayuda a compensar la falta de cobertura de estaciones meteorológicas en ciertas áreas, permitiendo una estimación más completa de variables climáticas como la precipitación.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al municipio de Puerto Vallarta, localizado en el estado de Jalisco, México, en la región de Bahía de Banderas. Se ubica entre los paralelos 20°28' y 20°56' de latitud norte y los meridianos 104°58' a los 105°20' de longitud oeste. La zona posee una altitud entre 0 msnm y 1,500 msnm. Colinda, al norte, con el estado de Nayarit y el municipio de San Sebastián del este; al este, con los municipios de San Sebastián del Oeste y Mascota; al sur, con los municipios de Mascota, Talpa de Allende y Cabo Corrientes; al oeste, con el municipio de Cabo Corrientes, el océano Pacífico y el estado de Nayarit. La zona de estudio ocupa el 0.87 % de la superficie del estado (INEGI, 2009).



► **Figura 1.** Mapa del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia (2022).

Materiales y Métodos

Análisis de la precipitación

A fin de evaluar la distribución espacio-temporal de la precipitación y los eventos extremos en la región de Puerto Vallarta, Jalisco, es importante mencionar que los datos CHIRPS poseen resoluciones temporales, que van desde los acumulados diarios, lustros, décadas y acumulados mensuales. Para este caso, se procesaron datos diarios [un total de 4015 pasos de tiempo] de 2010 a 2020, con una resolución espacial de 0,05°.

Punto de muestreo	Latitud	Longitud
Jardin Haraveri	20.76	-104.90
El Camalote	21.00	-104.89
El Cuale	20.59	-105.22
Pizota	20.50	-105.49
La Cruz	20.74	-105.42
Playa Grande	20.64	-105.18
Jorullo	20.55	-105.13
Nuevo Vallarta	20.69	-105.29
Chacala	20.40	-105.47
Centro	20.60	-105.23
Pitillal	20.65	-105.21
Ixtapa	20.71	-105.20
Las Palmas	20.82	-105.09

Tabla 1. Ubicación de los puntos de muestreo de los datos CHIRPS.

Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth (2022).

Análisis de susceptibilidad

Se realizó un análisis hidrográfico en la zona de estudio, utilizando el simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas SIATL del INEGI (INEGI, 2022). Se elaboró un Modelo Digital de Elevación (MDE), se utilizó Global Mapper 18 y ArcGIS 10.4, a una Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5 m de superficie. Todo esto con el propósito de reconocer el gradiente del relieve entre la cabecera de la cuenca y la zona deltaica de Puerto Vallarta. A partir del MDE, se generó el mapa de pendientes y se reclasificó de acuerdo con los elementos de las unidades de relieve. Asimismo, se utilizaron insumos de uso de suelo y vegetación con una escala 1:250 000 Serie VI, donde rasterizaron a 30 metros. (INEGI, 2019). Posteriormente, se generó un mapa geomorfológico utilizando el método Topographic Position Index TPI e I&P (Iwahashi y Pike, 2007). En este proceso se utilizó el sistema de Arcgis (Pucha-Cofrep *et al.*, 2017). Finalmente, con los análisis de lluvias realizados con la base de datos CHIRPS durante el periodo 2010-2020, se generó un mapa de susceptibilidad a inundaciones con base en un análisis multicriterio, utilizando el modelo digital de elevación de la FAO, el modelo y clasificación de pendientes, el mapa geomorfológico y el mapa de uso de suelo y vegetación para las zonas propensas a inundaciones en la zona urbana.

Análisis de la cobertura vegetal

La clasificación de uso de suelo y los cambios ocurridos se obtuvieron a través del periodo 2010-2020. Estos cambios fueron estimados con la ayuda de dos imágenes Landsat Thematic Mapper (TM), obtenidas durante la estación de secas (abril 2010 y abril 2020) con una cobertura de nubosidad menor al 20% (path/row: 30/46), con

una resolución de 30 m, técnicas de percepción remota, y el uso de SIG's. El procedimiento se realizó mediante una clasificación no supervisada, ya que es una técnica que se utiliza cuando no se tienen etiquetas predefinidas para las clases en los datos en el campo del procesamiento de imágenes y análisis de datos. En el análisis de imágenes satelitales y teledetección, la clasificación no supervisada se utiliza para categorizar automáticamente coberturas terrestres, lo cual es esencial en escenarios donde la etiqueta manual sería impracticable debido a la gran escala del análisis. Además, la técnica es eficiente en la detección de cambios en datos temporales, permitiendo identificar alteraciones en la distribución de clases sin información previa sobre qué ha cambiado (Arango Gutiérrez *et al*., 2005).

Resultados

Climatología de la región de estudio

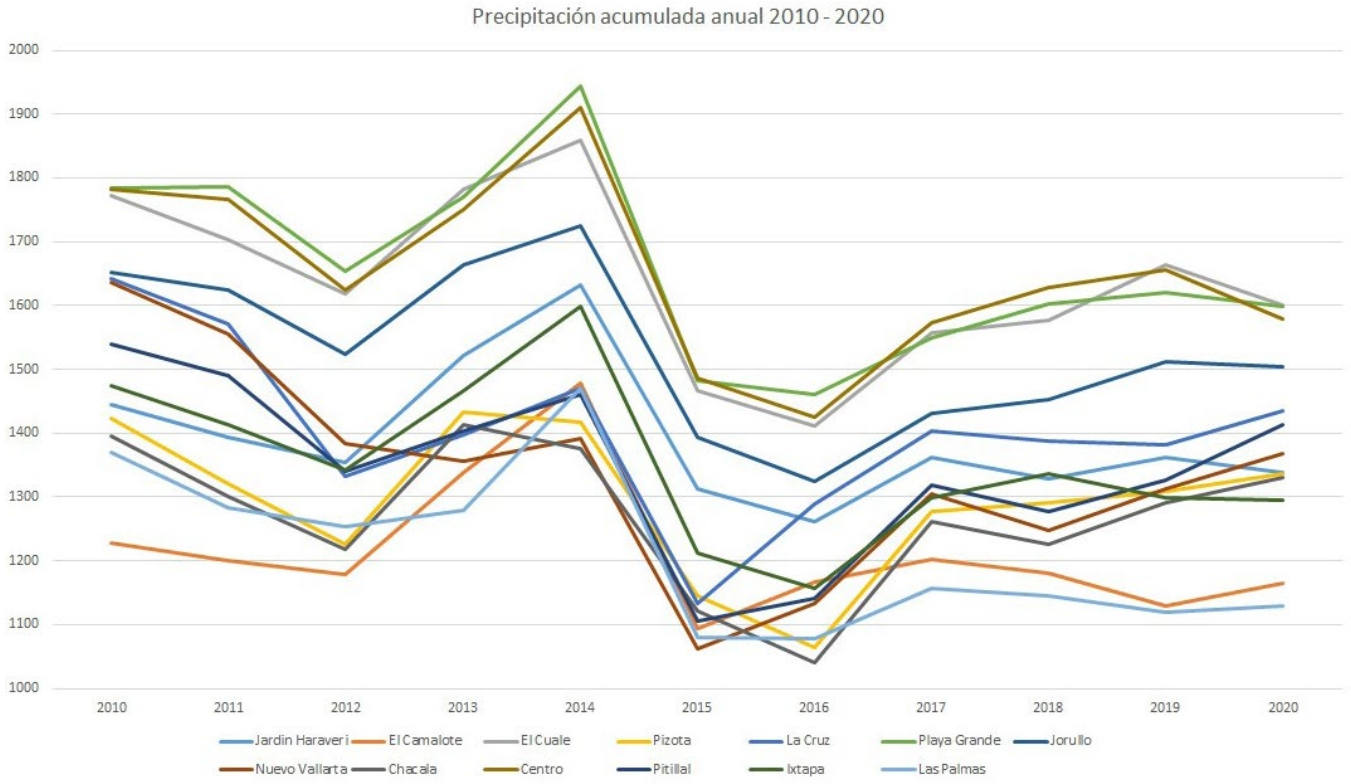
Para cada punto de muestreo (estaciones virtuales previamente mencionadas) se calcularon diversos parámetros estadísticos que amplían la información sobre las características de las precipitaciones en el área de estudio.

La Figura 2 muestra la variación interanual de la precipitación para cada uno de los puntos de muestreo seleccionados. Es posible distinguir que en el periodo de estudio (2010 - 2020) se identifican años secos (bajas precipitaciones) y húmedos (altas precipitaciones). Por ejemplo, el año 2014 muestra una tendencia de la magnitud de precipitaciones anuales en prácticamente todas las estaciones virtuales, por el contrario, los años 2015 y 2016 indican un periodo de sequía prolongado que afectó la región de Puerto Vallarta.

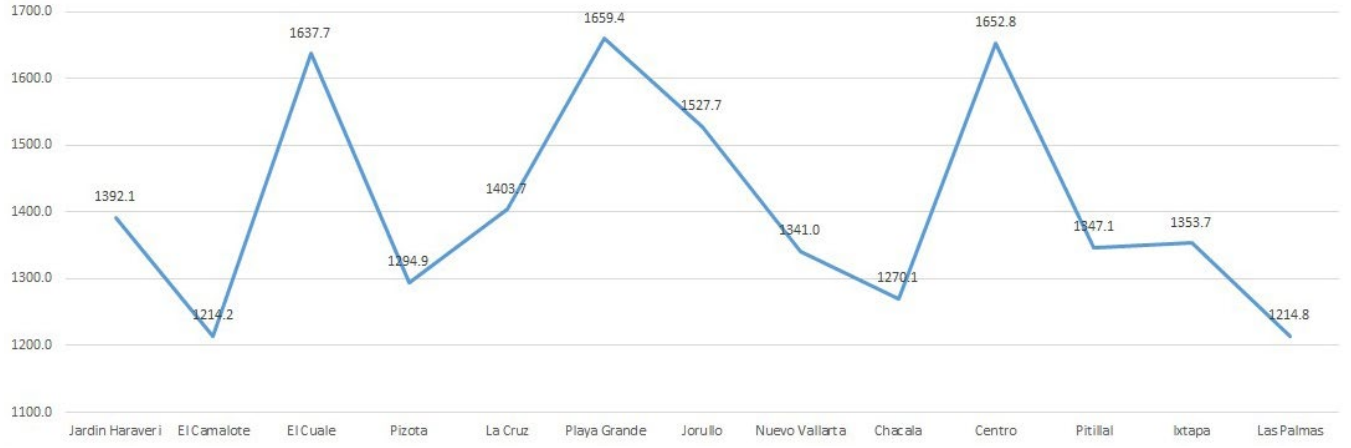
En términos generales, se puede observar como en las estaciones de Cuale, Playa Grande y Centro se pueden encontrar los acumulados anuales mayores durante todo el periodo de análisis (Figura 3); es decir, ubicadas en regiones más húmedas. Por el contrario, estaciones como El Camalote, Pizota y Chacala muestran los menores acumulados anuales, lo que las coloca entre las regiones más secas, en comparación con el resto del área de estudio (Figura 3).

La Tabla 2 muestra la acumulación de lluvia promedio de los meses del periodo 2010-2020. Las columnas sombreadas en azul muestran el periodo más húmedo identificado en la zona de estudio. Se puede apreciar cuáles son los meses con mayor acumulación de agua (julio, agosto y septiembre), además los meses que son más secos (marzo y abril). Comparando los datos con los meses en los que están delimitados los temporales de lluvias para el municipio de Puerto Vallarta, se puede observar una clara correlación. En este sentido, investigaciones anteriores han documentado que la temporada de lluvias abarca desde mediados del mes de junio hasta finales del mes de agosto, continuando con lluvias aisladas hasta mediados de octubre (Velázquez-Ruiz *et al*., 2012).

En la Figura 4, se muestra gráficamente los resultados de la Tabla 2. Se puede observar que el promedio de la precipitación es mayor en el periodo húmedo que inicia el mes de junio y termina en octubre, siendo el pico de actividad de la precipitación en el mes de agosto. Dentro de las estaciones que reportan mayores acumulados de la precipitación para los meses del temporal de lluvia están Playa Grande, Centro, El Cuale y La Cruz. Por otro lado, las estaciones con menores acumulados durante este mismo periodo son Las Palmas, Chala y Pizota (Figura 4).



► **Figura 2.** Precipitación acumulada anual 2010-2020 en las estaciones virtuales seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2013,2014).

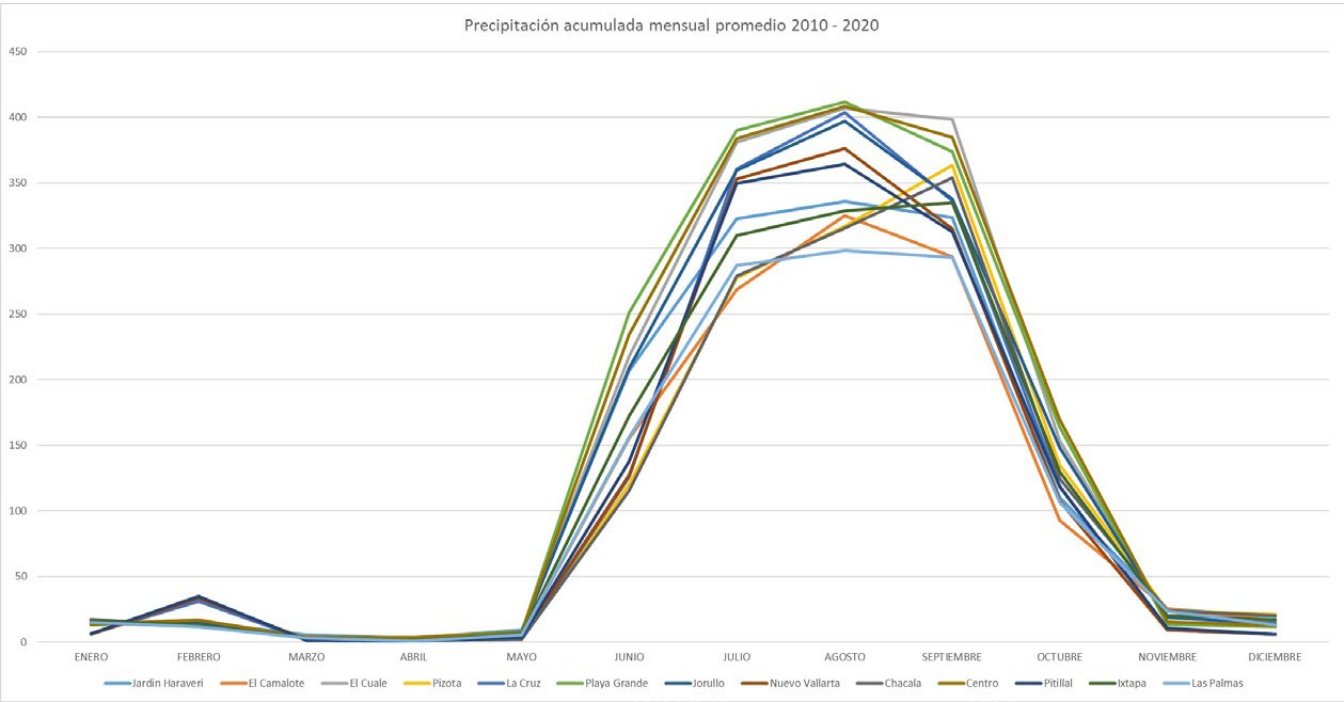


► **Figura 3.** Precipitación promedio en un periodo de 10 años en cada una de las estaciones analizadas.
Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS (2022).

Tabla 2. Precipitación media mensual en las estaciones virtuales seleccionadas.

Lat	Lon	Name	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agot	Sept	Oct	Nov	Dic
20.76	-104.90	Jardin Haraveri	14.4652	15.4719	5.48981	3.3186	9.34571	207.2	322.695	335.709	323.568	110.316	25.2743	19.2447
21.00	-104.89	El Camalote	14.5288	11.9995	4.1239	1.56379	5.05308	155.122	268.85	324.815	293.693	92.5711	25.5011	16.3527
20.59	-105.22	El Cuale	16.2425	15.5384	3.47547	2.73319	7.16226	217.792	380.867	406.95	398.406	153.402	19.0771	16.0208
20.50	-105.49	Pizota	16.4215	13.2017	3.37121	1.23332	2.74126	120.074	277.667	316.732	363.465	134.897	23.9619	21.1423
20.74	-105.42	La Cruz	6.53767	31.0394	1.95858	1.33081	2.07758	126.025	360.776	403.572	336.377	118.759	9.19392	6.05261
20.64	-105.18	Playa Grande	13.3343	15.9606	3.46538	3.5513	7.7377	251.136	389.833	411.719	373.649	164.084	13.4598	11.508
20.55	-105.13	Jorullo	14.7237	14.7633	3.19517	2.53371	7.57778	208.876	359.436	397.046	337.752	148.463	19.0617	14.2501
20.69	-105.29	Nuevo Vallarta	6.28258	33.6447	2.10506	1.24851	3.07438	127.336	352.743	376.279	315.164	107.535	9.47023	6.12382
20.40	-105.47	Chacala	17.227	12.156	3.58671	1.29175	2.33327	115.708	278.984	315.736	353.908	124.766	23.9647	20.4038
20.60	-105.23	Centro	13.4455	16.8123	3.50109	3.45528	7.20961	234.413	383.629	408.354	384.5	169.403	15.4248	12.6285
20.65	-105.21	Pitillal	6.70138	35.0009	1.25542	0.899988	3.83787	137.816	349.479	364.273	312.542	118.287	10.9156	6.08078
20.71	-105.20	Ixtapa	16.2092	13.2366	2.97897	1.28994	6.03199	172.583	310.064	329.028	334.955	129.797	20.325	17.1771
20.82	-105.09	Las Palmas	15.1521	11.9051	3.03234	0.891611	5.41093	156.067	287.258	298.401	293.487	106.35	23.4778	13.3406

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.



► **Figura 4.** Precipitación media mensual para el periodo 2010-2020 en cada una de las estaciones virtuales seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS (2022).

Distribución espacial y temporal de los eventos de precipitación extrema en la zona de estudio

A partir de los datos de precipitación obtenidos del municipio de Puerto Vallarta en un un periodo de diez años y utilizando el método de interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada, en español) se realizaron los mapas de isoyetas. En este sentido, se puede dividir el periodo de tiempo analizado en años húmedos, intermedios y secos.

En la Figura 5, se muestran los años en donde la acumulación de lluvias fue mayor. En ellos se puede notar un patrón en los núcleos de lluvias intensas, principalmente hacia el sur de la zona de estudio. La distribución de las lluvias, en la mayoría de los mapas, se observa que es más abundante sobre las áreas donde se concentra la mancha urbana. Se ha registrado que, en el temporal de los años antes mencionados, se han ocasionado algunos de los episodios de inundaciones más violentos.

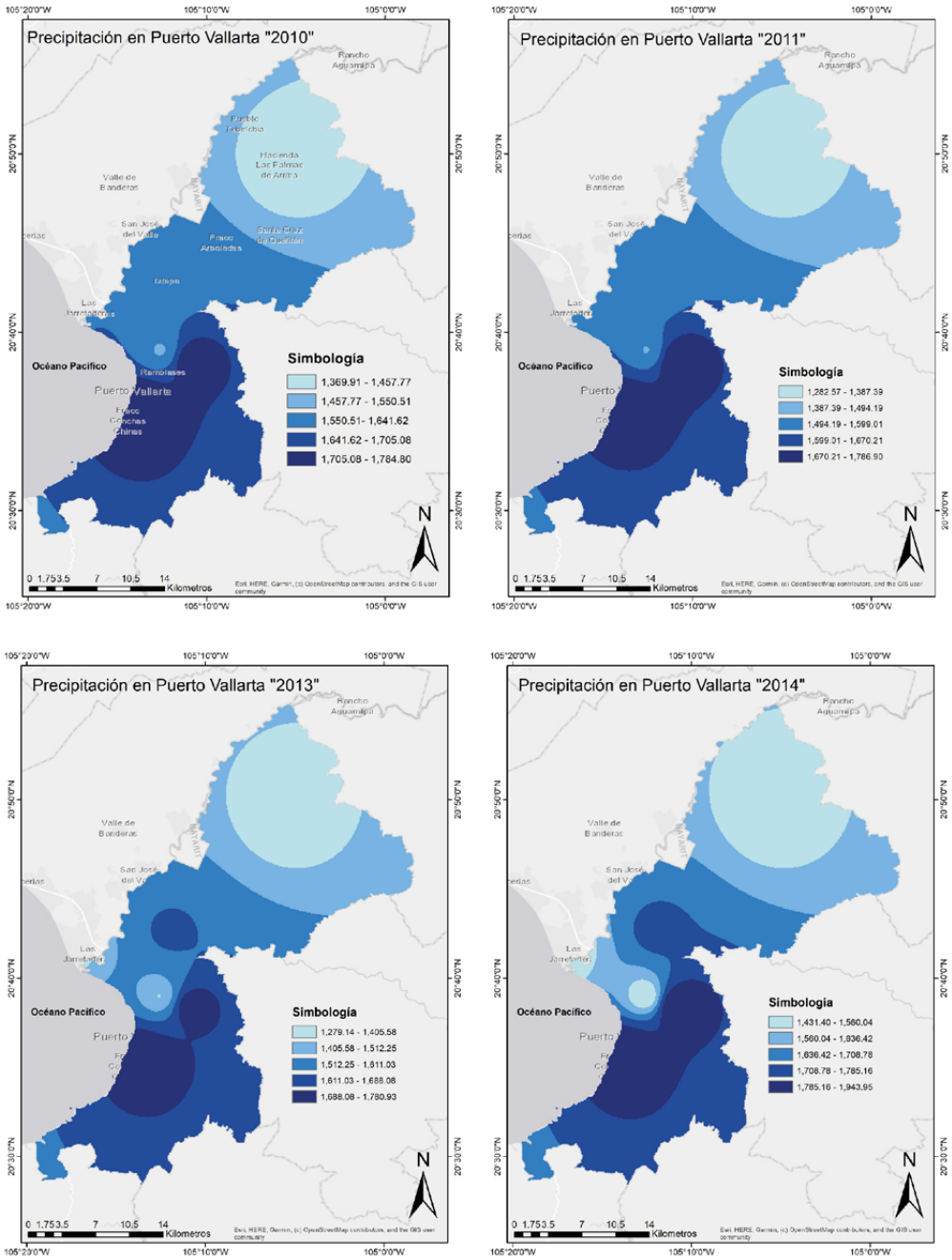
Gran parte de la precipitación está asociada a los eventos hidrometeorológicos que se registraron en las costas del océano Pacífico, afectando a la región de estudio, entre los cuales podemos mencionar diversos ciclones tropicales. En la Tabla 3 se muestra un resumen de tales fenómenos extremos que afectaron la región de estudio.

La Figura 6 muestra la distribución de la lluvia en el periodo con menor promedio de precipitación del municipio (2015, 2016 y 2020). Al igual que el caso anterior, son identificables una serie de núcleos donde la precipitación fue más o menos intensa. Cabe mencionar que la distribución de la precipitación es similar a la de la serie de mapas con los años en los que la precipitación es más abundante; pero, evidentemente, con acumulados menores.

En este periodo, se presentaron seis eventos hidrometeorológicos de gran intensidad, pero los efectos de la precipitación que afectaron la costa de Jalisco, en relación con Puerto Vallarta, no fueron significativos (Tabla 4).

En la Figura 7, se presenta el promedio de la precipitación, en los años 2012, 2017, 2018 y 2019, mismos que son considerados años intermedios en cuanto a la precipitación acumulada. Se muestra que la distribución de la lluvia en estos años fue significativamente homogénea en todo el municipio. También se observa que la distribución de las lluvias está más cargada hacia la zona baja. Los núcleos de menor intensidad de lluvia se muestran en las estaciones de Ixtapa y Las Palmas.

Para este periodo, el mes de septiembre se presentó algo intenso en cuanto a lluvia, mostrándose de manera constante sobre las costas de Jalisco y afectando algunas regiones de Puerto Vallarta, las cuales se pudieron registrar por medio de las estaciones meteorológicas y climatológicas presentes en la zona (Tabla 5).



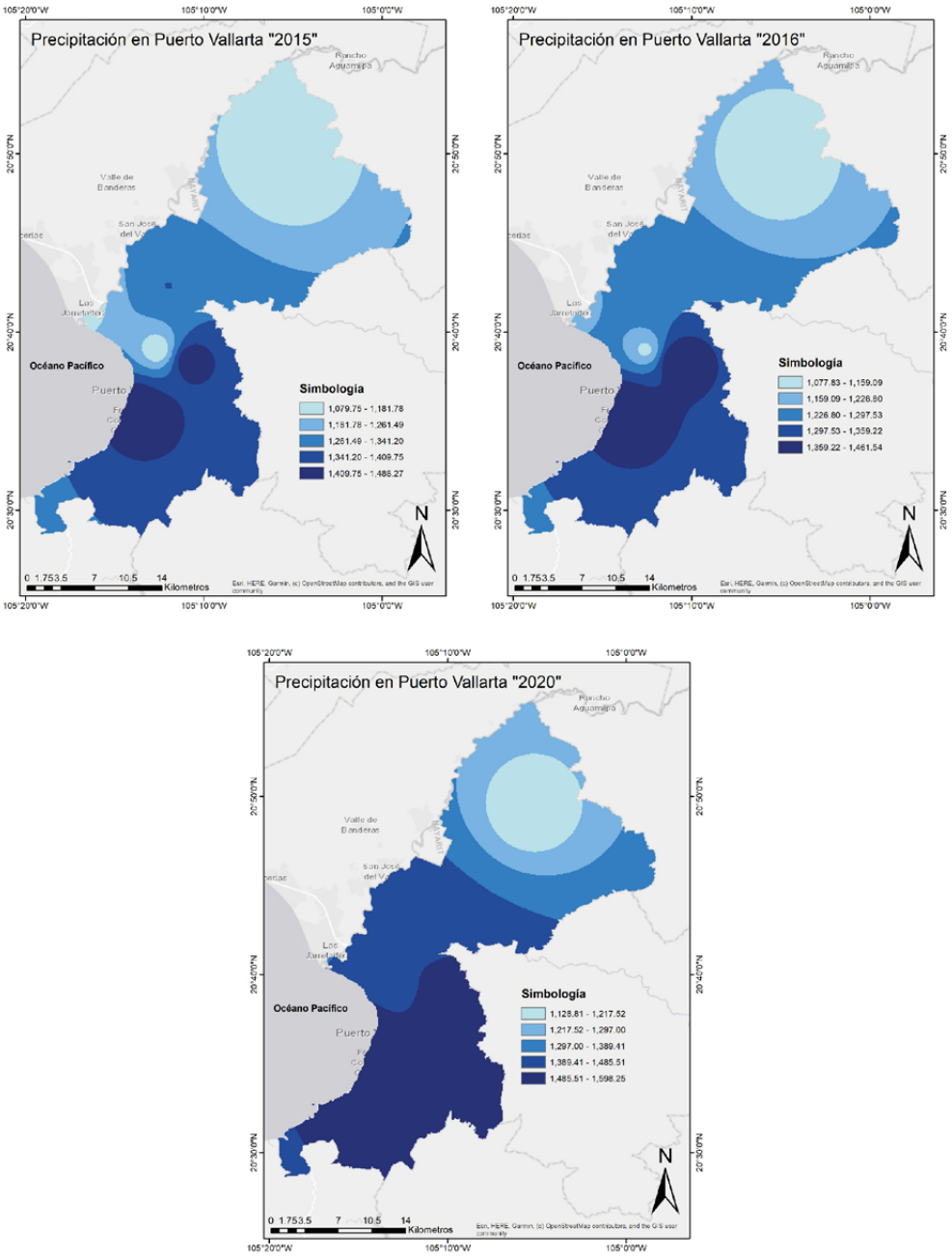
► **Figura 5.** Distribución espacial del promedio de la precipitación anual en la zona de estudio en los años húmedos (2010, 2011, 2013 y 2014).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Tabla 3. Eventos hidrometeorológicos extremos asociados a los patrones de precipitación en el periodo húmedo identificado en la zona de estudio.

Año	Ciclón	Categoría del ciclón al impacto	Estados afectados	Periodo
2011	Beatriz	Huracán Categoría 1 (H1)	Jal.	19-21 Jun
2011	Jova	Huracán Categoría 2 (H2)	Mich, Col, Jal, Naya.	5-12 Oct
2013	Manuel	Tormenta Tropical (H1)	Chis, Oax, Gro, Mich, Col, Jal.	13-19 Sep
2013	Sonia	Tormenta Tropical (Tt)	Sin, Nay, Dgo, Bcs, Jal.	1-4 Nov
2014	Odile	Huracán Categoría3 (H3) Tormenta Tropical (Tt)	Oax, Gro, Mich, Col, Jal, Nay, Sin, Son, Bc, Bcs.	10-17 Sep
2014	Vance	Depresión Tropical (Dt)	Oax, Gro, Mich, Col, Jal, Nay, Sin, Son, Bcs, Chih, Dgo, Zac, Ags.	30 Oct- 5 Nov

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.



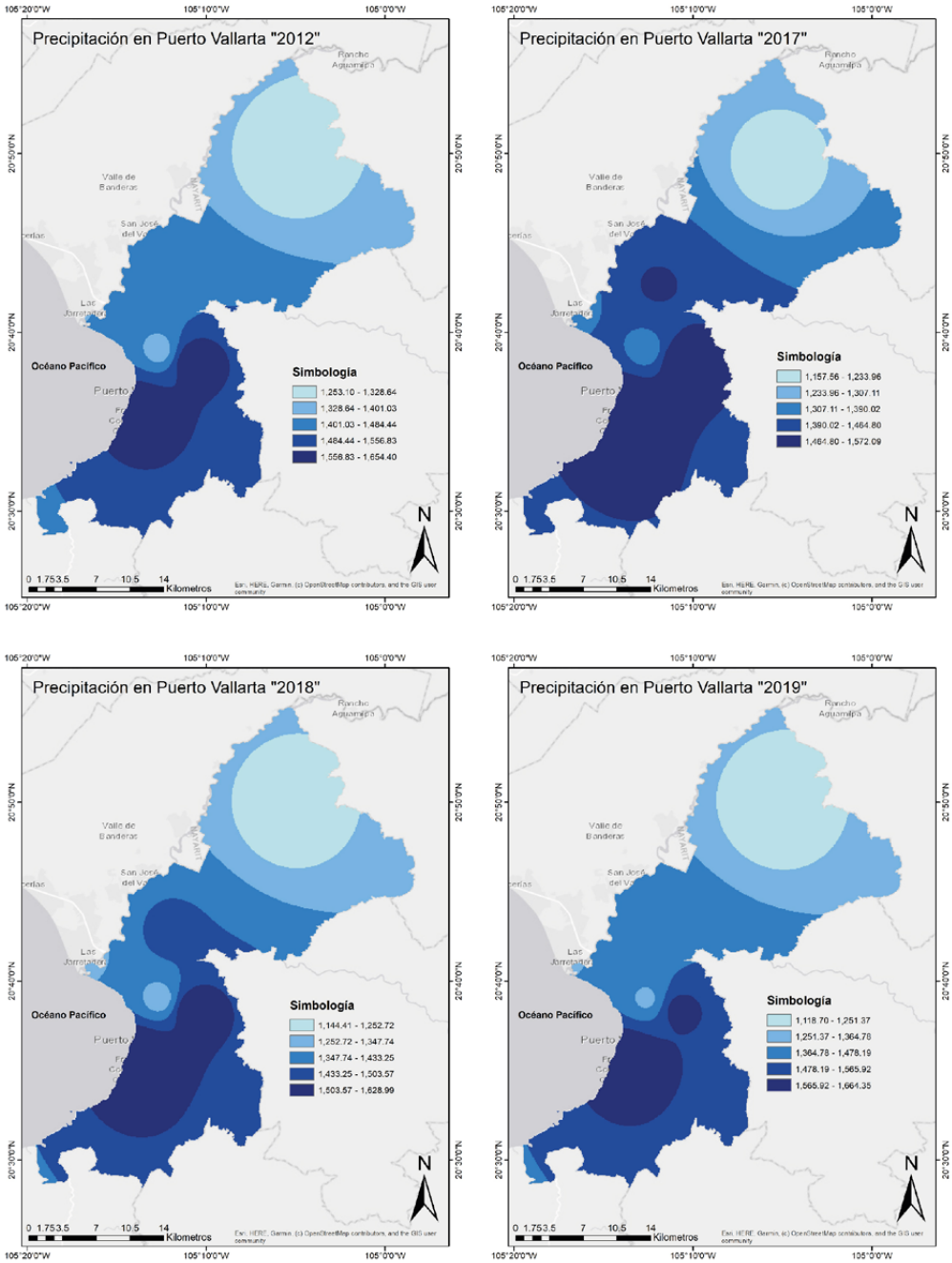
► **Figura 6.** Distribución espacial del promedio de la precipitación anual en la zona de estudio en los años secos (2015, 2016 y 2020).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Tabla 4. Eventos hidrometeorológicos extremos asociados a los patrones de precipitación en el periodo seco identificado en la zona de estudio.

Año	Ciclón	Categoría del ciclón al impacto	Estados afectados	Periodo
2015	Blanca	Tormenta Tropical (Tt)	Chis, Oax, Gro, Mich, Col, Jal, Nay, Sin, Bcs, Bc, Son.	31 May- 9 Jun
2015	Carlos	Huracán Categoría1 (H1)	Chis, Oax, Ver, Pue, Tlax, Mor, Cdmx, Mex, Que, Gto, Gro, Mich, Col, Jal, Nay.	10-17 Jun
2015	Patricia	Huracán Categoría 4 (H4)	Jal, Mich, Col, Nay, Gro, Zac, Sin, Chih, Dgo, Agu, Gto, Que, Hgo, Mex, Cdmx, Mor, Tlax, Pue, Coa, Nl, Tamps, Slp.	20-24 Oct
2016	Javier	Depresión Tropical (Dt)	Chis, Oax, Gro, Mich., Jal, Col, Son, Sin, Nay, Bcs, Dgo, Zac, Ags.	07-09 Ago
2016	Newton	Huracán Categoría1 (H1) (Tt)	Bcs, Bc, Jal, Col, Nay, Sin, Son, Mich, Gro, Dgo, Chih, Zac.	04-07 Sept
2020	Hernán	Depresión Tropical (Dt)	Bcs, Son, Sin, Nay, Jal, Col, Mich, Gro	26-28 Ago

Fuente: SEMARNAT (2022).



► **Figura 7.** Distribución espacial del promedio de la precipitación anual en la zona de estudio en los años secos (2015, 2016 y 2020).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Tabla 5. Eventos hidrometeorológicos extremos asociados a los patrones de precipitación en el periodo intermedio identificado en la zona de estudio.

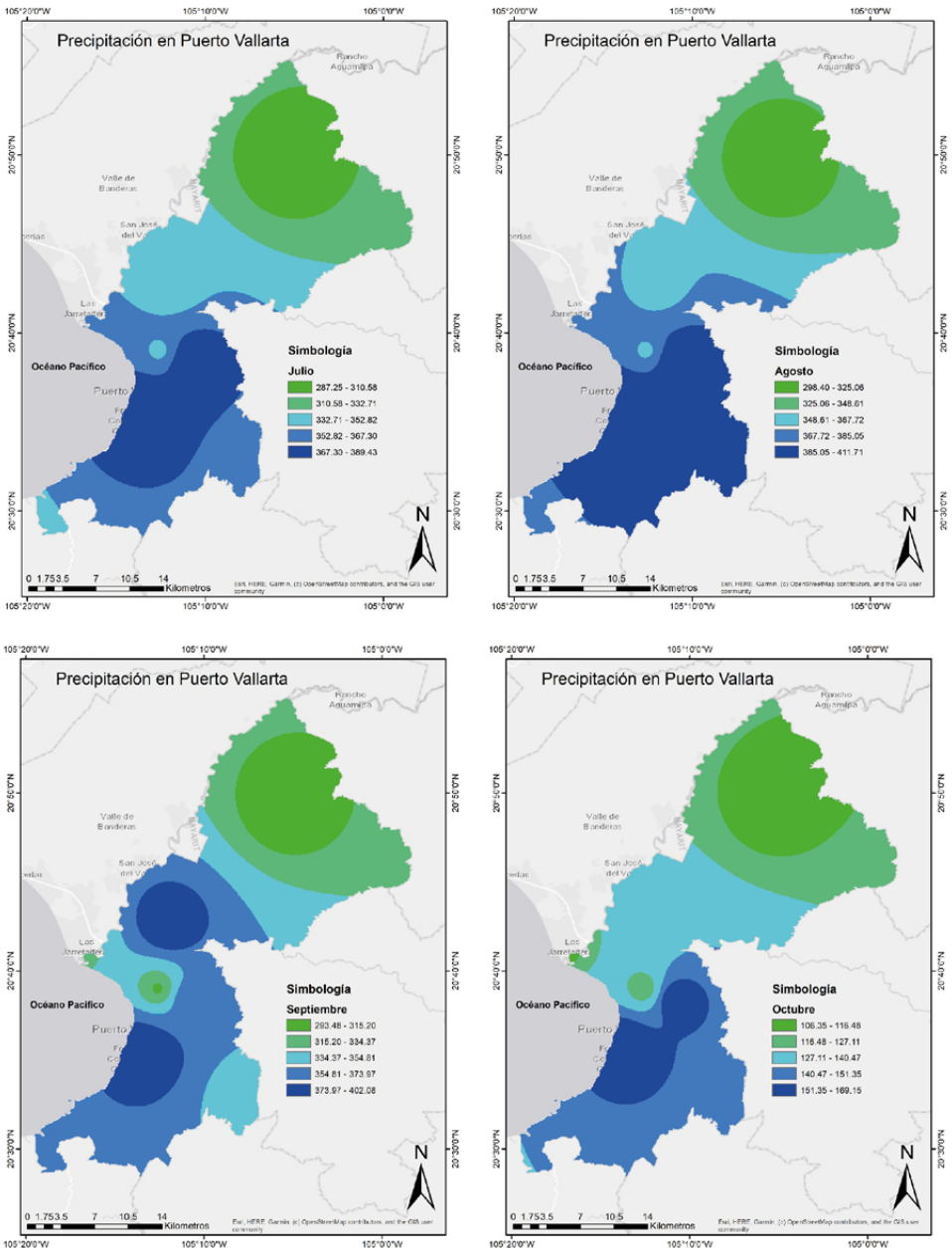
Año	Ciclón	Categoría del ciclón al impacto	Estados afectados	Periodo
2012	Manuel	Tormenta Tropical (Tt)	Chis, Oax, Gro, Mich, Col, Jal, Nay, Sin.	13-16 Sep 17-19 Sep
2012	Sonia	Tormenta Tropical (Tt)	Sin, Nay, Dgo, Bcs, Jal.	1-4 Nov
2012	Bud	Depresión Tropical (Dt)	Gro, Mich, Col, Jal, Nay.	21 - 26 May
2017	Lidia	Tormenta Tropical (Tt)	Gro, Mich, Jal, Col, Nay, Sin, Bcs, Bc, Son, Chih, Dgo, Zac, Ags, Gto.	29 Ago- 3 Sep
2018	Willa	Huracán Categoría 3 (H3)	Jal, Mich, Col, Dgo, Sin, Nay, Zac.	20-24 Oct
2019	Lorena	Huracán Categoría 1 (H1)	Jal, Col, Nay, Mich, Bcs, Son.	17-22 Sep
2019	Narda	Tormenta Tropical (Tt)	Mich, Col, Jal, Nay, Sin, Son.	28 Sep- 01 Oct
2019	Priscilla	Tormenta Tropical (Tt)	Col, Jal, Mich, Nay, Gro.	20 De Oct

Fuente: SEMARNAT (2022).

Análisis de lluvias mensuales

Derivado del análisis espacio-temporal de la precipitación mensual, se aprecian claramente tres periodos: húmedo, seco y de transición. En la Figura 8 se puede apreciar que para nuestra zona de estudio los meses con mayor promedio de acumulación de lluvia se registraron de julio a octubre, siendo agosto y septiembre los meses con mayor registro de lluvias (García-Amaro, 2004).

El comportamiento de la precipitación en estos meses húmedos guarda una estrecha relación con algunos eventos hidrometeorológicos presentes en el temporal, p. ej. ciclones tropicales.

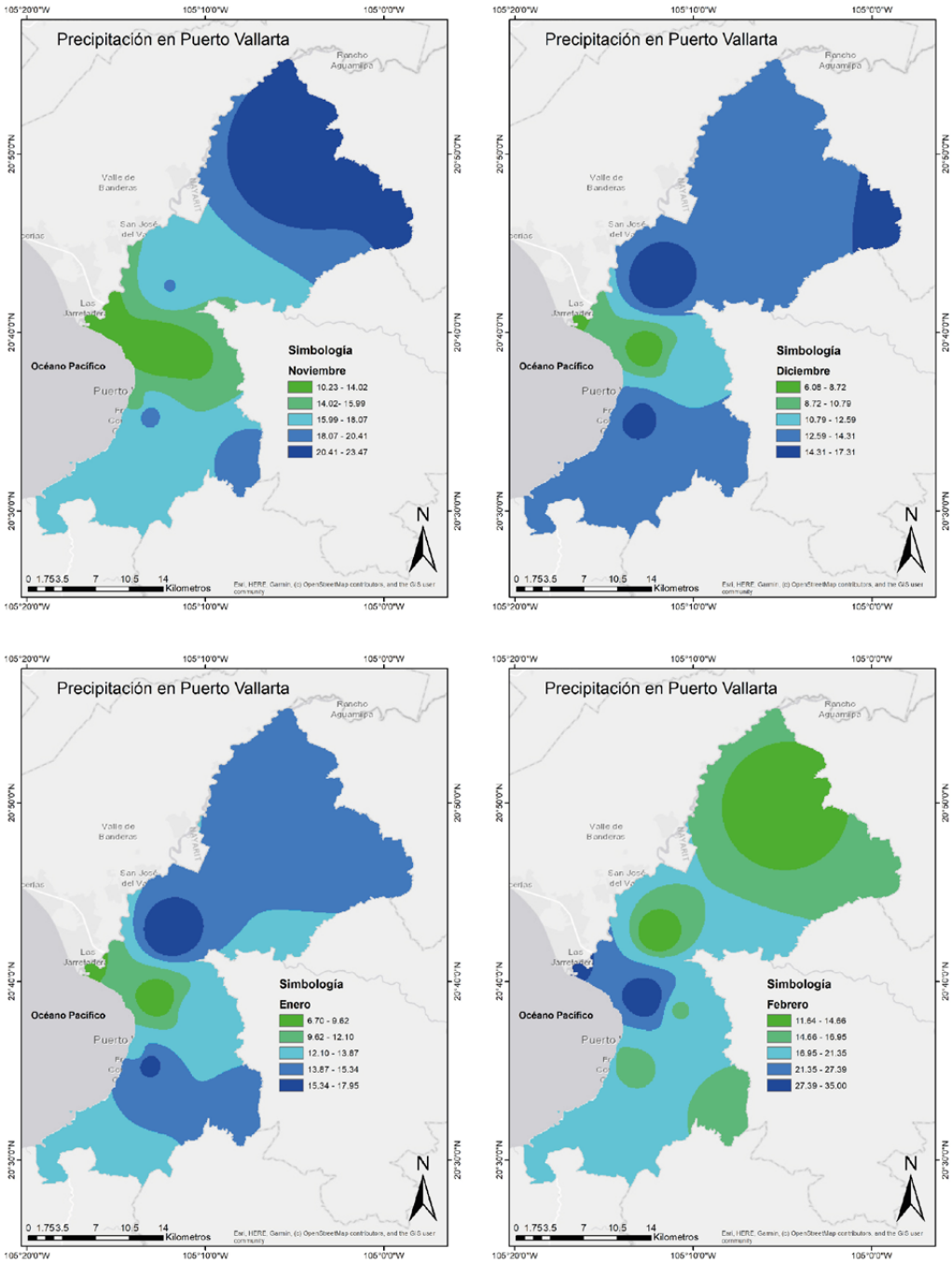


► **Figura 8.**
Distribución espacial de la precipitación media mensual en la zona de estudio en el periodo húmedo (julio, agosto, septiembre y octubre).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

La Figura 9 muestra los meses considerados como de transición, puesto que no corresponden al temporal de lluvia, pero se identifican algunos eventos aislados. En estos meses, la lluvia no obedece la distribución que se presenta en el temporal donde la precipitación es significativamente mayor.

Los meses de noviembre, diciembre y enero presentan una distribución de lluvia mayor en las zonas con crecimiento urbano que en las que se encuentran en la zona alta (comenzando de Ixtapa a las palmas) del municipio. Las variaciones de la precipitación no superan los 35 mm/mensuales, por lo que puede considerarse bastante bajo con relación al temporal húmedo en el municipio.



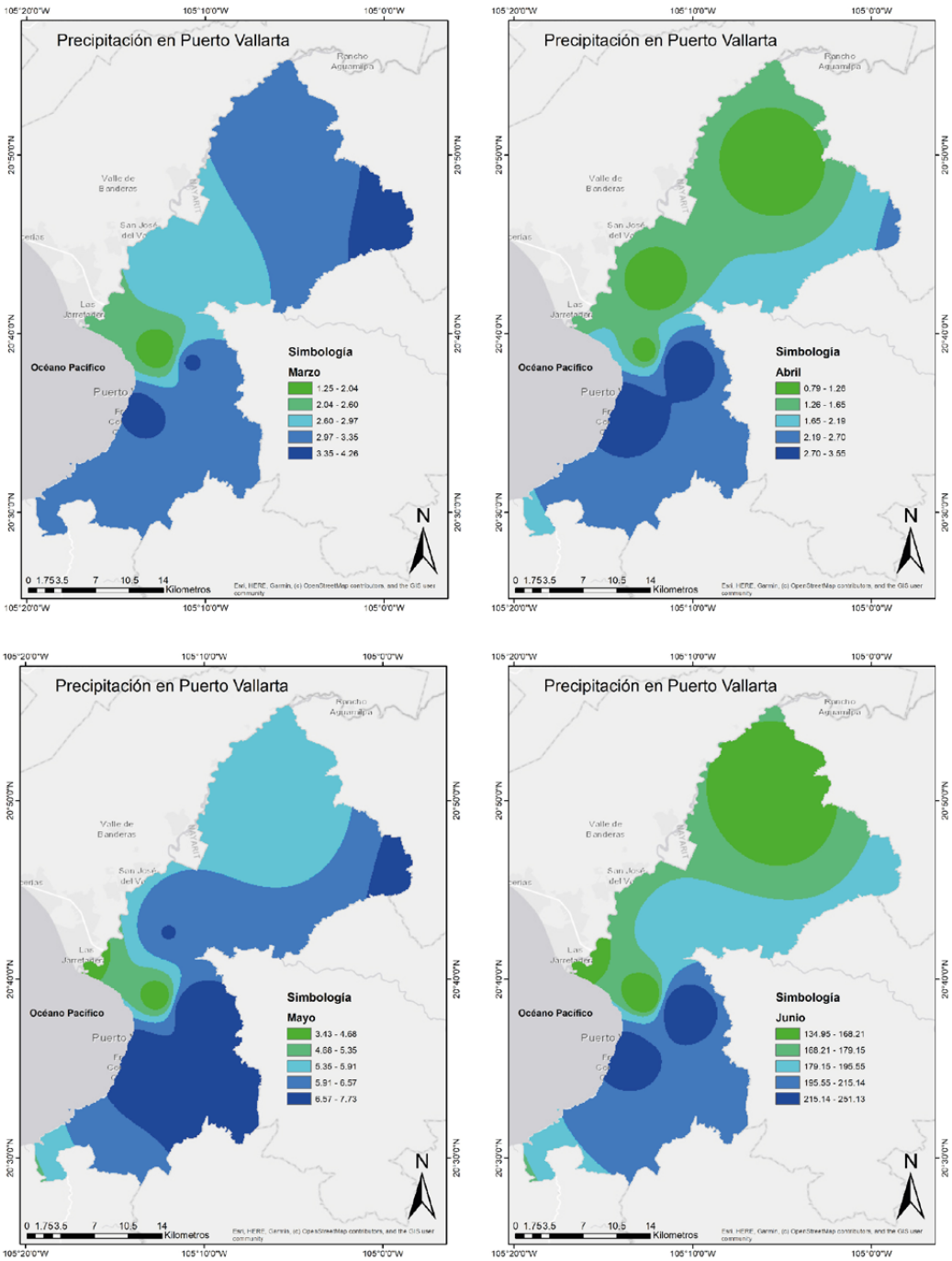
► **Figura 9.** Distribución espacial de la precipitación media mensual en la zona de estudio en el periodo de transición (noviembre, diciembre, enero y febrero).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

La Figura 10 presenta el periodo seco (marzo, abril y mayo), en donde se observa un claro decremento en la precipitación. En este periodo, los acumulados mensuales no superan los 8 mm, por lo que el impacto en la disponibilidad del recurso hídrico es mínimo. Los mapas de la distribución espacial de la poca precipitación que se documenta muestran que ésta se localiza en las zonas altas y a nivel del mar del municipio.

En este sentido, se podría argumentar que esta precipitación es coincidente con las zonas donde la vegetación es más abundante.

Al temporal seco, que corresponde a los meses de marzo-mayo, se asocia a los sistemas meteorológicos durante el periodo de estiaje, entre los cuales podemos mencionar: las altas temperaturas (que en ocasiones pueden generar olas de calor), bajos niveles de humedad y vientos fuertes (asociados a anticiclones permanentes que inhiben los procesos convectivos y favorecen la subsidencia). Este periodo resulta crítico para la región, puesto que, si las condiciones ambientales se conjugan con elementos antropogénicos, pueden desencadenar incendios forestales (CONAGUA, 2020).



► **Figura 10.** Distribución espacial de la precipitación media mensual en la zona de estudio en el periodo seco (marzo, abril y mayo).

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Caracterización de los eventos extremos

La caracterización de la precipitación sirve para identificar las zonas y periodos donde se cuenta con mayor disponibilidad del recurso hídrico, y puede servir, bajo determinadas circunstancias, en la zonificación del riesgo de inundación. No obstante, y a fin de complementar la caracterización de los eventos extremos de precipitación, se calcularon una serie de estadísticos e índices climáticos.

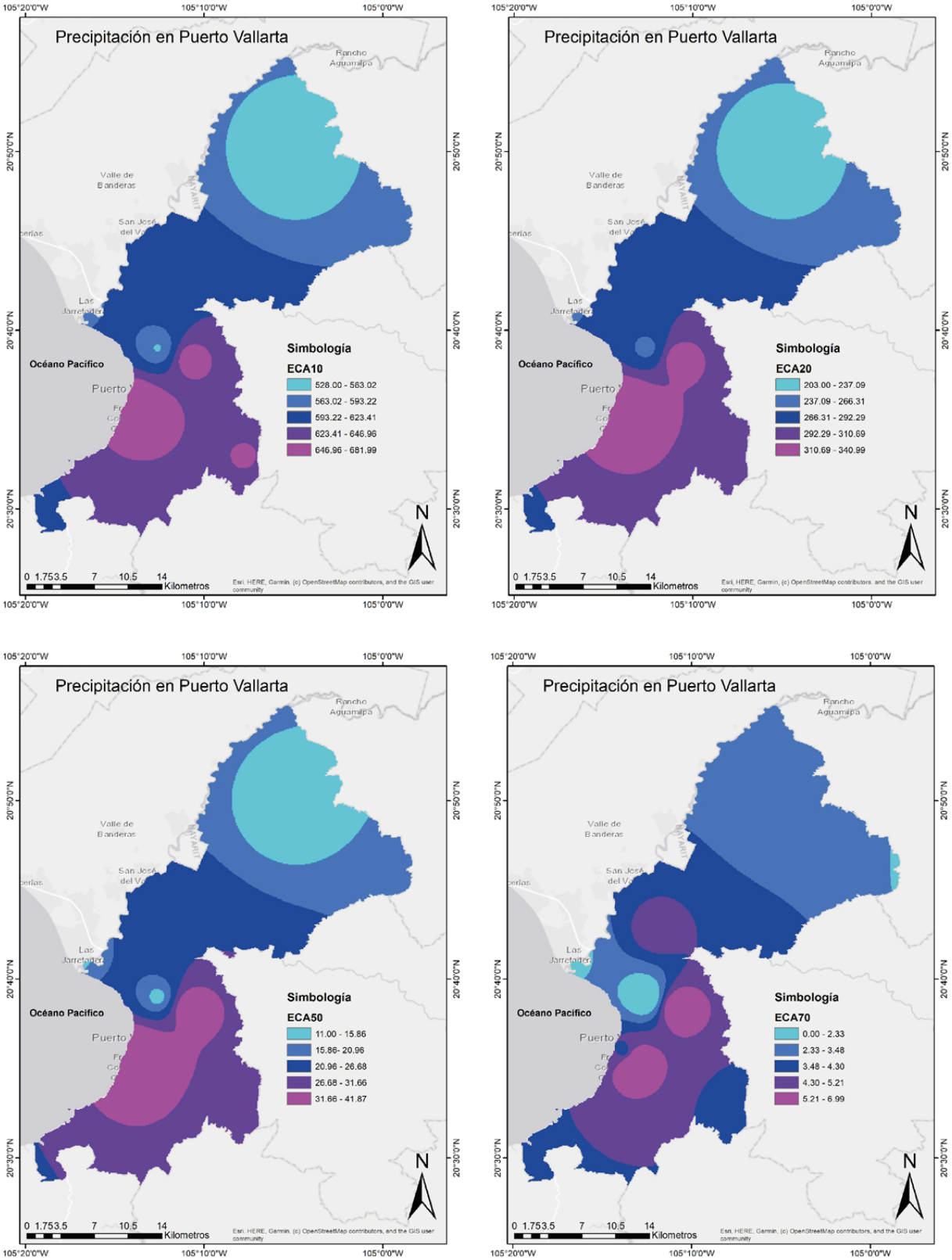
La Figura 11 muestra los índices de días de precipitación superior a 10 mm (precipitaciones intensas), 20 mm (precipitaciones muy intensas), 50 mm (precipitaciones extremas), 70 mm (precipitaciones extraordinarias). Los índices Energía Ciclónica Acumulada (ECA) están basados en los índices climáticos de temperaturas y precipitaciones extremas diarias propuestos por Schulzweida & Quast (2015).

En términos generales, se puede observar cómo al sur de la zona de estudio es donde los eventos de precipitación intensa son observados en mayor proporción. Esta coincide con la urbe, demostrando el potencial de peligrosidad que podría ser asociado. Con relación a las Figuras 10a y 10b, se puede notar que, durante el periodo de análisis de 10 años (aproximadamente 3650 días), se registraron un máximo de aproximadamente 680 y 340 días con precipitaciones superiores a 10 mm y 20 mm, respectivamente. Al expresar estos valores como porcentajes, se concluye que entre el 24% y el 12% de los días analizados experimentaron precipitaciones significativas en la zona.

En lo que respecta a los días con precipitaciones extremas (50 mm/día) y excepcionales (70 mm/día), se observa una tendencia a concentrarse principalmente en la región sur. En el caso de los 70 mm, se identifica una zona específica en el centro-norte de Puerto Vallarta. En estos escenarios, el número total de días que superan estos umbrales de precipitación disminuye significativamente. Por ejemplo, para el umbral de 50 mm se registran valores máximos de 41 días (correspondientes al 1.12% del total de días analizados), mientras que, para el umbral de 70 mm, se observan valores máximos de 7 días (equivalentes al 0.19% del total de días analizados). Este último umbral está claramente asociado a fenómenos muy específicos, como el impacto de ciclones tropicales o la formación de complejos convectivos de mesoescala (León-Cruz & Pineda-Martínez, 2021).

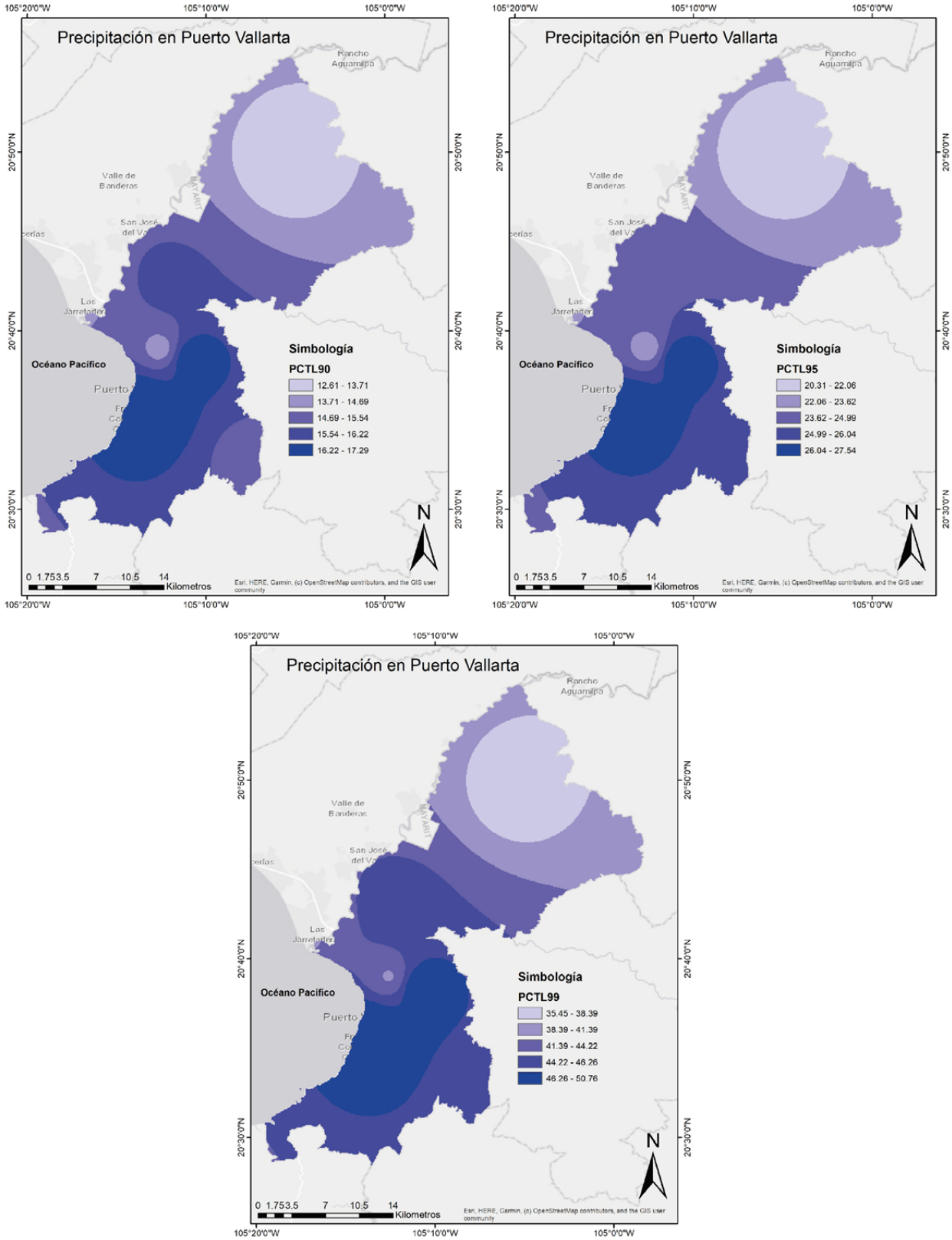
En el análisis de los índices climáticos, se realizaron cálculos de diversos percentiles de precipitación utilizando la serie completa de datos. Los resultados de los percentiles 90, 95 y 99, presentados en la Figura 12, resultan valiosos para describir espacialmente los eventos extremos, es decir, identificar los valores considerados como extremos en distintas partes de la zona de estudio. Se evidencia claramente que los valores máximos se ubican predominantemente al sur de Puerto Vallarta, disminuyendo a medida que nos desplazamos hacia el norte. En cuanto al percentil 90, los valores varían de 12 mm/día a 17 mm/día, en dirección de norte a sur. El percentil 95 sigue una distribución espacial similar, presentando valores entre 20 mm/día y 27 mm/día. Por último, para el percentil 99, los valores asociados a eventos extremos oscilan entre 35 mm/día y 50 mm/día.

Resulta interesante observar cómo los valores de percentiles se adecuan de buena forma con los índices climáticos previamente calculados. Por otro lado, es importante mencionar que existen fuertes variaciones de precipitaciones consideradas como extremas, a pesar de que la extensión del territorio de Puerto Vallarta es relativamente pequeña. Poniendo como ejemplo el percentil 99th, resulta evidente cómo una precipitación diaria de 35 mm puede ser considerada como extrema para la porción norte del territorio, mientras que la misma cantidad de lluvia, en la región centro y sur, está 15 mm por debajo de lo considerado como extremo. Estas diferencias encontradas permiten conocer la variabilidad espacial de los extremos y pueden resultar útiles para la caracterización del riesgo ante inundaciones.



► **Figura 11.** Distribución espacial de los índices de días de precipitación superior a 10 mm, 20 mm, 50 mm y 70 mm en la zona de estudio en el periodo 2010-2020.

Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.



► **Figura 12.** Distribución espacial de los percentiles 90th, 95th y 99th de la precipitación en la zona de estudio en el periodo 2010-2020.
Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Zonas de susceptibilidad de inundación asociada a las lluvias intensas en el área de estudio

Se realizó un análisis hidrográfico de la zona de estudio utilizando el sistema SIATL del INEGI (INEGI, 2022). Éste es un medio de difusión del conocimiento geográfico, específicamente sobre la hidrografía superficial, básico en la construcción de escenarios para diferentes proyectos, como contingencias ante eventos hidrometeorológicos. Para la creación del Modelo Digital de Elevación (MDE), se emplearon Global Mapper 18 y ArcGIS 10.4 con una resolución horizontal de 5 metros. Con el objetivo de identificar el gradiente del relieve desde la cabecera de la cuenca hasta la zona deltaica de Puerto Vallarta. A partir de este MDE, se generó un mapa de pendientes que se clasificó según los elementos de las unidades de relieve. Además, se incorporaron datos de uso de suelo y vegetación proporcionados por el INEGI en 2019.

Posteriormente, se creó un mapa geomorfológico mediante la aplicación del método TPI e I&P (Topographic Position Index), desarrollado por Iwahashi y Pike en 2007. Para llevar a cabo este proceso, se utilizó el sistema ArcGIS. Finalmente, se procedió a vectorizar, generalizar y suavizar los resultados, así como a superponer mapas. Se delimitaron las cuencas, subcuencas y microcuencas, junto con las áreas urbanas, con el fin de obtener una comprensión de las posibles consecuencias en diversos escenarios, especialmente aquellos relacionados con eventos meteorológicos extremos (Aceves-Quesada *et al*., 2016).

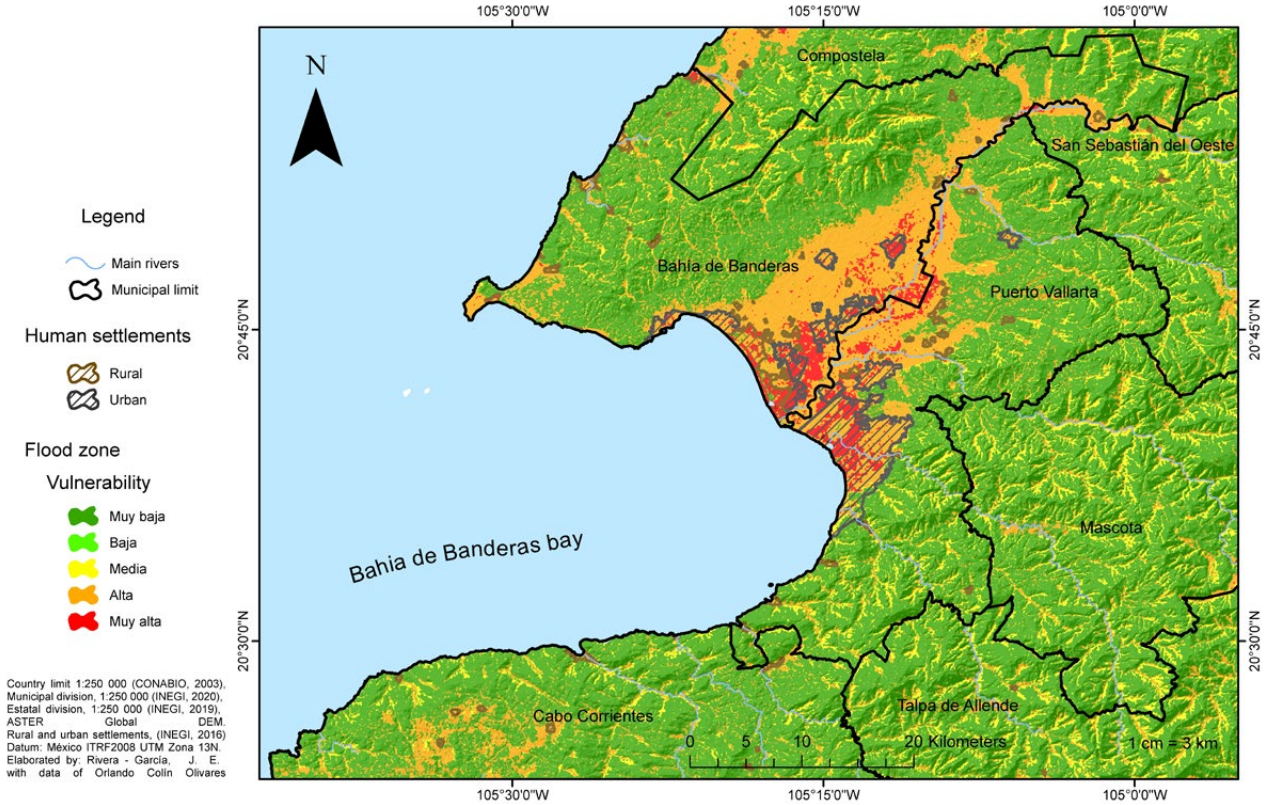
Los resultados obtenidos en el análisis espacial se les clasificó en una escala cualitativa, dicho análisis implica la identificación y evaluación de áreas que podrían verse afectadas negativamente por inundaciones como resultado de intensas precipitaciones pluviales. En este contexto, se emplea una escala cualitativa compuesta por cinco categorías (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) para clasificar la susceptibilidad de diferentes partes de Puerto Vallarta.

Los resultados revelan que las zonas urbanas y rurales del municipio, especialmente en Puerto Vallarta, registran valores considerables de vulnerabilidad, clasificados como "muy altos". Por otro lado, las partes altas de la bahía presentan niveles de susceptibilidad medio, bajo y muy bajo, fenómeno que se atribuye a las características orográficas de la región.

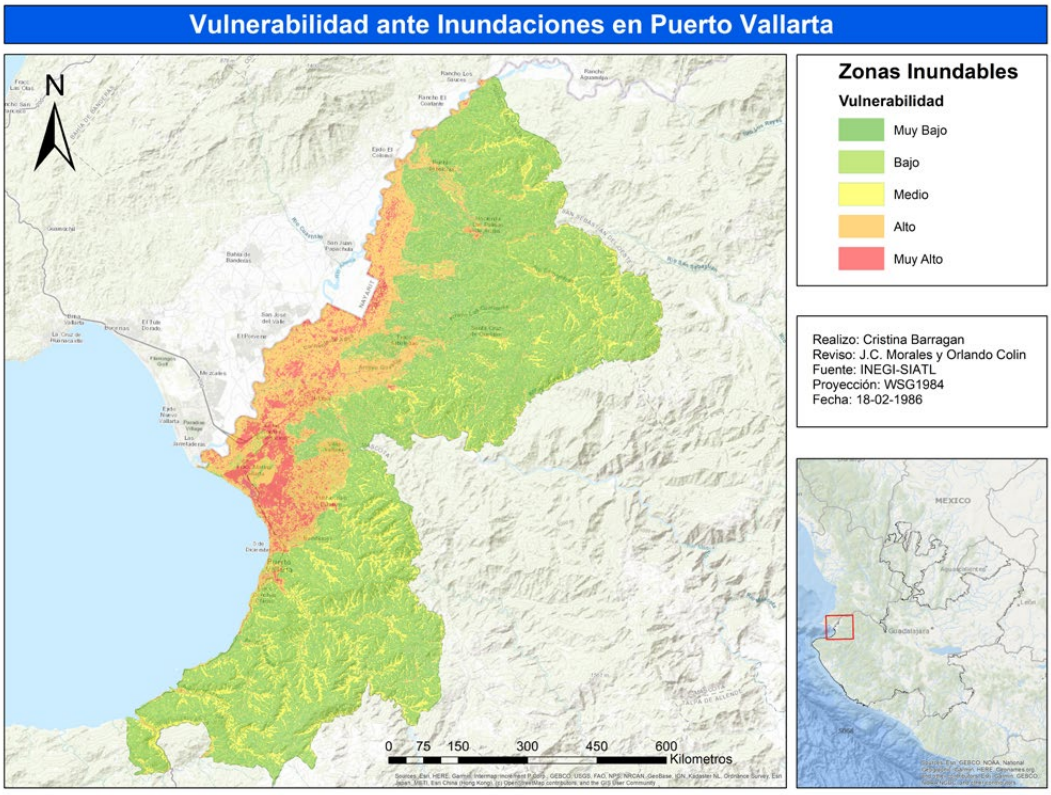
La observación detallada de la Figura 13 resalta que ciertas localidades, como Ixtapa, Las Juntas, Pitillal, Centro y Aurora, enfrentan un riesgo significativamente mayor a corto y mediano plazo. Estas áreas se encuentran ubicadas en zonas clasificadas como de "alta" y "muy alta" susceptibilidad, lo que subraya la importancia de implementar medidas de gestión de riesgos y adaptación en estas localidades específicas.

Los fenómenos meteorológicos, antes de llegar a la región donde se ubican las zonas urbanas, afectan primero la parte sur de la bahía, donde las inundaciones no son tan recurrentes como en la ciudad de Puerto Vallarta; y son generadas inicialmente por los aspectos geomorfológicos e hidrográficos (deslizamientos de laderas, remoción de masa, deforestación) de la cuenca que, durante los eventos de lluvias intensas, condicionan una vulnerabilidad natural. En la Figura 14 se puede apreciar la vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio.

Estos eventos se han incrementado por la pérdida de superficie de escurrimiento, como efecto del crecimiento de la superficie urbana, con poca o nula planeación y manejo. Un ejemplo de esto es el incremento de asentamientos humanos en las riberas del río Cuale y Pitillal, clasificados como de alto riesgo a las inundaciones. Esta situación ha contribuido a que los habitantes de la ciudad perciban que las inundaciones son más frecuentes e intensas.



► **Figura 13.** Susceptibilidad ante inundaciones en la región de bahía de Banderas.
Fuente: Orlando Colín, con datos de INEGI y CONABIO (2022).



► **Figura 14.** Vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio de Puerto Vallarta.

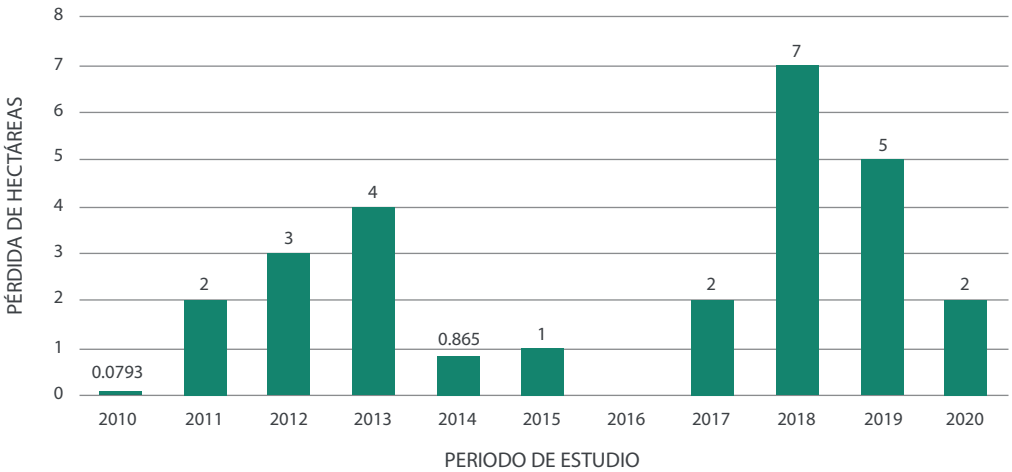
Fuente: Orlando Colín con datos de INEGI y CONABIO (2022).

Cambio de cobertura vegetal en la zona de estudio en el periodo 2010-2020

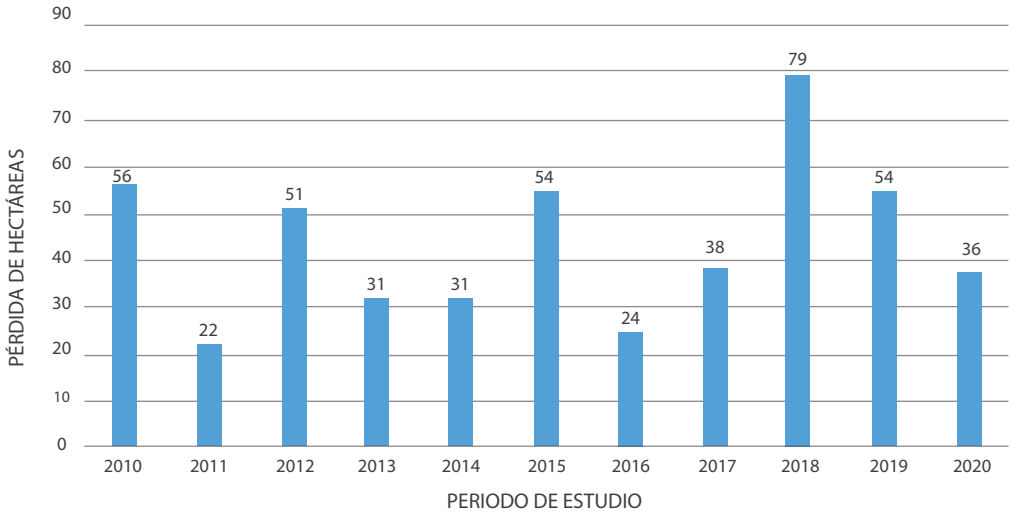
Los cambios de cobertura vegetal y el uso de suelo se relacionan con el desarrollo de las zonas costeras, pues éste implica la trasformación y pérdida de la biodiversidad asociada.

El municipio de Puerto Vallarta, en el periodo de estudio 2010 - 2020, ha perdido cerca de 27 ha de bosque primario húmedo, lo que representa 5.6% de su pérdida total de cobertura arbórea en el mismo periodo de tiempo (Figura 15). El área total de bosque primario húmedo en Puerto Vallarta disminuyó en 0.20% en este periodo de tiempo.

Para el año 2020, se registró una pérdida de 46 hectáreas de cobertura arbórea, lo que equivale a la emisión de 21.3 mil toneladas de CO_2. En el transcurso de una década, el área total de bosque primario húmedo disminuyó en un 0.20%, perdiendo un total de 476 hectáreas de cobertura arbórea.



► **Figura 15.** Pérdida del bosque primario en Puerto Vallarta, Jalisco, México.
Fuente: Elaboración propia con datos de Global Forest Watch (2022).



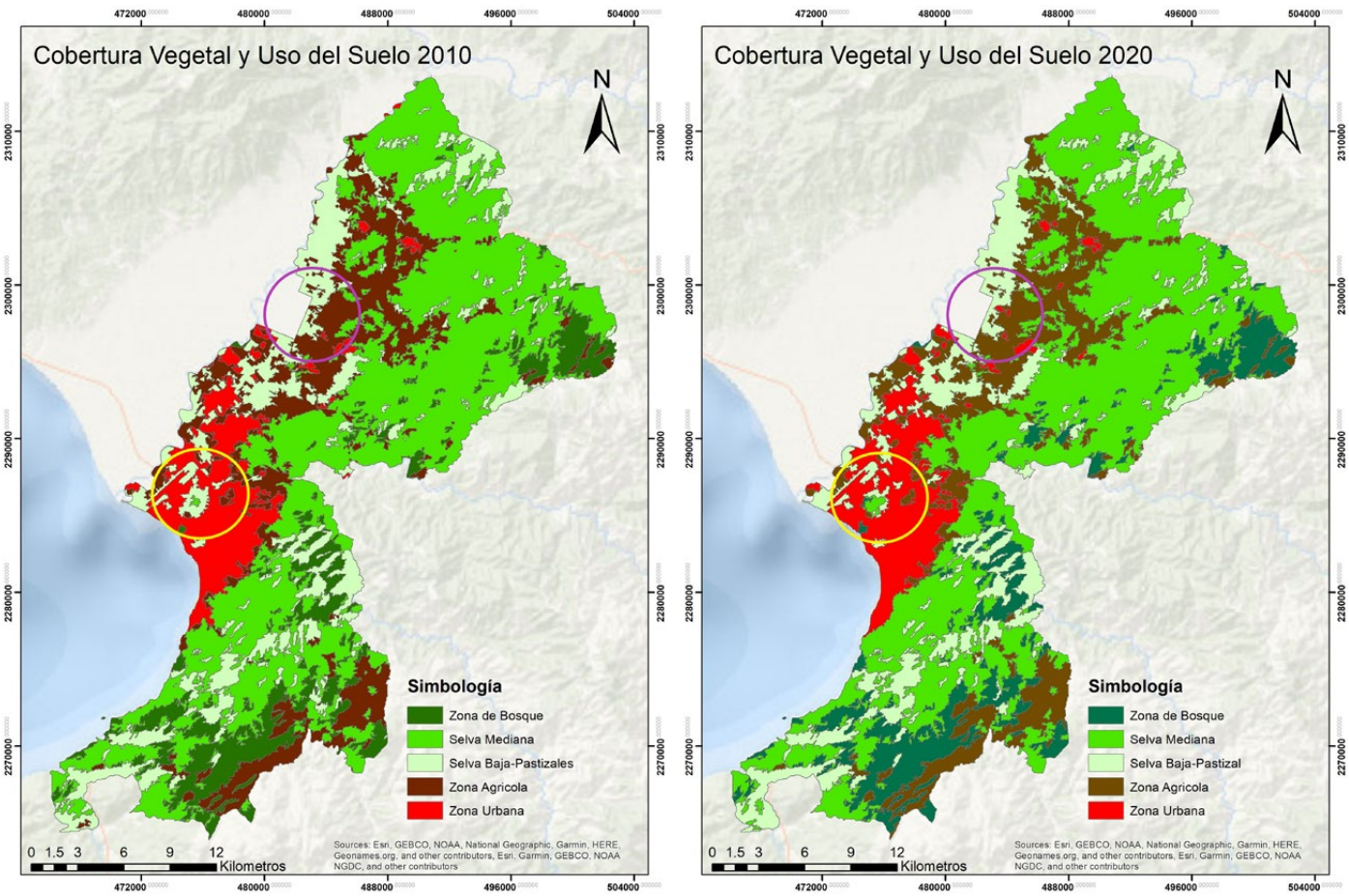
► **Figura 16.** Pérdida de cobertura arbórea.
Fuente: Elaboración propia con datos de Global Forest Watch (2022).

En el análisis espacial de los cambios en la cobertura vegetal en un periodo de 10 años, se evidencia una transformación en dicha cobertura. Sin embargo, estas transformaciones se han concentrado en la porción central y norte del municipio (Figura 17).

En la zonificación marcada con el circulo amarillo se puede notar una disminución en la vegetación de selva baja y humedales a pastizales, lo que puede repercutir en el incremento de la probabilidad de inundaciones en las zonas aledañas.

La pérdida de la cobertura vegetal asociada a las precipitaciones es consecuencia de la variabilidad espacial de los factores de las que depende. Elementos como la orografía, el uso del suelo y la propia precipitación son los factores más variables en el sistema orográfico de la zona.

La vegetación de bosque y las selvas medianas funcionan como zonas a de amortiguación para las partes bajas del municipio, y no muestran cambios drásticos en la zona. No obstante, el aparente crecimiento poblacional y la deforestación pueden cambiar de una zona de bajo riesgo a unade alto a riesgo de inundación.



► **Figura 17.** Resultados de la clasificación no supervisada de la cobertura vegetal de la región de estudio durante el periodo 2010-2020. Fuente: Elaboración propia (2022)

Conclusiones

Puerto Vallarta se encuentra bajo una fuerte presión por construcciones turísticas, principalmente complejos residenciales, elemento que esto se corroboró a través del análisis de cambio de cobertura de suelo que nos indica un crecimiento del área urbana.

Esta tendencia de pérdida de cobertura natural es producida por diferentes factores, entre ellos, el constante impulso turístico que recibe la franja costera para ser un detonador económico por parte de los planes de desarrollo de los municipios y programas de ordenamiento. Asimismo, asociado a la demanda de territorios por parte de extranjeros, quienes desean tener un bien inmueble en la zona. Estos intereses permean a los programas de desarrollo que, en su mayoría, no toman en cuenta a las dependencias como Protección Civil o a la propia susceptibilidad ante riesgos naturales y principalmente eventos hidrometeorológicos presentes en la zona de estudio.

La utilización de las bases de datos CHIRPS resulta una opción para la elaboración de análisis de precipitación para zonas que cuentan con pocas estaciones meteorológicas. En el estudio "The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes", Funk y *et al.* (2015) subrayan el desafío que enfrentan los científicos y analistas debido a la escasez de datos espaciales con baja latencia y un historial extenso al intentar contextualizar los eventos climáticos extremos más recientes en un marco histórico. Evidencian como los datos CHIRPS han sido diseñados específicamente para abordar esta carencia al ofrecer estimaciones de precipitación provenientes de datos combinados de satélites, cubriendo la mayoría de las regiones terrestres globales. Este conjunto de datos se caracteriza por su baja latencia, alta resolución, bajo sesgo y un extenso periodo de registro. Tal como se resalta en los datos presentados en su investigación, CHIRPS puede ser empleado de manera conjunta con modelos de superficie terrestre para llevar a cabo pronósticos efectivos de sequías a mitad de temporada o para examinar cambios recientes en la precipitación decadal en áreas con datos dispersos que dependen de la lluvia convectiva.

Sumado a la utilización de los SIG para la elaboración de la cartografía correspondiente a los análisis para determinar la susceptibilidad de inundaciones en el municipio.

Las zonas donde hay mayor riesgo de inundación coinciden con áreas donde la urbe tiene mayor concentración. Las áreas con mayor impacto de precipitación son aquellas cercanas a la costa, este comportamiento de distribución está presente durante la época de lluvias y puede estar asociado a los eventos hidrometeorológicos que se presentan cada año en el municipio.

El impacto de la pérdida de la cobertura vegetal natural también tiene efecto sobre la vulnerabilidad a desastres que se genera al momento de la presencia de lluvias intensas en la zona, puesto que se produce la pérdida de mantos freáticos, además se genera mayor erosión de las playas. Ésto da pie a que se genere un mayor riesgo para los habitantes de las zonas propensas a inundación.

» Referencias bibliográficas

Aceves-Quesada, J. F., Legorreta-Paulín, G., Lugo-Hubp, J., Umaña-Romero, J., & Legorreta-Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55. https://doi.org/10.14350/rig.46503

Arango-Gutiérrez, M., Branch-Bedoya, J. W., & Botero-Fernández, V. (2005). CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE COBERTURAS VEGETALES SOBRE IMÁGENES DIGITALES DE SENSORES REMOTOS: "LANDSAT - ETM+". *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 58(1), 2611–2634. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179914238003

CONAGUA. (2020). *Reporte del Clima en México, Reporte Anual 2020*. CONAGUA.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

García-Amaro, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen* (E. García, Ed.; Vol. 5). Instituto de Geografía, UNAM. URL

GFW. (2022). *Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico Deforestation Rates & Statistics*. Global Forest Watch. https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MEX/14/72/?map=eyJjYW5Cb3VuZCI6dHJ1ZX0%3D

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Descargas.

INEGI. (2022). *Relieve Continental*.

Iwahashi, J., & Pike, R. J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86(3–4), 409–440. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012

León-Cruz, J., & Pineda-Martínez, L. (2021). Eventos meteorológicos extremos en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco. In *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticosen sistemas socio-ecológicos* (pp. 221-232). AM Editores. https://www.researchgate.net/publication/353352288_Eventos_meteorologicos_extremos_en_la_zona_metropolitana_de_Guadalajara_Jalisco.

Li, Z., F. L. Zheng, & W. Z. Liu. 2007. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forestry Meteorolog*, 154-155, 147-155. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.019.

López Lambraño, A. A., Fuentes, C., González Sosa, E., & López-Ramos, A. A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 37-56. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-03

Miracle Sol, M. R., (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. *POLIS, Revista Latinoamericana*, 14. http://journals.openedition.org/polis/5105

OMM. (2021, November). *Peligros naturales y reducción de riesgos de desastre*. Organización Meteorológica Mundial. https://public-old.wmo.int/es/peligros-naturales-y-reducci%C3%B3n-de-riesgos-de-desastre.

Rodríguez González B., Pineda Martínez L. F. & Guerrero Cobián. (2018). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(4), e031. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.031.

Pucha-Cofrep, F.A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V. & Pucha-Cofrep, D.(2017). *Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS*. https://www.researchgate.net/publication/323945547_Fundamentals_of_GIS.

Schulzweida, U., & Quast, R. (2015). *Climate indices with CDO*. https://earth.bsc.es/gitlab/ces/cdo/raw/b4f0edf2d5c87630ed4c5ddee5a4992e3e08b06a/doc/cdo_eca.pdf

SEMARNAT. (2022). *Ciclones que han impactado en México*. Gobierno de México. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE04_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.

Velázquez-Ruiz, A., Martínez, R. L. M., & Carrillo-González, F. M. (2012). Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediante el sistema de Köppen, modificado por García, y técnicas de sistemas de información geográfica. *Investigaciones Geográficas*, 79, 7-19. https://doi.org/10.14350/rig.34534

2.3 Efecto del cambio climático sobre el oleaje derivado de ciclones tropicales en mares mexicanos

Christian M. Appendini
Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

Pablo Ruiz-Salcines
Centro de Cambio Climático (C3),
Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España

Palabras Clave: Oleaje extremo, diseño estructural, riesgo, peligro, ciclones tropicales.
ODS: 9 Oleaje extremo, diseño estructural, riesgo, peligro, ciclones tropicales.

Introducción

La amenaza de los ciclones tropicales (CT) generalmente está asociada con los vientos intensos, inundaciones debido a la marea de tormenta y los efectos de la precipitación que generan deslaves y desbordamiento de los ríos. Los peligros asociados a CT representan la segunda causa de muertes por desastres naturales a nivel global (Peduzzi *et al.*, 2012). En México los principales daños se derivan de la precipitación (deslaves e inundaciones pluviales) y la marea de tormenta. Sin embargo, existe otro peligro derivado de los CT, el oleaje generado por los fuertes vientos de los CT, el cual produce las mayores fuerzas que actúan sobre la infraestructura costera y las estructuras costa afuera. A pesar de esto, el peligro que representa el oleaje ha sido, por lo general, ignorado y no representa un tema de discusión cuando se realizan las evaluaciones de daños por CT. No obstante, cuando se realiza el diseño de estructuras marítimas, tanto costeras como costa afuera, el oleaje es uno de los principales parámetros de diseño. En el diseño y construcción de estructuras marítimas la altura de ola asociada a un periodo de retorno determinado recibe el nombre de altura de ola de diseño. De esta forma, se establece este periodo de retorno con base en la vida útil estimada de la estructura, determinando así el valor de la altura de ola que debe soportar la estructura en cuestión. Dado que México se encuentra ubicado entre dos zonas de ciclogénesis (Atlántico y Pacífico nororiental), el oleaje utilizado para calcular los esfuerzos sobre estructuras generalmente es el asociado a CT, haciendo que estos eventos sean críticos para el diseño de estructuras marítimas en México.

Considerando la importancia de los CT en el diseño estructural, es crítico realizar una correcta evaluación de estos eventos tanto desde el punto de vista de seguridad como de costos asociados a la estructura. Una de las fuentes más recurridas para la

evaluación de CT es, sin duda, la de los eventos históricos. Sin embargo, el registro histórico es relativamente corto, y no permite realizar estadísticas robustas, especialmente si consideramos estudios a nivel local, áreas de media o baja incidencia de CT. Por otro lado, se pueden emplear los CT generados por los propios Modelos de Circulación General (MCG), sin embargo, estos subestiman la frecuencia de los eventos y las velocidades máximas de viento que logran alcanzar (Camargo, 2013). Debido a ello se han desarrollado técnicas que permiten generar una gran cantidad de eventos sintéticos de CT, que permiten realizar estadísticas robustas en zonas con información histórica insuficiente. Entre estos eventos se pueden encontrar los derivados de la estadística de CT históricos en una zona o cuenca en particular (Bloemendaal *et al*., 2022; Nederhoff *et al*., 2021) y eventos derivados en base en la física de los CT (K. Emanuel, 2021; Lee *et al*., 2018; Vickery *et al*., 2000). Si bien los eventos sintéticos derivados de la estadística de eventos históricos podrían representar de manera más adecuada la estadística para dicho periodo histórico, no es posible esperar que realicen una predicción adecuada de la estadística futura, debido al efecto del calentamiento sobre los CT, donde se esperan cambios importantes sobre las características de los CT (Knutson *et al*., 2020).

Considerando lo anterior, algunos trabajos de eventos sintéticos, derivados de estadísticos de CT, incorporan aumentos proyectados para la intensidad de los CT bajo cambio climático (Bloemendaal *et al*., 2022; Leijnse *et al*., 2022). Sin embargo, estos eventos no logran reproducir nuevas zonas de ciclogénesis, ni discriminar zonas diferenciadas para la intensificación de eventos. Por otro lado, existen los modelos determinísticos, donde se consideran distintos factores que afectan la ciclogénesis y la intensificación de los ciclones tropicales, como lo es la temperatura y contenido energético del océano, la cizalla del viento, humedad relativa, entre otros parámetros. Estos modelos incorporan la física de los CT y generan eventos utilizando MCG para generar grandes bases de eventos sintéticos que permitan realizar estadísticas robustas bajo climas proyectados (Emanuel *et al*., 2008; Lee *et al*., 2020). Utilizando estos eventos, se han podido realizar evaluaciones del efecto del cambio climático sobre los CT (Emanuel, 2021; 2013) que, junto con otros trabajos, han logrado establecer que el calentamiento global conllevará un aumento en la probabilidad de eventos de categorías mayores, en particular los de categoría 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson, como se presentan en la revisión de trabajos presentada por Knutson *et al*. (2020) y determinado por el IPCC (2021).

El uso de eventos sintéticos ha permitido realizar estimaciones de los peligros por viento y marea de tormenta, pero existen escasos trabajos donde se estima el efecto del cambio climático sobre el oleaje extremo en zonas tropicales. Para México, a pesar de la importancia del oleaje para el diseño de plataformas y puertos, solamente existe el trabajo realizado por Appendini *et al*. (2017) para el Golfo de México, al menos como trabajo publicado de acceso público. De esta manera, el objetivo de este trabajo es presentar una evaluación del oleaje generado por CT en mares mexicanos, evaluando el efecto del cambio climático sobre el oleaje de diseño de estructuras marítimas.

Datos y métodos

Para estimar el oleaje generado por CT se siguió la metodología propuesta por Appendini *et al*. (2017), donde el primer paso es determinar los eventos sintéticos a partir de los cuales se obtendrá el oleaje. Los eventos sintéticos se generaron siguiendo la metodología de Emanuel *et al*. (2008) y Emanuel (2013), derivados con base en las condiciones de meso-escala obtenidas de seis MCG del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) bajo el clima actual (1980-2005) y el escenario

futuro Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP 8.5) (2075-2100). El escenario RCP 8.5 representa un futuro probable en el que las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando de manera significativa a lo largo del siglo XXI, sin que se produzcan intervenciones sustanciales que permitan mitigar el cambio climático o se realicen demasiado tarde. La trayectoria de este escenario es que, aparentemente, se ha seguido hasta la actualidad.

En el estudio se emplearon los siguientes MCG: 1) el Modelo Climático 3 (GFDL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica/Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (NOAA/GFDL) (Griffies *et al.*, 2011), 2) el Modelo Ambiental Global Hadley 2 del Met Office del Reino Unido (HADGEM) (Jones *et al.*, 2011), 3) el CM5A-LR del Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) (Dufresne *et al.*, 2013), 4) el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima del Centro de Investigación del Sistema Climático/Instituto Nacional de Estudios Ambientales/Agencia Japonesa de Investigación Marina-Tierra (MIROC) (Watanabe *et al.*, 2010), 5) el Modelo MPI-ESM-MR del Instituto Max Planck (MPI) (Giorgetta *et al.*, 2013), y 6) el Modelo del Sistema Climático de la Comunidad del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Versión 4 (CCSM) (Gent *et al.*, 2011).

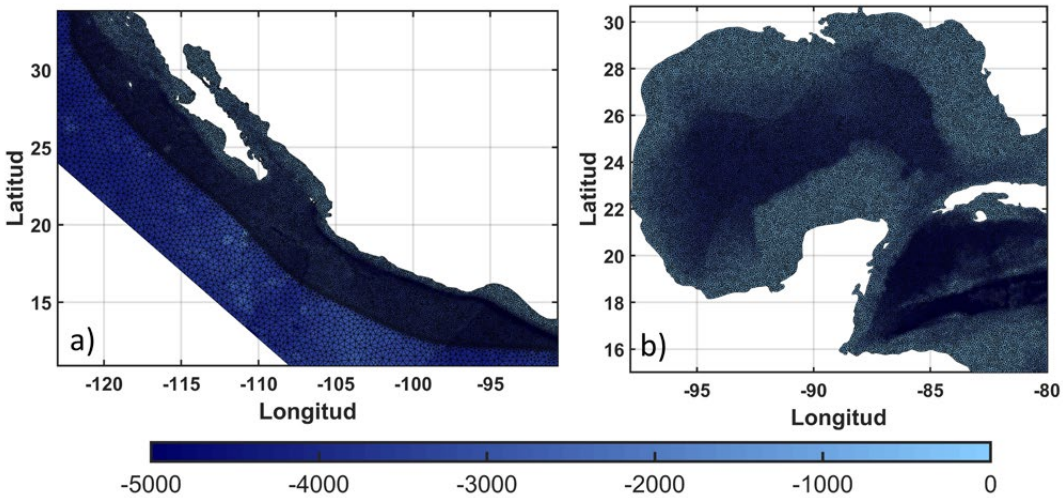
La generación de los eventos sintéticos se basa en la siembra aleatoria de vórtices con una intensidad de 12 m/s, los cuales, dependiendo de las condiciones oceánicas y atmosféricas (provistas por los MCG), pueden disiparse o intensificarse y convertirse en CT y se desplazan por medio de un modelo de advección beta. La Tabla 1 muestra el número de eventos generados en cada una de las zonas de estudio, que incluyen el Pacífico mexicano (EPAC) y el Golfo de México y Caribe oeste (GOMC).

► **Tabla 1.** Número de ciclones tropicales sintéticos derivados de cada MCG, utilizados en cada zona de estudio para el clima actual (1975-2005) y clima futuro (2070-2100).

Modelo de circulación general y periodo estudiado		**Golfo de México y Caribe oeste**	**Pacífico mexicano**
		#Eventos	**Eventos totales**
Clima actual (1975 - 2005)	CCSM	1115	3356
	MPI	1657	3323
	MIROC	861	3321
	IPSL	769	3344
	HADGEM	700	3346
	GFDL	1810	3172
	Promedio	**1009.55**	**3309.09**
Clima futuro RCP 8.5 2070 - 2100	CCSM	1057	3368
	MPI	1608	3198
	MIROC	609	3160
	IPSL	674	3246
	HADGEM*	785	3312
	GFDL	1726	3224
	Promedio	**916.46**	**3249.85**

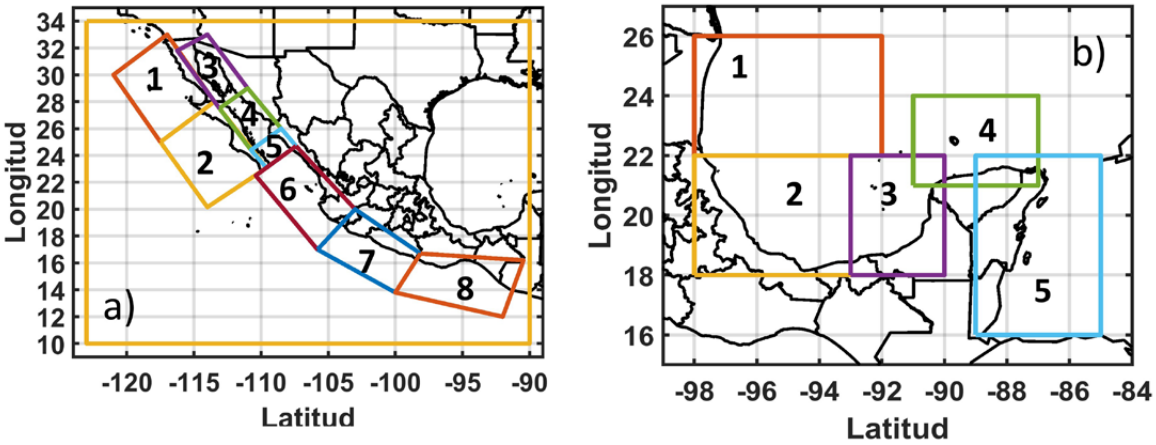
Fuente: Elaboración propia.

Los CT sintéticos derivados con esta técnica presentan información de posición, tiempo, intensidad, radio de vientos máximos y presión central, con la cual se generaron los campos de viento usando el modelo de Emanuel & Rotunno (2011), los cuales posteriormente fueron utilizados para forzar el modelo de oleaje de tercera generación MIKE 21 SW. Se habilitaron modelos computaciones para el EPAC y el GOMC, respectivamente, utilizando mallas no estructuradas con una resolución mínima de 40 km y máxima de 10 km para el EPAC, sí como una resolución de 10 km para el GoMC (Figura 1). Para cada evento sintético se obtuvo el mapa de oleaje generado a lo largo de cada paso de tiempo en la trayectoria, luego se procesaron los resultados analizando cada elemento de la malla para generar mapas de envolventes de altura significante (Hs) máxima a lo largo de la vida de cada CT. Para analizar el oleaje, se dividió cada una de las áreas estudiadas en zonas (Figura 2), sobre las cuales se realizó un análisis de probabilidad usando *grid pooling* y empleando un análisis de eventos extremos, para calcular la probabilidad de no excedencia (o periodo de retorno) en cada zona determinada.



► **Figura 1.** Mallas utilizadas para la modelación de oleaje para el a) Pacífico mexicano, y b) Golfo de México y Caribe oeste.

Fuente: Elaboración propia.

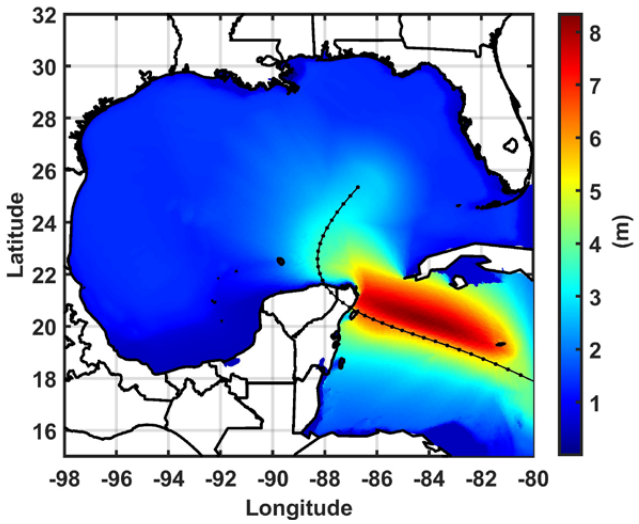


► **Figura 2.** Zonificación del área de estudio para determinar el oleaje de diseño en distintas zonas del a) Pacífico mexicano, y b) Golfo de México y Caribe oeste. La numeración en cada sub-figura denota un área de análisis, como se presenta en los resultados.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Se simularon un total de 6,912 y 19,862 eventos sintéticos para el clima actual; así como 6,459 y 19,508 para el clima futuro para el GOMC y EPAC, respectivamente. La diferencia en la cantidad de eventos simulados entre ambas áreas de estudio se debió a que en el GOMC se utilizó una base de datos correspondiente a toda la cuenca del Atlántico norte (conformada por 3,100 eventos por cada MCG) mientras que para el EPAC se generaron los eventos específicamente para la zona de estudio. De esta manera, se simularon un total de 52,741 eventos sintéticos considerando ambas cuencas y ambos periodos climáticos. Para cada evento sintético se generó el mapa de envolventes máximas de altura de ola significante (Hs, un ejemplo se muestra en la Figura 3), a partir de los cuales se realizó el análisis de eventos extremos.



► **Figura 3.** Mapa de envolvente de valores máximos de altura de ola significante para un evento sintético con una categoría máxima alcanzada de huracán 3 en la escala Saffir-Simpson.

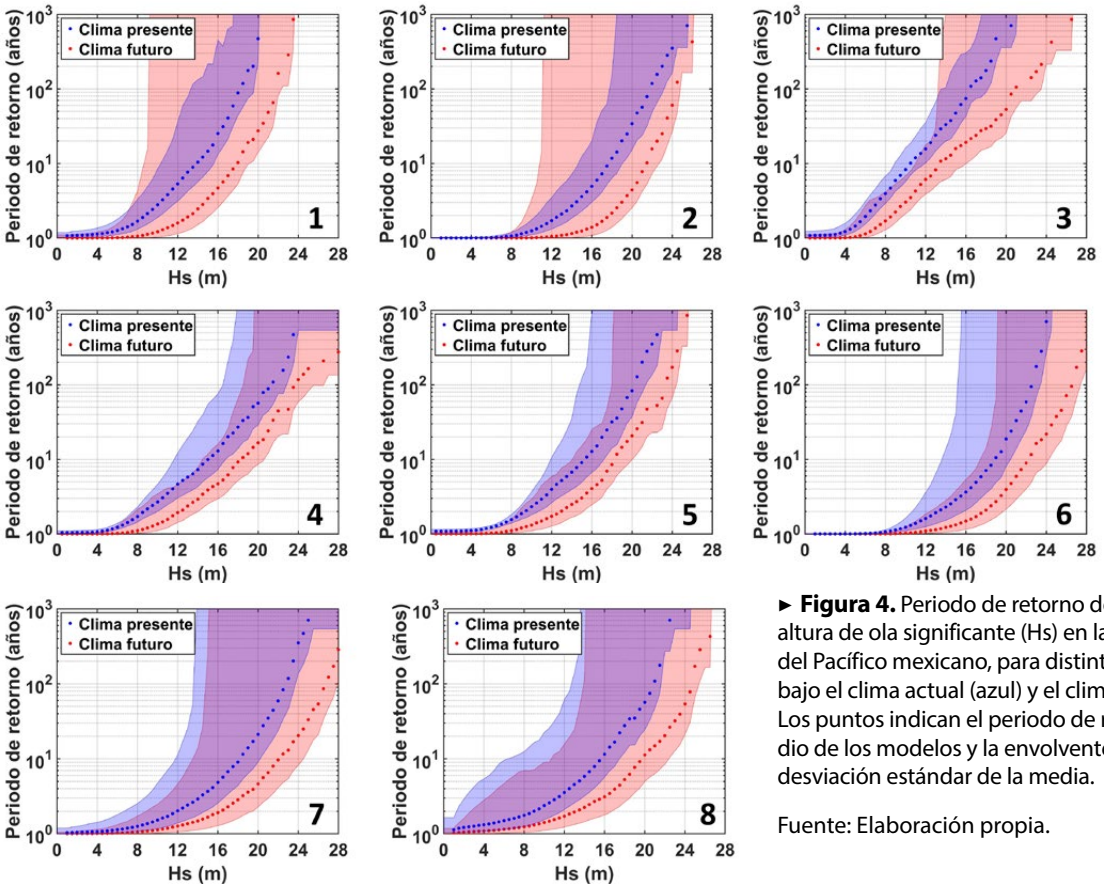
Fuente: Elaboración propia.

El periodo de retorno se obtuvo a partir de las probabilidades de excedencia obtenidas directamente a partir de la distribución empírica de los datos de oleajes registrados. La cantidad de eventos sintéticos empleados y la frecuencia de ocurrencia de CT en las áreas estudiadas permitieron el cálculo de periodos de retorno superiores a los 1,000 años sin necesidad de emplear un ajuste con las funciones de distribución típicamente empleadas en el análisis extremal (e.g., Weibull, Fréchet, Gumbel, Pareto). La Figura 4 muestra el periodo de retorno para las ocho zonas del EPAC; mientras que la Figura 5, para las cinco zonas del GOMC.

En todas las zonas se obtuvo que el periodo de retorno de la Hs promedio del ensamble indica que el clima futuro conllevará un aumento en la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos de oleaje. Por ejemplo, en la zona 7 del EPAC (Figura 6), correspondiente a la zona de Colima a Guerrero, las Hs inferiores a 7 m no experimentarán un cambio destacable en el periodo de retorno. Sin embargo, una ola Hs de 24 m presenta un periodo de retorno de aproximadamente 360 años bajo el clima actual y de tan sólo 20 años bajo las condiciones de clima futuro en el escenario RCP 8.5. No obstante, es destacable que la envolvente de incertidumbre, particularmente para el clima futuro, es grande, por lo que no es posible asegurar con un alto grado de seguridad que el oleaje extremo efectivamente será más probable en el clima futuro.

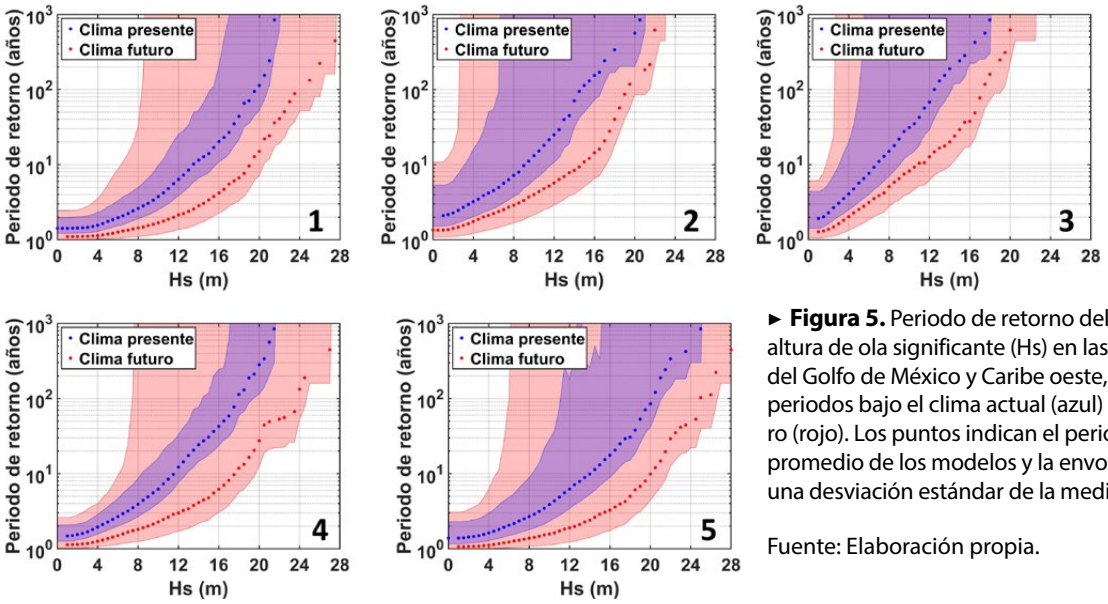
Esto se debe principalmente a la propia incertidumbre asociada a los actuales MCG existentes, los cuales, a pesar de ello, son la mejor herramienta disponible en la actua-lidad en la estimación de las condiciones climáticas en el futuro, y la empleada por el IPCC. Como se observa en las Figuras 4 y 5, la envolvente de incertidumbre del clima futuro cubre totalmente la envolvente de incertidumbre del clima actual, salvo en los casos del EPAC en el Golfo de California y al sur de la península de Baja California.

Sin embargo, la media del ensamble, es decir, la media de los valores derivados de los MCG empleados, nos muestra que la mayoría de los MCG resultan en una mayor ocurrencia de eventos sintéticos que generan oleaje con mayores alturas. Estos resultados muestran así un incremento en la probabilidad de ocurrencia de oleaje extremo bajo el escenario de RCP 8.5.



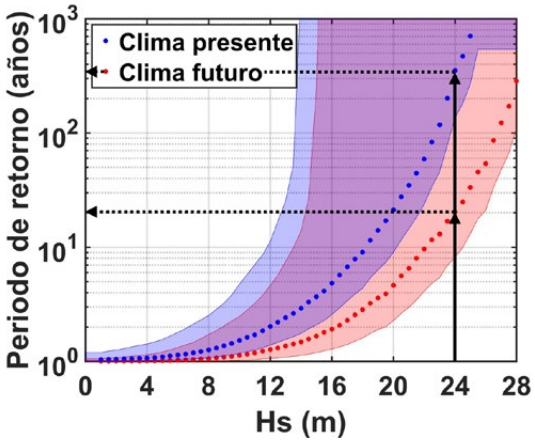
► **Figura 4.** Periodo de retorno del ensamble de altura de ola significante (Hs) en las distintas áreas del Pacífico mexicano, para distintos periodos bajo el clima actual (azul) y el clima futuro (rojo). Los puntos indican el periodo de retorno promedio de los modelos y la envolvente muestra una desviación estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 5.** Periodo de retorno del ensamble de altura de ola significante (Hs) en las distintas áreas del Golfo de México y Caribe oeste, para distintos periodos bajo el clima actual (azul) y el clima futuro (rojo). Los puntos indican el periodo de retorno promedio de los modelos y la envolvente muestra una desviación estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia.

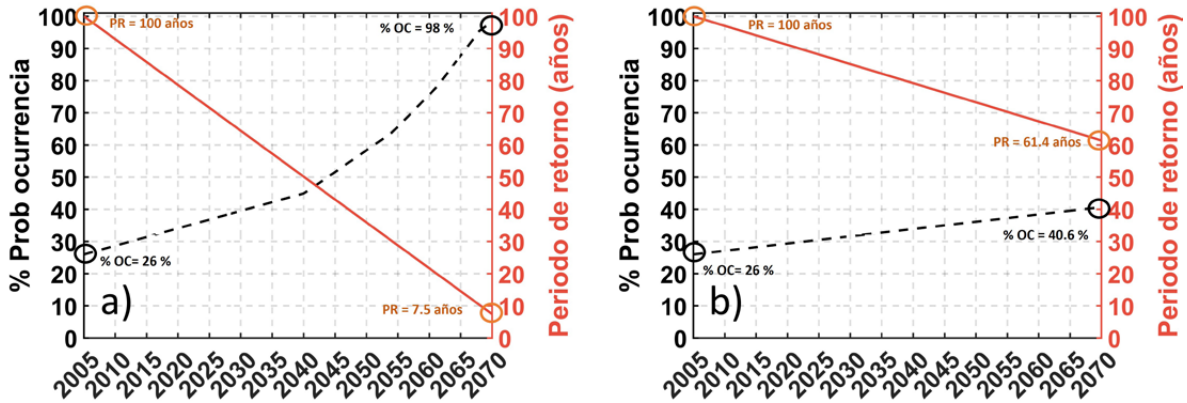


► **Figura 6.** Periodo de retorno del ensamble de altura de ola significante (Hs) en el área comprendida entre Colima y Guerrero, donde las flechas indican el periodo de retorno de una ola con altura significante de 24 m, tanto para el clima actual como para el clima futuro. Los puntos indican el periodo de retorno promedio de los modelos y la envolvente muestra una desviación estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia.

Esta reducción en el periodo de retorno (o aumento en la probabilidad de ocurrencia) para eventos extremos derivados de CT en mares mexicanos tiene una implicación de gran relevancia para el diseño de estructuras e instalaciones marítimas. Si consideramos que la altura de ola de diseño se obtiene típicamente como la altura de ola con periodos de retorno de 50, 100 o 500 años, y determinamos la altura de ola de diseño bajo el clima actual, conforme avanzamos hacia un clima que evoluciona bajo las condiciones del escenario RCP 8.5 por el aumento de las emisiones de gases de invernadero, tenemos que, de manera efectiva, esa altura de ola ya no corresponde al periodo de retorno escogido (e.g., 100 años), sino a un periodo de retorno menor.

En la Figura 7 se muestra una gráfica para el área 6 del EPAC, correspondiente de la mitad sur de Sinaloa a la mitad norte de Colima, y del área 2 del GOMC correspondiente a Veracruz y la mitad poniente de Tabasco. En estas gráficas se muestra cómo una ola, con altura correspondiente al periodo de retorno de 100 años, disminuye su periodo de retorno conforme avanzamos hacia el clima futuro bajo el escenario RCP 8.5, donde para la zona del EPAC corresponde a un periodo de retorno de 7.5 años en el año 2070; y en el GOMC, a un periodo de retorno de 61.4 años. Esta disminución en el periodo de retorno implica un aumento en la probabilidad de fallo de la estructura, que se relaciona directamente a la probabilidad de presencia del evento o altura de ola de diseño. Dicha probabilidad está representada en la misma Figura 7, en el eje izquierdo (y) de las figuras donde tenemos que, para el área 6 del EPAC, la probabilidad de que ocurra el evento de diseño durante la vida de una estructura, diseñada para un periodo útil de 30 años, aumenta de un 26% en el clima actual a un 98% en el clima futuro. En el caso del área 2 del GOMC, la probabilidad de ocurrencia aumenta de un 26% a 40.6%. Si bien, en el caso del área 2 del GOMC, el aumento puede parecer mínimo, sigue siendo un aumento considerable que afecta la probabilidad de fallo de una estructura, por lo cual es crítico tener en consideración el efecto del cambio climático para determinar los parámetros de diseño. El caso del área 6 del EPAC es aún más crítico, pues una probabilidad de ocurrencia del 98% para el oleaje de diseño implica que esa estructura, diseñada bajo condiciones actuales, muy probablemente experimentará eventos que superen la altura de ola máxima para la que la estructura fue diseñada, en caso de que su vida útil se contemple para el año 2070 o más.



► **Figura 7.** Porcentaje de probabilidad (ordenada izquierda) de que una ola con un periodo de retorno de 100 años, en el clima actual, ocurra a medida que transitamos hacia un clima futuro. La línea discontinua indica la vida útil proyectada de una estructura, y la línea roja muestra el valor del periodo de retorno decreciente (ordenada derecha) de la ola con periodo de retorno de 100 años, en el clima actual, a medida que nos acercamos a un clima futuro. a) área 6 del EPAC, (de la mitad sur de Sinaloa a la mitad norte de Colima), y b) área 2 del GOMC (Veracruz y la mitad poniente de Tabasco).

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo estudiamos el efecto del cambio climático sobre el oleaje generado por CT en mares mexicanos. Debido a la baja resolución de MCG para resolver adecuadamente los CT, utilizamos eventos sintéticos determinísticos para forzar un modelo de oleaje y así poder realizar un análisis de valores extremos que permita determinar las condiciones de oleaje extremo bajo el clima actual y bajo el escenario RCP 8.5 para el clima futuro. Los resultados obtenidos muestran que tanto para el EPAC como para el GOMC se espera que en el clima futuro el oleaje de diseño incremente, ya que aumentará la probabilidad de que se presenten los eventos más extremos. En este estudio mostramos las implicaciones que esto tendrá sobre el diseño de estructuras marítimas, y cómo la probabilidad de fallo en las estructuras aumentará conforme nos acercamos a las condiciones del clima futuro, si se realizan diseños utilizando las condiciones del clima actual. De esta manera, este trabajo alerta sobra la importancia de incorporar escenarios del cambio climático para el diseño de estructuras marítimas en México.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano, CEMIE-Océano (OLE-1). PRS actualmente está financiado por el programa Next Generation EU de la Unión Europea. Agradecemos el apoyo brindado por Rafael Meza Padilla y Ana Ramírez Manguilar en los inicios de estos trabajos, así como el apoyo de cómputo brindado por Gonzalo Uriel Martín Ruiz.

» Referencias bibliográficas

Appendini, C. M., Pedrozo-Acuña, A., Meza-Padilla, R., Torres-Freyermuth, A., Cerezo-Mota, R., López-González, J., & Ruiz-Salcines, P. (2017). On the Role of Climate Change on Wind Waves Generated by Tropical Cyclones in the Gulf of Mexico. *Coastal Engineering Journal*, 59(2), 1740001-1-1740001–1740032. https://doi.org/10.1142/S0578563417400010

Bloemendaal, N., de Moel, H., Martinez, A. B., Muis, S., Haigh, I. D., van der Wiel, K., Haarsma, R. J., Ward, P. J., Roberts, M. J., Dullaart, J. C. M., & Aerts, J. C. J. H. (2022). A globally consistent local-scale assessment of future tropical cyclone risk. *Science Advances*, 8(17). https://doi.org/10.1126/sciadv.abm8438

Camargo, S. J. (2013). Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 26(24), 9880–9902. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00549.1

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., … Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2123–2165. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1

Emanuel, K. (2021). Response of Global Tropical Cyclone Activity to Increasing CO2: Results from Downscaling CMIP6 Models. *Journal of Climate*, 34(1), 57–70. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0367.1

Emanuel, K. A. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12219–12224. https://doi.org/10.1073/pnas.1301293110

Emanuel, K., & Rotunno, R. (2011). Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(10), 2236–2249. https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05024.1

Emanuel, K., Sundararajan, R., & Williams, J. (2008). Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 347–368. https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-347

Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19), 4973–4991. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1

Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., … Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. https://doi.org/10.1002/jame.20038

Griffies, S. M., Winton, M., Donner, L. J., Horowitz, L. W., Downes, S. M., Farneti, R., Gnanadesikan, A., Hurlin, W. J., Lee, H.-C., Liang, Z., Palter, J. B., Samuels, B. L., Wittenberg, A. T., Wyman, B. L., Yin, J., & Zadeh, N. (2011). The GFDL CM3 Coupled Climate Model: Characteristics of the Ocean and Sea Ice Simulations. *Journal of Climate*, 24(13), 3520–3544. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3964.1

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303–E322. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1

Lee, C., Tippett, M. K., Sobel, A. H., & Camargo, S. J. (2018). An Environmentally Forced Tropical Cyclone Hazard Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(1), 223–241. https://doi.org/10.1002/2017MS001186

Leijnse, T. W. B., Giardino, A., Nederhoff, K., & Caires, S. (2022). Generating reliable estimates of tropical-cyclone-induced coastal hazards along the Bay of Bengal for current and future climates using synthetic tracks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 1863–1891. https://doi.org/10.5194/nhess-22-1863-2022

Nederhoff, K., Hoek, J., Leijnse, T., van Ormondt, M., Caires, S., & Giardino, A. (2021). Simulating synthetic tropical cyclone tracks for statistically reliable wind and pressure estimations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 861–878. https://doi.org/10.5194/nhess-21-861-2021

Peduzzi, P., Chatenoux, B., Dao, H., De Bono, A., Herold, C., Kossin, J., Mouton, F., & Nordbeck, O. (2012). Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Climate Change*, 2(4), 289–294. https://doi.org/10.1038/nclimate1410

Vickery, P. J., Skerlj, P. F., & Twisdale, L. A. (2000). Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model. *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1222–1237. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1222).

2.4 Características de los eventos de precipitación extraordinaria en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021

Dagne Boudet Rouco
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México

Violeta Rangel Velarde
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México

Manuel E. Mendoza
Instituto de Geofísica, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México; Centre for Natural Hazard Research (CNHR), Department of Earth Science Simon Fraser University, Canada

Angel Alberto Alfonso
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Michoacán, México; Subdelegación de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en Matanzas, Cuba

José Villanueva Díaz
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Bárbaro Moya
Investigador independiente, Yakima, Washington, Estados Unidos

Palabras Clave: zonas de montaña, grandes precipitaciones, serie de datos.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

El estudio de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos es relevante debido a sus impactos socioeconómicos y contribuye a optimizar los Sistemas de Alerta Temprana y, así, reducir sus impactos negativos (Colorado-Ruiz & Cavazos, 2021). El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 13, Acción por el Clima de la Organización de Naciones Unidas (ONU), tiene como finalidad fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los peligros relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países. Siguiendo estas líneas de trabajo, es necesaria la integración del conocimiento disponible para crear bases robustas que permitan a las autoridades correspondientes tomar decisiones con fundamento en elementos científicos para mitigar los efectos de eventos peligrosos como pueden llegar a ser

eventos de precipitación extraordinaria (EPE) que pueden traer consigo avenidas y procesos de remoción en masa en zonas de montañas, como la del área de estudio (León-Cruz *et al*., 2022).

La distribución geográfica de la precipitación en la República Mexicana está estrechamente ligada con su orografía, así como con las características de la circulación atmosférica regionales y locales. Las montañas actúan como barreras naturales, que impiden la penetración de la humedad arrastrada por los vientos de las capas bajas de la atmósfera al interior del país; al mismo tiempo, en estas se incrementa la cantidad de lluvia en sus vertientes expuestas a vientos húmedos, así como en sus partes más elevadas del interior, por ascenso y enfriamiento adiabático del aire (García, 2017).

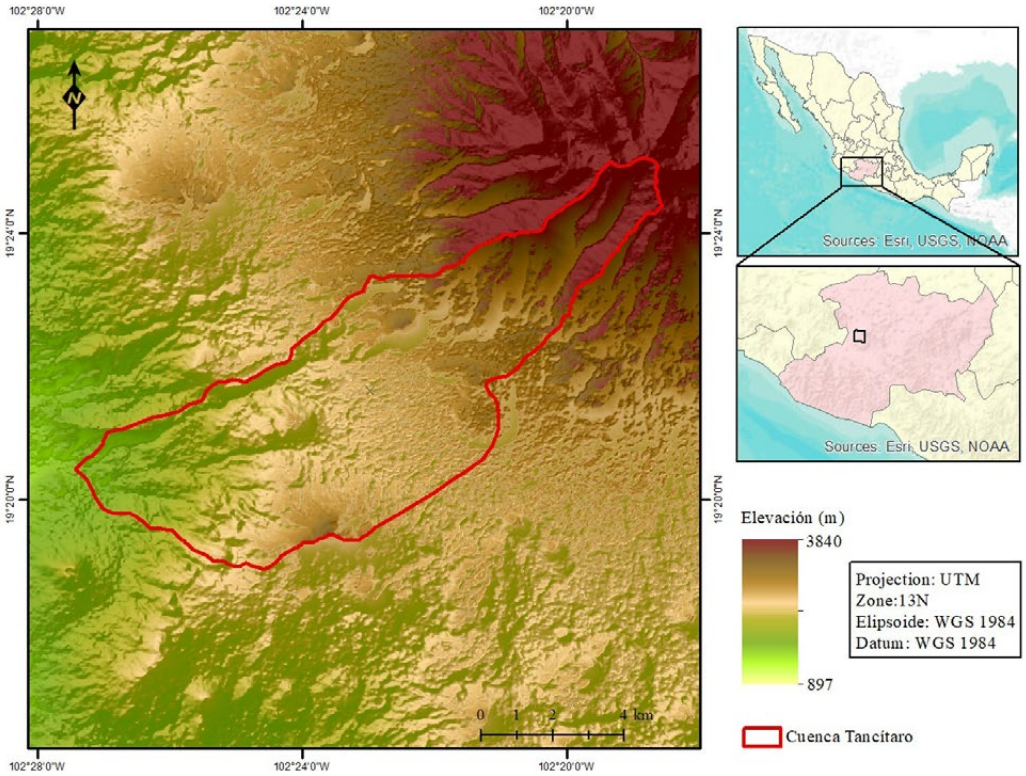
De acuerdo con Wallén & Wallen (1955) y García-Amaro (2004), los factores de circulación atmosférica responsables del comportamiento de las precipitaciones en México son: 1) las fluctuaciones estacionales en la posición de la zona de convergencia intertropical; 2) la ubicación, extensión e intensidad de las celdas de alta presión subtropical en el Atlántico y el Pacífico, dirigiendo la influencia de los vientos alisios sobre el territorio mexicano; 3) las perturbaciones en los vientos del este de verano sobre México, en relación con una posición norte de la zona de convergencia; 4) la influencia de ciclones originados a partir de las "ondas del este" (easterly waves), que generan gran parte de la precipitación de verano y de principios del otoño; 5) la influencia de las depresiones ciclónicas asociadas con los vientos del oeste de latitudes medias, que atraviesan la parte norte del país en invierno; 6) la presencia de "nortes", que son vientos producidos por las masas de aire frío que se desplaza en invierno desde Canadá y Estados Unidos hacia el sur; y 7) la orografía, ya que el paso sobre ciertas localidades de las configuraciones del flujo aéreo en escala sinóptica, tales como frentes, vaguadas y ondas tropicales, son causa o influyen parcialmente en la distribución de la precipitación observada en sus cercanías.

De acuerdo con Seneviratne *et al*. (2012), un clima cambiante conduce a variaciones en la frecuencia, intensidad, extensión, duración y momento de afectación de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos; estos pueden ocurrir sin tener precedente histórico. Las características físicas del terreno, del clima y los forzamientos sinópticos y de mesoescala particulares de cada región son algunos de los elementos comúnmente utilizados para explicar la variabilidad de eventos extremos; por lo que el conocimiento de las características de los EPE en una región particular es de vital importancia para la gestión integral de riesgos y la prevención de desastres asociados a lluvias intensas (Jayadas & Ambujam, 2023; León-Cruz *et al*., 2022; Luppichini *et al*., 2023).

La importancia de este trabajo radica en que el área de estudio es un caso de estudio de una cuenca montañosa, que no posee registros de estaciones meteorológicas y donde ocurren eventos peligrosos asociados a EPE. Este tipo de trabajos son muy limitados, a nivel local en México, y pueden constituir un antecedente del estudio de los EPE a nivel local en zonas montañosas. Esta cuenca se encuentra dentro el Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro, y representa una riqueza hidrológica para la región, así como un elemento fundamental en su desarrollo económico (Cerano-Paredes *et al*., 2013). Este trabajo tiene como objetivo identificar, caracterizar y determinar las causas de EPE en la cuenca Tancítaro.

Área de estudio

El área de estudio es la cuenca Tancítaro, definida como tal por Fuentes-Junco (2004) con 66.4 km^2. Está ubicada en el suroeste del Área del Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro, localizada entre 19°18'56.89"N, 102°27'25.26"W y 19°25'08.04"N, 102°18'33.07"W el centro-oeste del estado de Michoacán. Su altura varía entre 1386 y 3810 msnm y se ubica aproximadamente a 150 km de la costa del océano Pacífico (Figura 1).



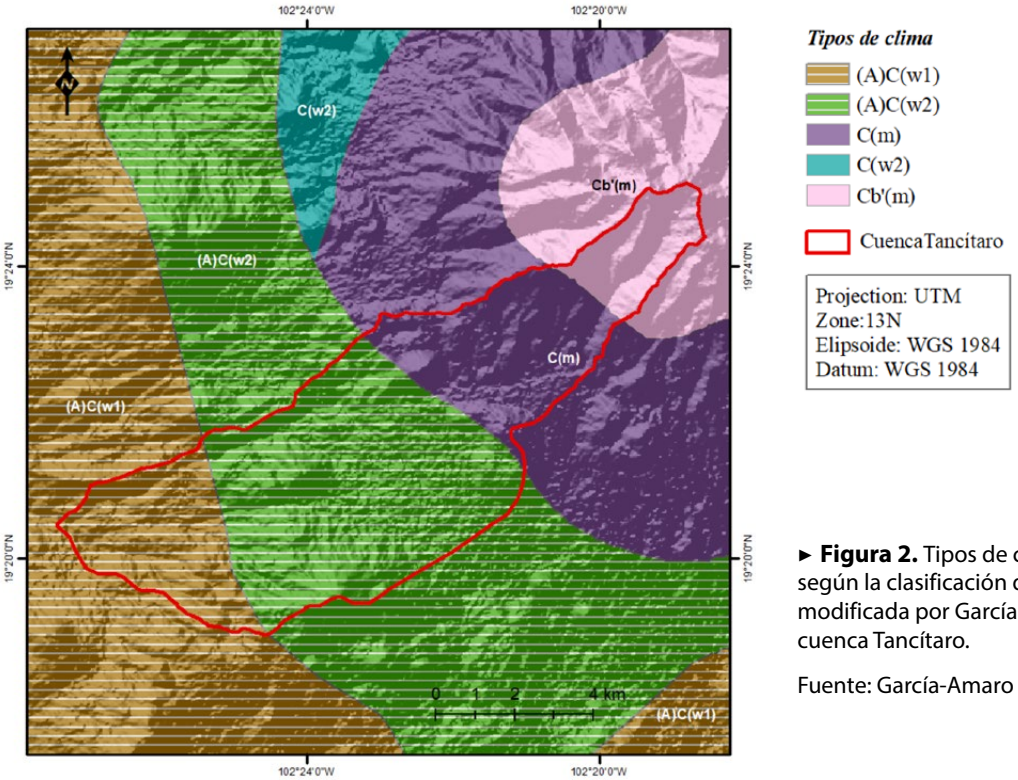
► **Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2019)

De acuerdo con el mapa de climas elaborado por García-Amaro (2004) y con base en la clasificación climática de Köppen modificada por García (1998), se observan 4 tipos de clima en la zona de estudio (Figura 2):

- Cb'(m) Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C; temperatura del mes más caliente inferior a 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 % del total anual.
- C(m) Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C a 18 °C y temperatura del mes más caliente inferior a 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.
- (A)C(w2) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor a18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal entre 5 % a 10.2 % del total anual.
- (A)C(w1) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor a 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor a 22 °C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal entre 5 % a 10.2 % del total anual.

La mayor diferenciación entre los climas identificados responde al comportamiento de la temperatura en función de los pisos altitudinales. Sin embargo, en cuanto a la precipitación en la cuenca, se distinguen condiciones húmedas en la

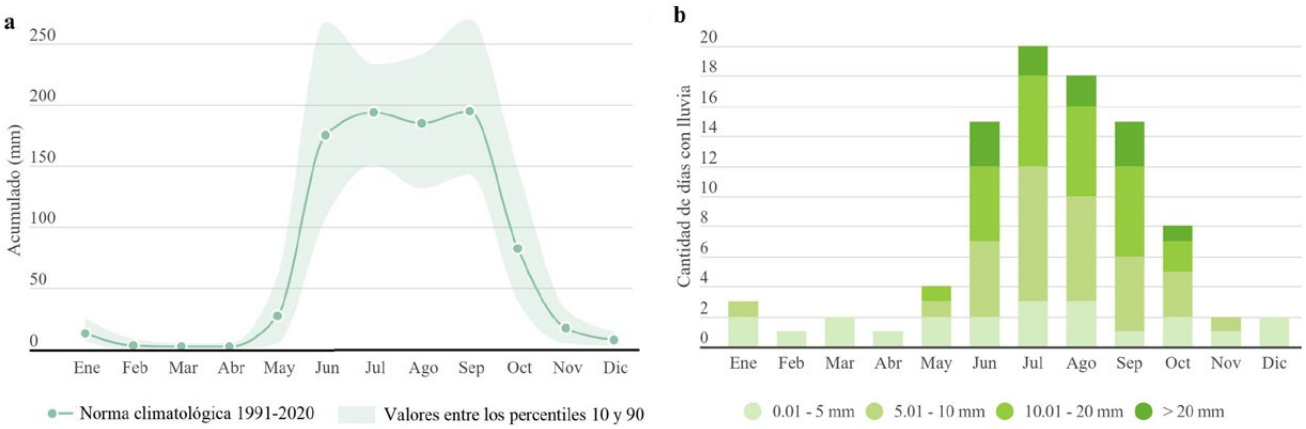


► **Figura 2.** Tipos de clima según la clasificación de Koppën modificada por García (1998) en la cuenca Tancítaro.

Fuente: García-Amaro (2004).

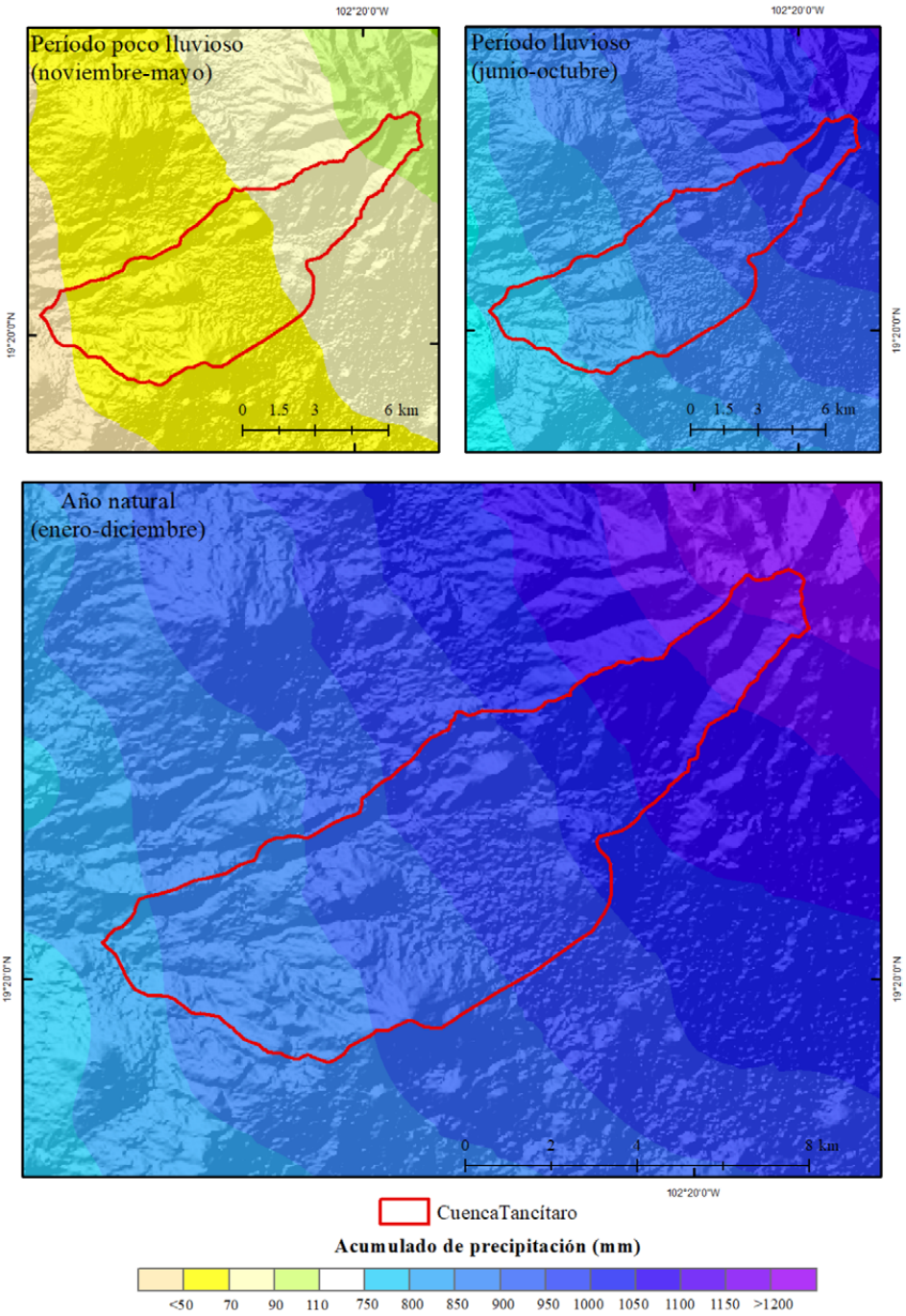
zona más alta y subhúmedas en la más baja. La precipitación anual promedio, de acuerdo con la norma climática del período 1991-2020, es de 903.3 mm. El periodo de lluvias se presenta entre junio y octubre, acumulando el 92.1 % de la precipitación; el periodo seco, entre noviembre y mayo acumula el 7.9 % restante.

La Figura 3a muestra el comportamiento medio mensual de los acumulados de precipitación y la variación que pueden tener los mismos, entre el percentil 10 (años más secos) y el percentil 90 (años más húmedos). Los mayores acumulados mensuales, se presentan en los meses de julio y septiembre. La mayor cantidad de días con lluvia ocurre en los meses de julio y agosto, aunque en junio y septiembre se registra la mayor cantidad de días como promedio con acumulados superiores a 20 mm en 24 horas (Figura 3b).



► **Figura 3.** a) Acumulado medio mensual b) cantidad de días con lluvia en la cuenca Tancítaro. Norma climatológica 1991-2020.
Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

En cuanto a la distribución espacial de la lluvia, la mayor cantidad de precipitación se registra al noreste del área de estudio, tanto en el periodo lluvioso como en el seco, siguiendo la configuración de la parte más alta del macizo (Figura 4).



► **Figura 4.** Distribución espacial de la precipitación en la cuenca Tancítaro. Norma climatológica 1991-2020.

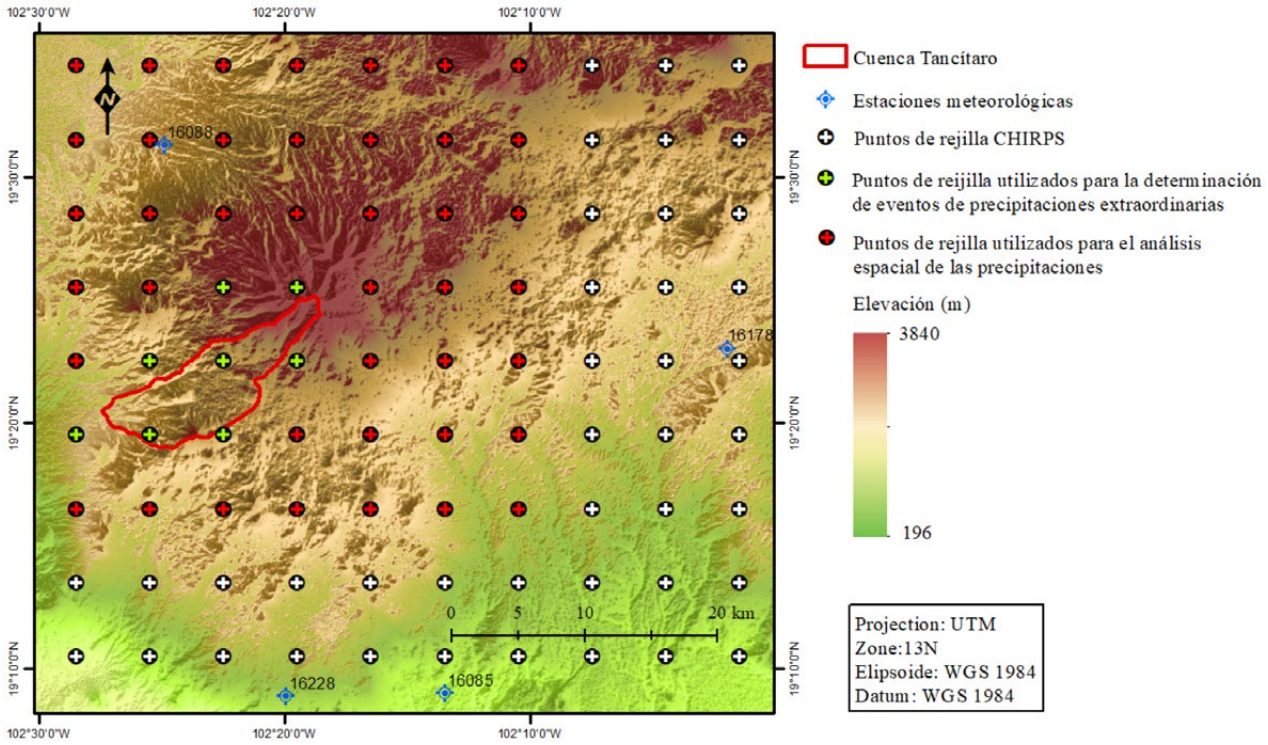
Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

Materiales y métodos

La definición de un evento extremo de precipitación es subjetiva, ya que los umbrales que lo definen en determinada región pueden no serlo para otra, dado que sus peculiaridades climáticas pueden ser distintas, por lo que los umbrales que se consideren deben establecerse para cada sitio, en función de sus características climáticas. Algunos autores han utilizado el umbral del percentil 90 y 95 para definir, por encima de

ese valor, los extremos de precipitación positiva (Anderson *et al.*, 2010; Luong *et al.*, 2017). Otros autores, definen el umbral antes mencionado como días muy húmedos, y se refieren a días con extremos de precipitación, que se ubican en el umbral del percentil 99 (Costa *et al.*, 2020; Karl *et al.*, 1999; León-Cruz *et al.*, 2022). Este último es el criterio que se ha utilizado en esta investigación, ya que permite identificar los eventos más severos. Con ese criterio, se identificaron los eventos de 24h, 2 (48h), 3 (72h), 4 (96h) y 5 (120h) días consecutivos con acumulados igual o mayor al percentil 99, en sus respectivos periodos de tiempo.

Al igual que gran parte de las regiones montañosas en el mundo, no existen estaciones meteorológicas dentro del área de estudio. Por esta razón, se utilizaron los datos diarios de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional Mexicano, cercanas al sitio de estudio (Tabla 1), y la base de datos diaria "The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations" (CHIRPS), elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la Universidad de California, Santa Barbara (UCSB), con una resolución espacial de 0.05°, que estima la precipitación a partir de imágenes del satélite TRMM 3B42 (Funk *et al.*, 2014) (Figura 5).



► **Figura 5.** Distribución espacial de los puntos de rejilla y las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS.

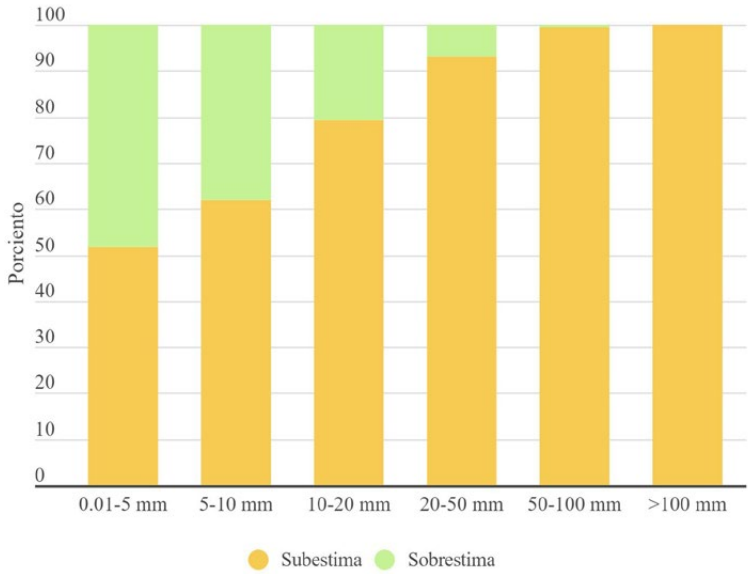
Las estimaciones mensuales de lluvia, derivadas del producto CHIRPS, son útiles para afrontar el problema de las observaciones derivadas de estaciones pluviométricas mal distribuidas, es importante conocer a priori la precisión de los datos estimados (Paredes-Trejo *et al.*, 2016). La correlación entre los datos medidos y los estimados por CHIRPS es significativa en la escala mensual; sin embargo, en la escala diaria la correlación es más baja (Tabla 1). Esto se debe a que la lluvia es el resultado de una serie de procesos atmosféricos complejos, sobre los que influyen numerosos factores y es considerada un proceso caótico (Rebolé *et al.*, 2009).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)	Periodo de medición	Porciento de datos faltantes a partir de 1981	Correlación con el punto de rejilla más cercano	
						Datos diarios	Datos mensuales
16228-Acahuato	19.15N	102.32W	227	1981-actualidad	7.6 %	0.42	0.90
16085-Paracuaro	19.15N	102.22W	597	1969-actualidad	68.4 %	0.49	0.87
16178-E.N.G.F. Uruapan	19.42N	102.07W	2193	1969-2012	23.3 %	0.40	0.94
16088-Periban	19.50N	102.40W	1640	1969-1998	9.5 %	0.41	0.92

Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas CONAGUA y la Base de datos CHIRPS.

Las estimaciones satelitales de lluvia tienen errores aleatorios y sesgos debido a la relación indirecta entre las observaciones y la estimación, junto con un muestreo inadecuado e imperfecciones en los algoritmos para la estimación (Toté *et al.*, 2015). Los datos de la rejilla CHIRPS, en promedio, muestran una sobreestimación de la ocurrencia de eventos de lluvia de un 10.8 % y los subestiman en un 9.2 %. Existe una subestimación de los valores diarios, principalmente de los valores superiores a 50 mm (Figura 6) y se logran mejores resultados durante la estación de lluvias. Este resultado ha sido similar al reportado por otros autores que han utilizado los datos de CHIRPS en diferentes regiones del mundo (Paredes-Trejo *et al.*, 2016; Peña-Aurquia, 2020; Toté *et al.*, 2015). En México, esta base de datos ha sido utilizada por diversos autores en investigaciones recientes sobre el comportamiento de la lluvia en el país (Landero-Meza, 2020; Peña-Aurquia, 2020; Perdigón-Morales *et al.*, 2018).



► **Figura 6.** Estimación de las cantidades de precipitación de los datos de CHIRPS con respecto a las estaciones meteorológicas con datos medidos.

Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas CONAGUA y la base de datos CHIRPS.

A pesar de todos los vacíos en los datos de las estaciones meteorológicas, la lejanía de estas al área de estudio y el relieve complejo de esta cuenca, que implica un alto grado de incertidumbre en cuanto a su representatividad, se tuvieron en cuenta para comprobar la ocurrencia de los EPE, aunque no fueron determinantes. Esta información se complementó con las imágenes de satélites meteorológicos, lo que permite, a nivel regional, analizar qué fenómeno meteorológico afectó la zona de estudio y cuál fue la causa de tales eventos.

El análisis de distribución de Pareto permitió, a partir de un umbral determinado en los datos de precipitación, obtener la distribución de los eventos que se encuentran por encima de este con baja probabilidad de ocurrencia y, por tanto, con largos

periodos de retorno. En el caso de la precipitación diaria, es la cola derecha de la distribución de probabilidad correspondiente, que permite este tipo de análisis (Morata-Gasca & Almarza-Mata, 2002).

Los criterios de definición de los EPE fueron:

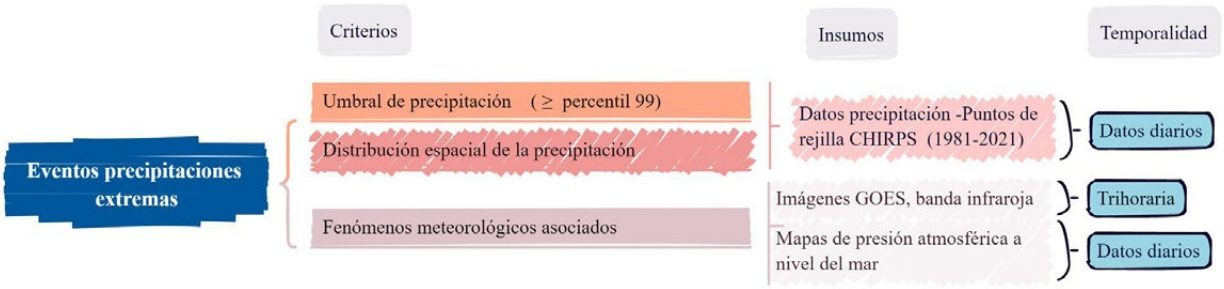
Se determinó el umbral de eventos cuyos acumulados de precipitación, en 24h, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos con lluvia, fueran igual o estuvieran por encima del percentil 99 en los valores de los puntos de la rejilla de CHIRPS, dentro del área de estudio.

Se verificó que los valores por encima de dicho umbral tuvieran una distribución en todos los puntos de la cuenca, en especial en los de la cabecera donde se registran los máximos valores históricos.

Una vez determinados los eventos de manera preliminar, se verificó la presencia de un fenómeno meteorológico que justificara los acumulados significativos en 24 horas, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos, mediante las imágenes de satélite en la banda infrarroja del satélite Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) en diferentes generaciones (GOES 5, 6, 7, 8, 12, 13 y 16) en el Global ISCCP B1 Browse System (GIBBS, por sus siglas en inglés) (Knapp, 2008). Estas tienen una frecuencia trihoraria, una extensión temporal que cubre desde el año 1966 hasta la actualidad y se encuentran disponibles en https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/year.

Se complementó esta información con análisis de los mapas de presión diaria a nivel del mar, disponibles en https://psl.noaa.gov/data/composites/day/, los cuales, al igual que los mapas mensuales históricos de presión atmosférica a nivel del mar, se obtuvieron del sitio del Laboratorio de Ciencias Físicas (PHL, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) en la versión 3 del 20th Century Reanalysis, disponibles en https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/plot20thc.v2.pl.

La tendencia se calculó mediante la prueba estadística de Mann-Kendall en el programa R (R CoreTeam, 2023), la cual es una prueba no paramétrica y evalúa si un conjunto de datos de tiempo ordenado, exhibe una tendencia creciente o decreciente, dentro de un nivel predeterminado de significación estadística, en este caso, se utiliza un valor-p (α) igual o menor de 0.05 (Hirsch *et al.*, 1993; Mendoza *et al.*, 2006).

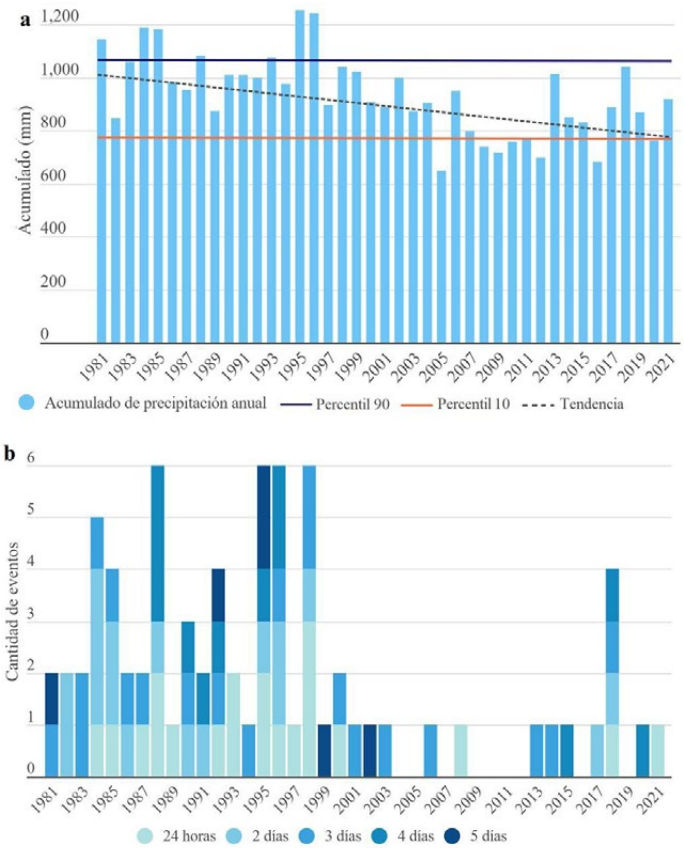


► **Figura 7.** Criterios de definición de los EPE.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

En el área de estudio existe una tendencia a la disminución de los acumulados de precipitación anuales en el periodo 1981-2020 (Figura 8a y Tabla 2), lo que se refleja de igual manera en la reducción de la cantidad de EPE (Figura 8b y Tabla 2). En la mayoría de los casos en los años más húmedos del periodo (por encima del percentil 90) se registró la mayor cantidad de EPE, tal es el caso de los años 1984, 1985, 1988, 1993, 1996 y 1997. De igual manera, los años más secos, generalmente, coincidieron con años en los que no se registró ningún EPE, como fueron 2005, 2008, 2009-2012 y 2016 (Figuras 8a y b).



► **Figura 8.**
a) Acumulados de precipitación anual
b) Cantidad de EPE según su duración en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Tendencia de la ocurrencia de eventos de precipitación extraordinaria y de la precipitación anual, según el estadígrafo de Mann-Kendall en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021.

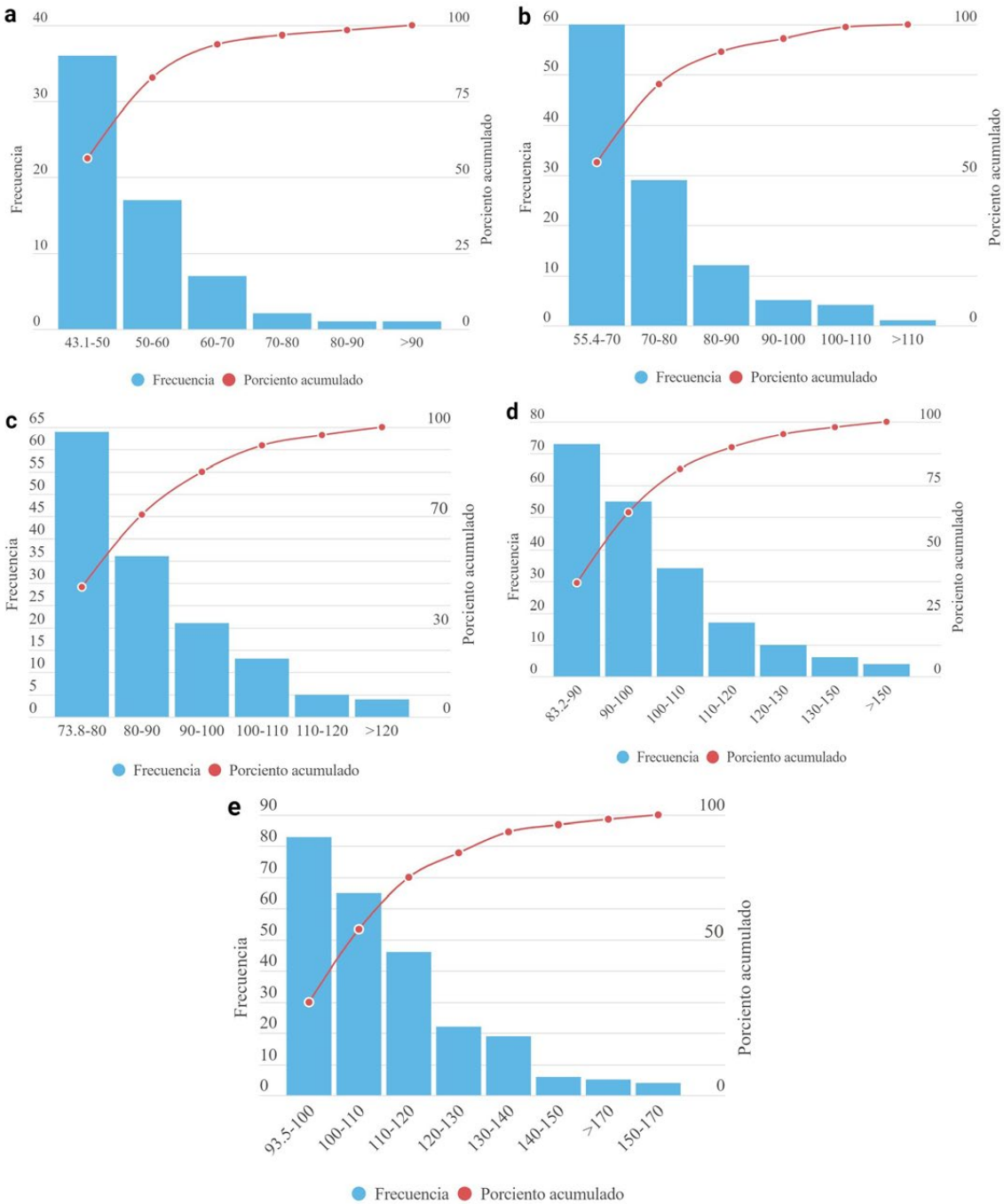
Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas CONAGUA y la Base de datos CHIRPS.

Variable	z	p-value
Cantidad de eventos totales	-1.4121	0.15790
Cantidad de eventos en 24h	-1.6955	0.08999
Cantidad de eventos en 2 días consecutivos	**-2.6263**	**0.00863**
Cantidad de eventos en 3 días consecutivos	**-2.3886**	**0.01691**
Cantidad de eventos en 4 días consecutivos	-0.2192	0.82650
Cantidad de eventos en 5 días consecutivos	-1.4121	0.15790
Acumulados de precipitación anual	**-3.6953**	**0.00022**

De acuerdo con la distribución de Pareto, cuyo umbral se tomó en el percetil 99 de los días con precipitación, los rangos de valores más frecuentes de EPE en 24h se encuentran entre 43.1 y 60.0 mm; en 2 días, entre 55.4 y 80.0 mm; en 3 días, entre 73.8 y 100.0 mm; en 4 días, entre 83.2 y 110.0 mm; y en 5 días, entre 93.5 y 120.0 mm (Figura 9). El valor máximo estimado en 24h fue de 102.1 mm, en 2 días consecutivos de 130.0 mm, en 3 días de 162.5 mm, en 4 días de 178.7 mm y en 5 días de 239.2 mm.

Los meses en los que se registra una mayor cantidad de EPE son junio y septiembre, mientras que las precipitaciones son menos frecuentes en mayo y noviembre. En el resto de los meses del periodo seco, no se regitró ningún evento en el rango de años analizados, lo que no limita que no hayan ocurrido en fechas anteriores al periodo estudiado (Figura 10a y 11a). Las causas más probables de EPE son canales de baja presión en la costa del Pacífico (53 %), el segundo lugar lo ocupan las ondas tropicales (22.7 % del total), fundamentalmente en los meses de junio y septiembre (Figura 10a y b).

Los huracanes ocuparon el tercer lugar en importancia (13.3 %), seguidos por depresiones y tormentas tropicales (4% cada uno), las cuales constituyen, en muchos casos, el estadio temprano de los huracanes. Aunque estos fenómenos tropicales se



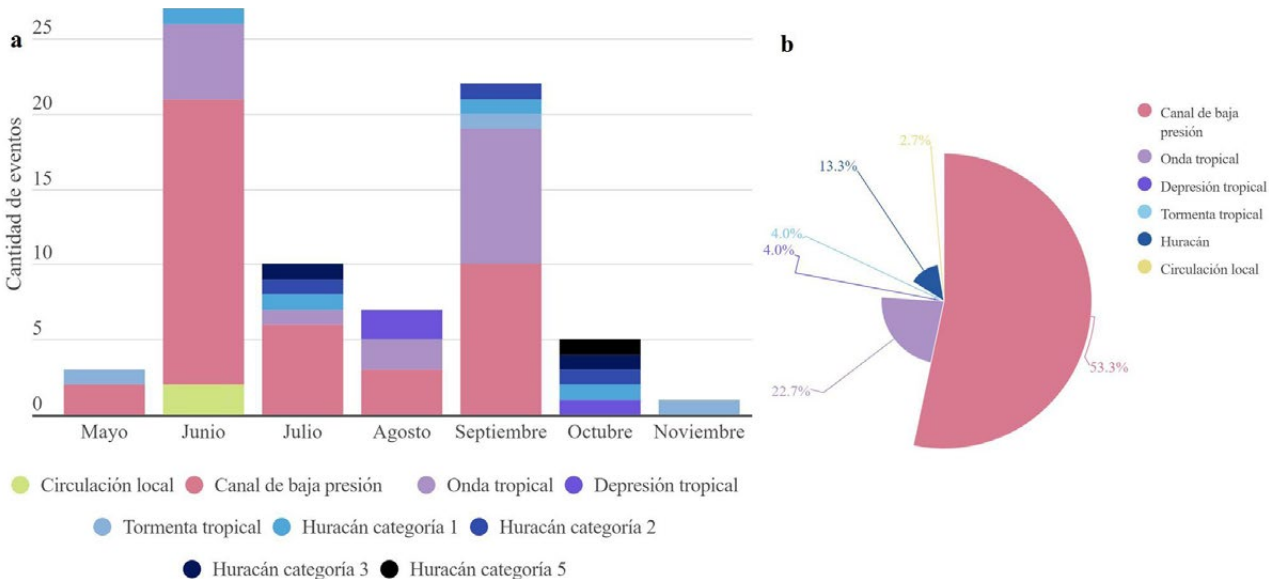
► **Figura 9.** Distribución de Pareto de eventos de precipitación extraordinaria de a) acumulados en 24h, b) acumulados en 2 días consecutivos, c) acumulados en 3 días consecutivos, d) acumulados en 4 dias consecutivos y e) acumulados en 5 días consecutivos en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021.

Fuente: Elaboración propia.

pueden presentar en cualquier mes de la temporada ciclónica, es decir, entre mayo y noviembre, aunque octubre es el mes en que se presentan con mayor frecuencia y que provocan EPE (Figura 10a).

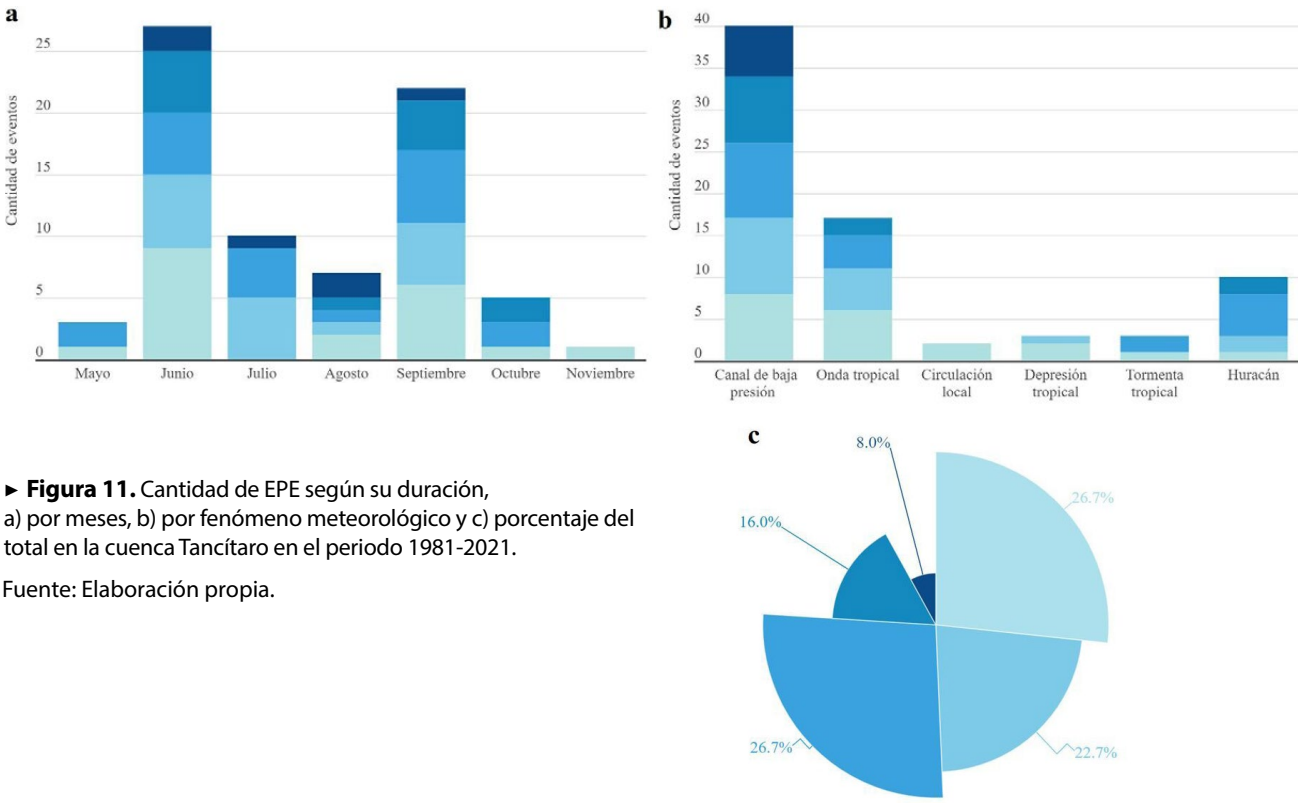
Entre junio y septiembre se encontraron EPE en todos los intervalos analizados; en el mes de mayo sólo se encontró en un periodo acumulado significativo de 24h y 3 días consecutivos; en octubre sólo en los intervalos de 24h, 3 y 4 días y en no-

viembre solo de 24h (Figura 10a). En todas las duraciones analizadas de los EPE, la mayor cantidad se asoció a canales de baja presión y ondas tropicales. En el periodo analizado predominó la precipitación acumulada en 24h y 3 días consecutivos (26.7 %), seguido de la precipitación acumulada consecutiva con EPE de 2 (22.7 %), 4 (16 %) y 5 (8%) días (Figura 11c).



► **Figura 10.** Cantidad de EPE según sus causas a) por meses, b) probabilidad de ocurrencia total en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021.

Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 11.** Cantidad de EPE según su duración,
a) por meses, b) por fenómeno meteorológico y c) porcentaje del total en la cuenca Tancítaro en el periodo 1981-2021.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

En la cuenca Tancítaro, para los últimos 41 años, se observa una tendencia a la disminución de la precipitación anual, lo que se refleja en el comportamiento de los EPE, tanto en la reducción de su duración, como en su número (en concordancia con los resultados que se presentan en IPCC (2021)), aunque los cambios en sus valores extremos de precipitación no siguen necesariamente a los de precipitación promedio, e incluso pueden moverse en la dirección opuesta.

La distribución geográfica de la precipitación en México está estrechamente relacionada con la orografía del país, así como con los rasgos más prominentes de fenómenos de circulación atmosférica.

De esta forma, las montañas tienen una influencia significativa en el aumento de la cantidad de lluvia en sus vertientes expuestas a vientos húmedos, así como en sus partes más elevadas del interior, originado por ascenso y enfriamiento adiabático del aire (García, 2017; Jáuregui-Ostos, 2012). Dentro de este contexto, el área de estudio, en particular, presenta una orografía compleja que propicia particularidades en la distribución espacial de los EPE. Las particularidades no se reflejan en las estaciones meteorológicas más cercanas, ya que estas se encuentran en altitudes mucho menores y en laderas opuestas a la zona de estudio, lo que hace imprescindible el uso de los datos de CHIRPS para la identificación de los EPE.

La causa fundamental que origina EPE en la zona de estudio son los canales de baja presión, fenómeno que fue descrito por Mosiño (1959), quien señala la existencia de una "lengua" de aire húmedo que se presenta comúnmente en verano sobre la costa del Pacífico y es alimentada por los vientos alisios cargados de humedad. Esto da origen a un canal de baja presión, que se extiende a lo largo de toda la costa pacífica de México, y este, sumado a las condiciones locales propiciadas por la orografía, conlleva a la ocurrencia de acumulados de precipitación significativos.

La segunda causa de origen de los EPE son las ondas tropicales u ondas del este, las cuales pueden ser precursoras de la formación de ciclones tropicales. Estas son un área alargada de relativa baja presión orientada de norte a sur, que se mueve de este a oeste a través de los trópicos, causando áreas de nubosidad y tormentas que se observan, por lo general, detrás del eje de la onda (Burpee, 1972). Las zonas mayormente afectadas por las ondas tropicales, tales como el centro de México, tienen contribuciones a la precipitación estacional de entre 30 y 60% (Landero-Meza, 2020).

La tercera causa de EPE identificada son los huracanes (categorías 1, 2, 3 y 5), seguidos por depresiones y tormentas tropicales, en las que muchas de sus trayectorias, en el océano Pacífico, corren paralelas a las costas o se internan en el continente (García, 2017). En la mayor parte de los casos de EPE originados por este fenómeno, no hubo una afectación directa del meteoro, sino que el origen de las precipitaciones fue la afectación por bandas espirales adjuntas.

Existen dos máximos en la ocurrencia de EPE, el primero en junio y el segundo en septiembre, que corresponden con el comportamiento de la temporada de lluvias de verano en el centro-sur de México, la mayor parte de América central y partes del Caribe, que se caracteriza por una distribución bimodal en la precipitación, con máximos en junio y septiembre y un mínimo relativo durante julio-agosto (Corrales-Suastegui *et al.*, 2020; Mosiño & García, 1966)

Es importante no solo analizar los eventos con acumulados significativos en 24h, sino también hasta 5 días consecutivos, ya que esto permite que se puedan relacionar con eventos extremos que afectan a la sociedad humana y al medio ambiente natural (Goddard & Gershunov, 2020). No todos los EPE en zonas montañosas conllevan la ocurrencia de eventos peligrosos como procesos de remoción en masa o inundaciones repentinas, ni todos los fenómenos meteorológicos antes mencionados conllevan la ocurrencia de un EPE. No obstante, es necesario el conocimiento de su climato-

logía y los fenómenos meteorológicos a los que están asociados, ya que son parte de la base de los sistemas de alerta temprana, para promover una gestión del riesgo adecuado con una base científica sólida.

Conclusiones

A pesar de que es más confiable trabajar con datos de estaciones meteorológicas, muchas veces las mismas no tienen la distribución espacial necesaria, ni son representativas de las zonas de estudio. Es por ello que la base de datos CHIRPS, constituye una opción viable para el estudio de las características de los EPE, en zonas desprovistas de información instrumental, y además cuenta con una resolución espacial y temporal adecuada para trabajar variables climáticas a nivel local.

Los fenómenos meteorológicos causantes de un EPE en la zona de estudio son los canales de baja presión a lo largo de la costa pacífica y las ondas tropicales. En los últimos 41 años, se han presentado en los meses del periodo lluvioso mayormente, aunque se registraron 3 en mayo y 1 en noviembre.

Dado que los umbrales de definición de un EPE varían de una región a otra, es imprescindible establecer umbrales propios para cada región de estudio, que permitan identificar los valores de EPE, ya que frecuentemente disparan eventos peligrosos, como deslizamientos e inundaciones, contribuyendo al manejo de peligro y a la gestión de riesgos asociados a eventos meteorológicos extremos.

Este trabajo contribuye con información para mejorar los sistemas de alerta temprana y la planificación ante desastres provocados por eventos hidrometeorológicos extremos. Esto facilita el fortalecimiento de la resilencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales (Objetivo 13.1 ODS), eleva la capacidad de adaptación de poblaciones en situaciones vulnerables, así como reduce su exposición (Objetivo 1.5 ODS) y fortalece la capacidad de enfrentamiento ante el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos en el desarrollo de la actividad agrícola de la zona (Objetivo 2.4 ODS).

Es importante validar la ocurrencia de EPE con otras fuentes de datos, como imágenes satelitales de alta resolución, archivos históricos y estudios paleoclimáticos. Así mismo, tener un conocimiento detallado del uso del suelo para definir alguna asociación con la presencia de incendios, aprovechamiento forestal, sobrepastoreo u otro uso del suelo.

Agradecimientos

Dagne Boudet Rouco y Violeta Rangel Velarde agradecen al SECIHTI por sus becas de doctorado. Los autores agradecen los proyectos UNAM PAPIIT “Dendrogeomorfología y evaluación de peligros en ambientes de montañas” y “Dendrogeomorfología: desarrollo e implementación de un esquema para cartografiar y evaluar peligros geomorfológicos en zonas montañosas intertropicales de México”; y Manuel E. Mendoza agradece a PASPA-UNAM por su beca sabática.

» Referencias bibliográficas

Anderson, B. T., Wang, J., Salvucci, G., Gopal, S., & Islam, S. (2010). Observed Trends in Summertime Precipitation over the Southwestern United States. *Journal of Climate*, 23(7), 1937–1944. https://doi.org/10.1175/2009JCLI3317.1

Burpee, R. W. (1972). The Origin and Structure of Easterly Waves in the Lower Troposphere of North Africa. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(1), 77–90. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0077:TOASOE>2.0.CO;2

Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Caciano, L., Trucios-Caciano, R., & Guerra de la Cruz, V. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83. https://doi.org/10.14350/rig.35190

Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5406–5430. https://doi.org/10.1002/joc.7225

Corrales-Suastegui, A., Fuentes-Franco, R., & Pavia, E. G. (2020). The mid-summer drought over Mexico and Central America in the 21st century. International Journal of Climatology, 40(3), 1703–1715. https://doi.org/10.1002/joc.6296

Costa, R. L., Macedo de Mello Baptista, G., Gomes, H. B., Daniel dos Santos Silva, F., Lins da Rocha Júnior, R., de Araújo Salvador, M., & Herdies, D. L. (2020). Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100254. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254

Fuentes-Junco, J. J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del parque nacional pico de Tancítaro.*

Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., Verdin, A. P., & Survey, U. S. G. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. In Data Series. https://doi.org/10.3133/ds832

García, E. (1998). Clasificación de Köppen, modificado por García, E. CONABIO (Comisión Nacional para el Conicimiento y Uso de la Biodiversidad). In CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.

García, E. (2017). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 1. https://doi.org/10.14350/rig.59179

García-Amaro, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen* (E. García-Amaro Ed.; (5 ed.)). Instituto de Geografía-UNAM.

García-Ruiz JM, JI López-Moreno, SM Vicente-Serrano, T Lasanta-Martínez, S Beguería. 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105: 121-139. DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.01.006

Goddard, L., & Gershunov, A. (2020). Impact of El Niño on Weather and Climate Extremes (pp. 361–375). https://doi.org/10.1002/9781119548164.ch16

Hirsch, R. M., Helsel, D. R., Cohn, T. A., & Gilroy, E. J. (1993). Statistical Analysis of Hydrologic Data. In M.-H. B. Handbook of hydrology (Ed.), D. R. Maidment, (pp. 17–55). Handbook of Hydrology.

INEGI. (2019). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E13B38-Tancítaro, E13B39-Uruapan, E13B48-Apatzingán, E13B49-Nueva Italia. Serie III. Escala 1:50,000. https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Jáuregui-Ostos, E. (2012). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas*, 50. https://doi.org/10.14350/rig.30435

Jayadas, A., & Ambujam, N. K. (2023). A quantitative assessment of vulnerability of farming communities to extreme precipitation events in Lower Vellar River sub-basin, India. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 13541–13563. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02645-4

Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In Weather and Climate Extremes (pp. 3–7). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2

Knapp, K. R. (2008). Scientific data stewardship of international satellite cloud climatology project B1 global geostationary observations. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1), 023548. https://doi.org/10.1117/1.3043461

Landero-Meza, H. A. (2020). *Impacto de las Ondas Tropicales del Este en México* [Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnología, A.C.]. https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/5469

León-Cruz, J. F., Díaz-Peón, A. L., & Rodríguez-García, H. I. (2022). Eventos extremos de precipitación en Colima, México (1981-2018). *Investigaciones Geográficas*, 107. https://doi.org/10.14350/rig.60516

Li, Z., F. L. Zheng, & W. Z. Liu. (2007). Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 154-155: 147-155. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.019.

Luong, T. M., Castro, C. L., Chang, H.-I., Lahmers, T., Adams, D. K., & Ochoa-Moya, C. A. (2017). The More Extreme Nature of North American Monsoon Precipitation in the Southwestern United States as Revealed by a Historical Climatology of Simulated Severe Weather Events. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(9), 2509–2529. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0358.1

Luppichini, M., Bini, M., Giannecchini, R., & Zanchetta, G. (2023). High-resolution spatial analysis of temperature influence on the rainfall regime and extreme precipitation events in north-central Italy. *Science of The Total Environment*, 880, 163368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163368

Mendoza, M. E., Bocco, G., Bravo, M., Granados, E. L., & Osterkamp, W. R. (2006). Predicting Water-Surface Fluctuation of Continental Lakes: A RS and GIS Based Approach in Central Mexico. *Water Resources Management*, 20(2), 291–311. https://doi.org/10.1007/s11269-006-8199-z

Morata-Gasca, A., & Almarza-Mata, C. (2002). Ajuste de la distribución de probabilidad de máxima precipitación diaria en santa cruz de Tenerife a la distribución generalizada de Pareto. In J. A. Guijarro-Pastor (Ed.), Publicaciones de la Sociedad Española de Climatología (El agua y el clima, pp. 263–270). Ponencia presentada en: III Congreso de la Asociación Española de Climatología "El agua y el clima", celebrado en Palma de Mallorca del 16 al 19 de junio de 2002.

Mosiño, A. P. (1959). La precipitación y las configuraciones del flujo aéreo en la República Mexicana. *Revista de Ingeniería Hidraulica*.

Mosiño, A. P., & García, E. (1966). Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. Conferencia Regional Latinoamericana Unión Geografía Internacional.

Paredes-Trejo, F. J., Álvarez-Barbosa, H., Peñaloza-Murillo, M. A., Moreno, M. A., & Farias, A. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera*. https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04

Peña-Aurquia, O. (2020). *Eventos extremos de precipitación en el noroeste de México* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://lareferencia.info/vufind/Record/MX_82c96b68ab78bb20b732a9faad3ee520

Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P. O., & Barrett, B. S. (2018). The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2174–2186. https://doi.org/10.1002/joc.5322

R CoreTeam. (2023). A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Https://Www.r-Project.Org/. https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing

Rebolé, J. P., López, J. J., & García, A. (2009). Caracterización estadística de las variables en el procesosecuencial de lluvia. *Ingeniería Del Agua*, 16(2). https://doi.org/10.4995/ia.2009.2950

Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., & Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In M. Rusticuci (Ed.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 109–230). Cambridge University Press.

Toté, C., Patricio, D., Boogaard, H., van der Wijngaart, R., Tarnavsky, E., & Funk, C. (2015). Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. *Remote Sensing*, 7(2), 1758–1776. https://doi.org/10.3390/rs70201758

Wallén, C. C., & Wallen, C. C. (1955). Some Characteristics of Precipitation in Mexico. *Geografiska Annaler*, 37(1/2), 51. https://doi.org/10.2307/520169

2.5 Identificación de eventos extremos de precipitación en Colima, México. Un análisis de la Protección Civil

Hugo Ignacio Rodríguez-García
Licenciatura en Protección Civil y Gestión de Riesgos, Colegio de Ciencias y Humanidades, Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM)

José Francisco León-Cruz
Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Antonio Luna Díaz-Peón
Facultad de Biología, Universidad Veracruzana (UV), México

Palabras Clave: Gestión integral de riesgos, identificación y monitoreo, Sistema de Alerta Temprana, Eventos Extremos de Precipitación.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

En México, año con año los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos son los que mayores daños y pérdidas arrojan. En el 2020, casi el 82.8% del valor de las afectaciones totales fueron generadas por desastres asociados a estos fenómenos. Además, de las 392 defunciones por desastres, 116 (el 33.1%) estuvieron asociadas a este tipo de desastres (CENAPRED, 2020). Para el mismo periodo de análisis, se emitieron 129 declaratorias por el impacto de fenómenos naturales en 19 entidades del país. El 82% de las declaratorias fueron por el impacto de fenómenos hidrometeorológicos en poblaciones en situación de vulnerabilidad (70 fueron de emergencia y 38 de desastre). Dentro de esa proporción, las lluvias fueron el fenómeno al que se le asoció más estragos con el 42.9%, después le siguieron las declaratorias por inundaciones generadas, en su mayoría, por el mismo fenómeno hidrometeorológico (CENAPRED, 2020).

En este contexto cobran una significativa importancia los eventos extremos de precipitación (EEP), al representar una amenaza para las poblaciones tanto por las propias características del fenómeno, como por las condiciones de vulnerabilidad de la población ante su ocurrencia.

Si bien no existe un consenso general para definir un EEP (Gutiérrez-Lozano *et al.*, 2011; Pineda-Martínez *et al.*, 2020; Zuñiga-Tovar & Magaña-Rueda, 2018), la definición de los eventos representa, por sí misma, un paso crucial en el análisis y entendimiento de la amenaza natural, misma que puede evidenciar las condiciones de vulnerabilidad preexistentes e incrementar el riesgo de desastre asociado a lluvias intensas. Esta situación se enmarca en un contexto de cambio climático, donde se han evidenciado cambios en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, tales como la lluvia intensa (Kunkel, 2003; Oliveira *et al.*, 2017).

Debido a esto, los EEP son considerados como una de las amenazas meteorológicas más importantes por su capacidad para generar situaciones de riesgo (en relación con las condiciones de vulnerabilidad de las poblaciones) y desencadenar desastres; de tal suerte que existe una gran variedad de estudios sobre ellos. Por ejemplo, Kunkel (2003) analizó las variaciones temporales de los EEP's en los Estados Unidos (EE. UU.), a través de observaciones diarias de precipitación, determinando los cam-

bios en la frecuencia de dichos eventos que relacionó con el cambio climático. Por otro lado, Colorado-Ruiz & Cavazos (2021), empleando una gran variedad de datos en malla para analizar las tendencias en los índices de precipitación extrema en México y EE. UU., encontraron un patrón general en verano, donde las tendencias de la mayoría de los índices muestran un decremento en el lado noroeste (más seco) y un incremento hacia la porción este (más húmeda).

Se ha identificado también el rol significativo que juegan fenómenos como las ondas del este y ciclones tropicales en la generación de EEP's en México. En este sentido, Herrera *et al.* (2018) y Pérez-Morga *et al.* (2013) determinaron que la configuración geográfica del territorio nacional y la fuerte influencia del Golfo de México y el océano Pacífico son determinantes para el arrastre de humedad hacia la región continental y la generación de lluvia intensa en el país.

Para la región de estudio, y como parte complementaria al trabajo aquí presentado, León-Cruz *et al.* (2022) hicieron un análisis de la distribución espaciotemporal de los EEP en Colima para el periodo 1981-2018. Empleando datos de estaciones climatológicas y una metodología basada en picos sobre el umbral de los días húmedos, identificaron que la región norte del estado es más propensa a este tipo de eventos, mientras que en la porción sur son generalmente más intensos. Asimismo, haciendo uso de los datos de trayectorias de ciclones tropicales (CT), los autores documentaron cómo estos fenómenos impactan en la frecuencia estacional de los EEP.

Un primer esfuerzo hacia la caracterización del riesgo de desastre asociado a los EEP ha sido la identificación de sus patrones espaciotemporales y de sus variaciones interanuales (León-Cruz *et al.*, 2022). Otros estudios relacionados con la problemática de los riesgos asociados a los fenómenos hidrometeorológicos son los de Mendoza-Cano *et al.* (2019) y Mendoza-Cano *et al.* (2021), quienes se han enfocado en el análisis de la resiliencia y en el desarrollo de un sistema de monitoreo ante inundaciones en la ciudades de Colima y Villa de Álvarez en Colima.

Este estudio tiene el objetivo de analizar las acciones, estrategias y mecanismos empleados por la unidad estatal y las unidades municipales de Protección Civil, para identificar y monitorear la ocurrencia de EEP, así como conocer los daños asociados a su desarrollo, lo que permitirá comprender la configuración del riesgo de desastre en un contexto de insuficiencia de sistemas tecnológicos que permitan predecir, pronosticar y monitorear la ocurrencia de EPP.

Es importante indicar que los EEP sólo constituyen un componente del riesgo de desastre: la amenaza. Por lo tanto, para que exista riesgo asociado a la ocurrencia de EEP en Colima, es necesario que existan condiciones de vulnerabilidad. En este sentido, se parte de la consideración de que los riesgos y desastres son procesos socialmente construidos, donde el fenómeno natural se convierte en una amenaza, en tanto que haya poblaciones e infraestructura vulnerable ante determinadas características del fenómeno (Blaikie *et al.*, 1996; Hewitt, 2019; Maskrey, 1993; Wilches-Chaux, 1998). Estos dos componentes en interacción, la amenaza y la vulnerabilidad, son constitutivos del riesgo de desastre y son procesos porque las condiciones de vulnerabilidad se generan en determinados contextos espaciotemporales enmarcados en el desarrollo de las propias sociedades y en relación con las condiciones geográficas y ambientales particulares.

Al respecto, Macías (2018) refiere que el riesgo es la posibilidad o probabilidad de la materialización del desastre: del cambio negativo (cualitativo y cuantitativo) en la sociedad, mediado por la amenaza y en relación con las condiciones de vulnerabilidad (gradación del cambio), en el sentido de la susceptibilidad al daño. De esta manera, este estudio se aproxima a la identificación de los EEP desde la vulnerabilidad. Esto es desde la capacidad institucional de Protección Civil para realizar tales tareas, ya que en el estado de Colima (del 2000 al 2023) se emitieron 37 declaratorias, de las cuales

17 fueron por desastre: 9 fueron asociadas a ciclón tropical, 5 a lluvias y 3 a sismos. Asimismo, se emitieron 14 declaratorias de emergencia: 2 por actividad volcánica, 5 por ciclón tropical, 1 por inundación, 3 por lluvias, 1 por sismo y 2 por tormenta extrema; y se emitieron 6 declaratorias por contingencia climatológica: 4 por ciclón tropical, 1 por lluvias y 1 por sequía (CENAPRED, 2023).

Sistemas de Alerta Temprana

Desde la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (DIRDN), los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) han sido desarrollados y adoptados gracias a su capacidad para salvar vidas (Maskrey, 1997). Un SAT es un conjunto organizado de elementos (organizativos o tecnológicos) y actores (científicos, funcionarios, población, entre otros) que interactúan, desde diferentes niveles y funciones, con un propósito común: salvar la vida de las personas que están sujetas a una amenaza, lo que requiere anticipar su aparición y evolución (Macías, 2018).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) refiere que, con el propósito de proteger a la población y mitigar "los daños provocados por esos fenómenos" [sic], se crearon los SAT. Por lo tanto, desde esta perspectiva se entiende que los SAT son avisos que pueden salvar vidas, ya que proveen de información oportuna y permiten que las personas expuestas a una amenaza se preparen para una respuesta efectiva y reduzcan el riesgo. En México, la introducción de los SAT y sus avances se desarrolló desde la segunda mitad de los años 90 del siglo pasado (Macías, 2018).

El CENAPRED (2018) establece que son cuatro los componentes de los SAT: 1) Conocimiento previo de identificación de los riesgos asociados con fenómenos "perturbadores" para tomar medidas de preparación y autoprotección; 2) Sistema de medición y monitoreo del fenómeno "perturbador" para realizar pronósticos o emitir avisos con base científica (se utilizan redes de instrumentos y telecomunicaciones para adquisición de datos); 3) Difusión de alertas públicas con información clara y precisa que active la respuesta de la población (se requiere de protocolos preestablecidos y operados por las autoridades); y 4) Planes de respuesta o de contingencia para saber qué hacer ante el impacto de fenómenos perturbadores.

El componente 1) "Conocimiento previo" ha sido abordado con el estudio de León-Cruz *et al.* (2022), por lo que el presente texto se aproxima al componente 2) "Sistema de medición y monitoreo". El resto de los componentes también conllevan un nivel alto de complejidad y grandes retos de trabajo en el ámbito de lo social, político, económico y cultural para lograr con los objetivos establecidos en los SAT.

Ahora bien, para los fenómenos meteorológicos, existe el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) como un Sistema (no un SAT) que provee información al respecto. Inició en 1877, tiene una cobertura nacional y dentro de sus labores se encuentra la generación de pronósticos del tiempo (incluido el tiempo severo, donde se enmarcan los EEP's) y avisos sobre los posibles efectos de fenómenos atmosféricos (CENAPRED, 2018). Para los ciclones tropicales, existe el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones-Tropicales (SIAT-CT). Inició en el 2000, con cobertura nacional y puede avisar, con 72 horas de anticipación, sobre los efectos de los CT en el territorio nacional (CENAPRED, 2018).

Es interesante el hecho de que, además del SIAT-CT, para otro tipo de fenómenos meteorológicos no exista un SAT como tal, es decir, sólo existe el servicio de meteorología a nivel nacional, por lo que, hasta cierto punto, se estaría cumpliendo con los componentes 1 y 2 de los SAT, establecidos por el CENAPRED (2018).

Al respecto, León-Cruz *et al.* (2020) indican que contar con un sistema de advertencias ante eventos extremos es complejo, ya que el pronóstico y predicción inmediata requiere conocimientos y herramientas especiales, además de que la ocurrencia precisa

de estos eventos no puede anticiparse sin ambigüedades, a partir de un Modelo de Predicción Numérica del Tiempo, y porque su limitada extensión espacial evita su detección por la mayoría de las observaciones operativas. Por tanto, el reto conlleva dos elementos interrelacionados: el económico-político y el técnico-científico. Es decir, por un lado, se requieren la voluntad política y disposición económica para la adquisición de sistemas e instrumentos especiales, que también requieren un nivel de conocimiento para su adecuada operación; y, por otro, existen limitaciones técnicas y científicas que no han permitido un entendimiento completo de los fenómenos naturales.

En ese contexto, en México el proceso de emisión de avisos de tiempo severo (sin incluir el SIAT-CT) se encuentra en la fase de perspectiva (24-96 h), pronóstico (12 h) y predicción a corto plazo (3 h), emitiendo la información a través de boletines, informes o alertas. Con la fase de perspectiva se obtiene un pronóstico extendido; con la de pronóstico se obtiene un pronóstico general, una imagen interpretada, una perspectiva meteorológica y un mapa de áreas con potencial de tormentas; y en la fase de predicción a corto plazo se genera un aviso de potencial de tormentas (León-Cruz *et al*., 2020).

Además, los medios principales por los cuales se difunden los avisos de tiempo severo son tres: la página oficial del SMN, un sistema de fax automatizado (limitado a clientes clave), y por consulta directa por teléfono o correo electrónico (SMN, 2012); además de avisos por redes sociales. Domínguez-Sarmiento *et al*. (2018) indican que las instituciones que se encargan de informar a la población sobre la existencia de un fenómeno o amenaza meteorológica son el SMN y Protección Civil, a través de mensajes de texto, medios de comunicación con cobertura nacional y por medio de comunicación directa con la población que podría resultar afectada. En los últimos años, las redes sociales han tomado importancia para la emisión y recepción de alertas (León-Cruz *et al*., 2020). Aunque, como se verá más adelante, dicho servicio no es suficiente para la medición y monitoreo de los EEP, incluso para las autoridades de Protección Civil en el nivel local.

Marco legal para la gestión integral del riesgo asociado a EEP

Respecto a las funciones y obligaciones de las unidades municipales y la unidad estatal de protección civil ante este tipo de fenómenos y condiciones de riesgo, les corresponde gestionar integralmente los riesgos asociados. Es en ese sentido que la Ley de Protección Civil del Estado de Colima se establece que la gestión integral de riesgos considera como fases anticipadas a la ocurrencia de un "agente natural perturbador" el: 1) Conocimiento del origen y naturaleza de los riesgos, además de los procesos de construcción social de los mismos; 2) Identificación de peligros, vulnerabilidades y riesgos, así como sus escenarios; 3) Análisis y evaluación de los posibles efectos; 4) Revisión de controles para la mitigación del impacto; 5) Acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de riesgos; 6) Desarrollo de una mayor comprensión y concientización de los riesgos; y 7) Fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad (*Ley de Protección Civil Del Estado de Colima*, 2016).

Por lo que a la Unidad Estatal de Protección Civil (UEPC) le compete, entre otras funciones, procurar la instrumentación y operaciones de redes de detección, monitoreo, pronóstico y medición de riesgos en general, contando con la colaboración de las dependencias involucradas, para generar sistemas de alertamiento (*Ley de Protección Civil del Estado de Colima, 2016*).

Específicamente, el director general de la UEPC tiene las atribuciones de: Coordinar y dar seguimiento a las acciones de prevención, auxilio y recuperación que realicen los Sistemas Municipales de Protección Civil ante emergencias o desastres, manteniendo una comunicación constante con los mismos; promover la investigación con respecto a las causas y efectos de los agentes perturbadores, en los organismos dedicados a la investigación científica y tecnológica; así como el mantener comunicación

con todo tipo de organismos especializados que realicen acciones de monitoreo, para vigilar permanentemente el proceso de generación de desastres (*Ley de Protección Civil del Estado de Colima*, 2016).

Por su parte, a las Unidades Municipales de Protección Civil (UMPC), les corresponde coordinarse con la UEPC en el seguimiento y coordinación de las acciones de prevención, auxilio y recuperación que se realicen ante emergencias o desastres; elaborar, formular, implementar y mantener actualizado el *Atlas Municipal de Riesgos* y los programas especiales que se requieran, de acuerdo con los riesgos identificados en el municipio; sí como establecer un sistema de comunicación con el Centro Estatal de Comunicaciones, para monitorear, vigilar y alertar permanentemente de la posible ocurrencia de siniestros o desastres en el municipio, acatándose a los criterios establecidos por la UEPC (*Ley de Protección Civil del Estado de Colima*, 2016).

Metodología

Se aplicaron 11 entrevistas semiestructuradas: 10 a los directores de las Unidades Municipales de Protección Civil y una al director Estatal de Protección Civil, en el estado de Colima. Se entrevistó a la totalidad de directores de protección civil en el estado, entre los meses de abril y mayo de 2021. Los entrevistados estuvieron en el cargo de director durante, o al menos, una administración municipal de tres años (2018-2021).

Por cuestiones de salud pública, en el contexto de la pandemia por SARS-CoV-2, nueve entrevistas se realizaron de forma virtual, a través de la plataforma para videollamadas Zoom. Las tres se realizaron de manera presencial, guardando las medidas sanitarias estipuladas por las autoridades de la Secretaría de Salud en ese momento. En las 11 entrevistas se contó con la autorización verbal de parte de los directores, para que pudieran ser videograbadas y grabas digitalmente.

La guía de entrevistas constó de dos secciones: en la primera se recuperaron datos biográficos sobre la experiencia de los directores en el ámbito de la protección civil y la gestión de riesgos, y sobre el número de personas bajo su cargo para realizar las funciones y actividades de las unidades de Protección Civil. La segunda sección tuvo el objetivo de conocer las acciones y estrategias empleadas por los directores para gestionar los riesgos asociados a los EEP.

En cuanto al análisis y la sistematización de la información, de cada entrevista se obtuvieron grabaciones de audio de 55 minutos en promedio. Las grabaciones fueron transcritas en 184 cuartillas y codificadas en el Software MAXQDA versión 11, lo que posibilitó organizar la información en cinco secciones, las cuales constituyen el apartado de resultados y discusión: capacidad institucional, descripción de la amenaza, identificación de zonas vulnerables, afectaciones y daños asociados a EEP, identificación y monitoreo de EEP, más las conclusiones.

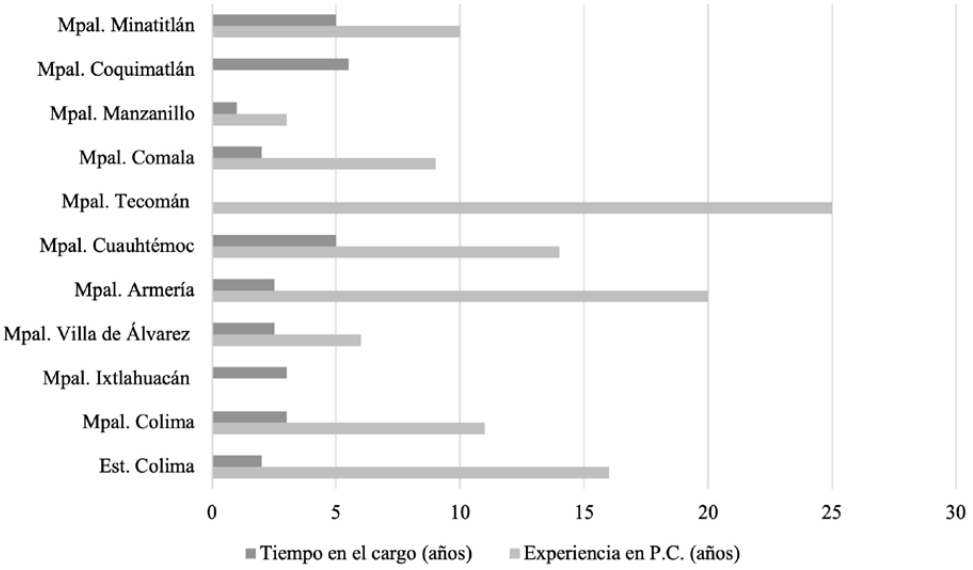
Resultados y discusión

Capacidad institucional

La capacidad institucional de las unidades de protección civil es entendida como la posibilidad que se tiene para evaluar, analizar, difundir y reaccionar ante la ocurrencia de eventos extremos de precipitación que puedan desencadenar desastres (CENAPRED, 2015). Es de interés particular conocer la capacidad institucional municipal y estatal, ya que, como señalan Montijo-Galindo & Ruiz-Luna (2018), la capacidad institucional a nivel regional o nacional puede enmascarar o atenuar deficiencias. Un elemento que se vuelve relevante tiene que ver con la experiencia que tienen los directivos en el área de Protección Civil. Una de las principales obser-

vaciones que se han realizado respecto a las trayectorias del personal y directivos de las unidades y coordinaciones municipales, estatales y nacionales de Protección Civil, es la continua rotación de personal que suele haber en cada cambio de gobierno. Que la Protección Civil en México esté a expensas de los vaivenes políticos imposibilita, en gran medida, la instauración y continuidad de políticas, estrategias y acciones a mediano y largo plazo en materia de reducción de riesgos.

En el caso que nos ocupa, coexiste la movilidad de los directivos con la permanencia por dos periodos o más en el cargo, como a continuación se muestra en la Figura 1. Sólo el director de Tecomán manifestó llevar un mes en el cargo, por la renuncia del anterior director. Se vuelve interesante el hecho de que, en la mayoría de los casos, existe una complementariedad de la experiencia dentro de la Protección Civil con el tiempo que tienen como directores. Algunos directores que tienen experiencia dentro del cuerpo de bomberos o prehospitalaria, independientemente de que tengan o no experiencia dentro de Protección Civil.

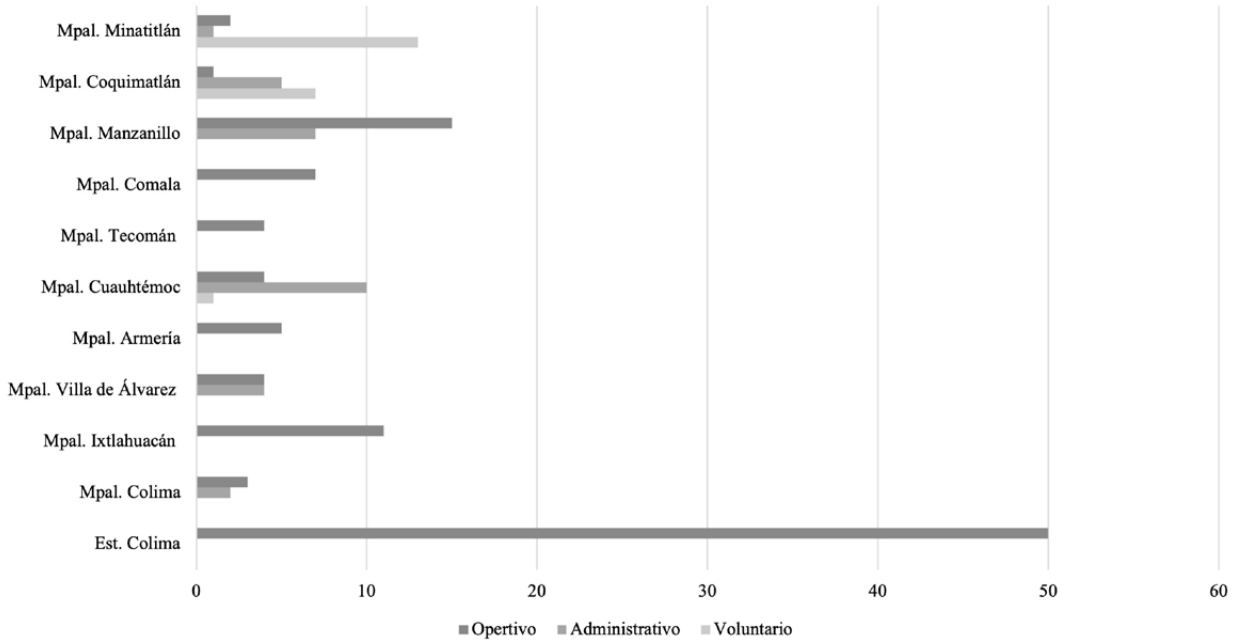


► **Figura 1.** Trayectoria de los directivos en Protección Civil.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 2, ocho de las diez unidades municipales cuentan con menos de 10 personas operativas. Destaca la Unidad Municipal de Protección Civil Manzanillo con el mayor número de personal bajo su cargo, entre operativos y administrativos que, en caso de ser necesarios, también realizan funciones operativas. La unidad de Minatitlán cuenta con mayor personal voluntario que de paga (entre operativos y administrativos). En las unidades municipales de Ixtlahuacán y Armería el personal operativo también realiza funciones administrativas. Por último, la Unidad Estatal de Protección Civil reportó tener 50 personas con funciones operativas y administrativas.

Estos datos se vuelven significativos respecto a la extensión territorial y el total de población en cada municipio y en todo el estado. De ese modo, sumando el personal de todas las unidades municipales más el personal de la unidad estatal, las 731,391 personas (INEGI, 2020) que conforman la población del estado de Colima son atendidas por 156 personas de Protección Civil. Es decir, hay un elemento de Protección Civil por cada 4,688 colimenses. En una extensión territorial de 5,626.9 km² (INEGI, 2020), se tendría una persona de Protección Civil por cada 36 km². A continuación se presenta la Tabla 1 con las proporciones de personal en cada unidad de Protección Civil, con respecto a la población de cada municipio y a nivel estatal.



► **Figura 2.** Personal de las unidades de Protección Civil.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Comparativa del personal de Protección Civil en relación con la población municipal.

Unidad Pc	Personal Total	Población	Proporción Personal-Población
Mpal. Colima	5	157,048	1-31,409
Mpal. Ixtlahuacán	11	5,623	1-511
Mpal. Villa de Álvarez	8	149,762	1-18,720
Mpal. Armería	5	27,626	1-5,525
Mpal. Cuauhtémoc	15	31,267	1-2,084
Mpal. Tecomán	4	116,305	1-29,076
Mpal. Comala	7	21,661	1-3,094
Mpal. Manzanillo	22	191,031	1-8,683
Mpal. Coquimatlán	13	20,837	1-1,602
Mpal. Minatitlán	16	10,231	1-639
Todo el estado	156	731,391	1-4,688

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2020).

Si bien el tema de la Protección Civil y la gestión integral de riesgos no es un asunto exclusivo de las unidades operativas de Protección Civil, ya que la institución fuciona gracias a los diferentes niveles de gobierno y con la incorporación de la sociedad civil a través de grupos voluntarios y de la iniciativa privada, resulta sumamente interesante dimensionar la capacidad de respuesta inmediata del personal especializado para atender a la población de cada municipio. Además de ser un indicador del necesario aumento del personal y la mejora del equipamiento de las unidades en Colima, para lograr un mejor trabajo de prevención de desastres a través de la gestión integral de riesgos y para brindar un mejor servicio en la atención de emergencias.

Caracterización de los EEP

Se les preguntó a los directores si sabían lo que era un EEP, cuatro de los 11 directores manifestaron no saberlo, aunque posteriormente mencionaron algunos elementos característicos de estos eventos. Los siete restantes lograron brindar referencias a las características de estos eventos, y dos de esos siete los describieron de forma concreta. Las caractéristicas asociadas a los EEP, según los directores de Protección Civil, son tres:

1. Cantidad atípica o extraordinaria de precipitación
2. Rápido desarrollo y poca duración de la precipitación
3. Desarrollo geográfico delimitado de la precipitación

Ahora bien, de las características y definiciones proporcionadas, siete corresponden a EEP no asociados a ciclones tropicales (No-CT), dos sí se asocian a ciclones tropicales (Sí-CT), y dos más consideran conjuntamente características de EEP No-CT y Sí-CT. En la Tabla 2 se muestra la caracterización realizada de cada director.

Tabla 2. Características de los EEP según los diferentes directores de PC.

Unidad Pc	Precipitación Atípica	Rápido Desarrollo	Localización Delimitada	Tipo de Asociación
Est. Colima	Sí	Sí	Sí	No-CT
Mpal. Colima	Sí	Sí	Sí	No-CT
Mpal. Ixtlahuacán		Sí		No-CT
Mpal. Villa de Álvarez		Sí		Sí-CT
Mpal. Armería	Sí			No-CT
Mpal. Cuauhtémoc	Sí			No-CT
Mpal. Tecomán	Sí	Sí		Indistinta
Mpal. Comala	Sí	Sí		No-CT
Mpal. Manzanillo	Sí			Indistinta
Mpal. Coquimatlán	Sí			No-CT
Mpal. Minatitlán	Sí	Sí		Sí-CT

Fuente: Elaboración propia.

Algunas definiciones de EEP compartidas por los directores municipales se muestran a continuación.

Director de Protección Civil Municipal de Colima

Bueno, usando el sentido común, será una precipitación pluvial extraordinaria que no se ve muy comúnmente, y que por consecuencia trae bastante agua, que puede venir acompañada de fuertes vientos, que es lo que más nos impacta, más tanto que el agua…, y descargas eléctricas. Y de éstas… no me he aprendido los nombres, pero hace poco escuché o leí de un fenómeno que se da muy puntual o muy local, éste toda la vida ha existido, pero yo no lo había identificado como tal; o sea, puede estar casi hasta con sol en gran parte del municipio, pero en una parte pequeña está una tormenta súper intensa, que ya se ha dado en este municipio de Colima.

Director de Protección Civil Municipal de Cuauhtémoc

(…) es donde, bueno, se ha tenido caída…o bueno, se ha tenido la precipitación por encima de lo que tenemos nosotros marcada aquí en el municipio, que ha sobrepasado el límite que hemos tenido nosotros, o la cantidad que tenemos normalmente.

Lluvias atípicas donde la precipitación ha superado la normal o la que tenemos cuando se ha tenido alguna precipitación referente que sea algún huracán, algún ciclón, alguna cuestión así, este…han sido atípicas. (…) sí solamente ha sido la cantidad de agua. De ahí en más, afortunadamente no se han tenido vientos asociados con ésta, solamente ha sido esa situación que se ha presentado. Dentro del temporal de lluvias sí hemos tenido tormentas eléctricas (…).

Es interesante el hecho de que en algunas de las definiciones, como las expuestas anteriormente, se logra identificar el elemento característico de los EEP, pero no se hace mención alguna de valores de umbral específicos para determinarlos (p. ej., 50 mm o 70 mm en 24 horas), como se mencionan por los mismos organismos gubernamentales como el CENAPRED. Los directores municipales, con base en la experiencia que han tenido con este tipo de eventos, mencionaron otras características como los fuertes vientos, descargas eléctricas y granizo, así como las afectaciones asociadas. Sobre este punto se volverá más adelante. También utilizaron otros términos para hacer referencia a estos eventos: trombas, tormentas de temporada, chubascos, lluvia atípica, lluvias torrenciales, lluvias intempestivas o lluvias intensas.

En cuanto a los periodos de ocurrencia, cinco directores refirieron que suelen ocurrir entre septiembre y noviembre; dos mencionaron que ocurren dentro del temporal de lluvias; uno dijo que ocurrían en junio (dentro del temporal), y tres directores no especificaron el periodo de ocurrencia. Lo anterior empata aceptablemente con lo reportado por la literatura (León-Cruz *et al.*, 2022), aunque en su mayoría existe una tendencia de localizar este tipo de eventos hacia finales del temporal de lluvias, durante el otoño. Esto puede explicarse debido a que algunos de los fenómenos más intensos se dan justamente hacia finales del temporal de lluvias, por lo que la memoria colectiva puede estar vinculada mayormente a estos casos.

Identificación de zonas impactadas por EEP

Respecto a la población más vulnerable ante la ocurrencia de EPP en el estado, los directores refirieron que las comunidades más vulnerables son aquellas que se encuentran cerca de ríos, arroyos, drenes, cerros con riesgo de derrumbes o escurrimientos de campos de cultivo. Asimismo, se mencionaron los asentamientos irregulares que ya han tenido inundaciones o que están sobre el cauce de un río. Algunos directores sólo hicieron referencia a zonas o poblaciones vulnerables determinándolas como puntos críticos o asentamientos irregulares. En la Tabla 3 se presenta información al respecto.

Los directores municipales de Colima, Comala y Cuauhtémoc determinaron algunas zonas con mayor presencia de EEP en sus municipios: zona urbana, zona norte, y zona norte y oriente, respectivamente. No obstante, sólo los directores de las unidades municipales de Colima y Villa de Álvarez manifestaron que las afectaciones suelen ocurrir dentro de la zona urbana y conurbada. Según el director de la unidad estatal, las personas con menos recursos son las más afectadas porque son la más vulnerables.

Tabla 3. Identificación de poblaciones vulnerables ante EPP.

Unidad PC	Comunidades	Colonias	Calles o avenidas
Est. Colima	SD	SD	SD
Mpal. Colima	SD	Casas y colonias sobre el río Colima	SD
Mpal. Ixtlahuacán	Las Conchas y Tamala	SD	SD
Mpal. Villa de Álvarez	Mixcuate y El Naranjal	Manuel M. Diéguez y Arboledas del Carmen	Providencia, María Ahumada de Gómez, y Prolongación Hidalgo
Mpal. Armería	SD	Rincón de López, La Laguna, Sagrado Corazón y Coalatilla	SD

Unidad PC	Comunidades	Colonias	Calles o avenidas
Mpal. Cuauhtémoc	Quesería	SD	SD
Mpal. Tecomán	SD	SD	SD
Mpal. Comala	La Becerrera, Cofradía y La Caja	Colomos, Santiago y Miravalle	SD
Mpal. Manzanillo	Marabasco, El Centinela y La Culebra	Colomos, Santiago y Miravalle	SD
Mpal. Coquimatlán	Puebo Juárez	Santa Rita, Las Moras y Los Camichines	SD
Mpal. Minatitlán	SD	SD	SD

Fuente: Elaboración propia.

Afectaciones y daños asociados a EEP

Como se había señalado anteriormente, el riesgo se genera a partir de la interacción de la amenaza con la vulnerabilidad. En ese sentido, las afectaciones y daños constituyen la materialización del riesgo asociado a los EEP y a las condiciones de vulnerabilidad de la población, el entorno, actividades productivas e infraestructuras.

En la Tabla 4, resulta significativo que en todos los municipios haya afectaciones en viviendas ante la ocurrencia de EEP, lo cual puede implicar que las personas tengan que invertir recursos económicos y materiales en las reparaciones, agravando su condición de vulnerabilidad. Las afectaciones en vías de comunicación son otras de las infraestructuras importantes, ya que posibilitan el traslado de personas y mercancías, además de que se vuelven necesarias para proporcionar ayuda a las poblaciones afectadas. Los daños en el arbolado también resultan un factor de pérdida importante de la biodiversidad del estado, aunado al hecho de que cuando el árbol completo, o parte de éste, es derribado, suele afectar viviendas, automóviles y obstruir vías de comunicación.

Además de las afectaciones en cultivos en municipios que tienen una actividad económica mayormente agrícola, resulta de suma importancia el que seis de los 10 municipios reportaran pérdidas de vidas humanas ante la ocurrencia de EEP.

Por último, dentro de la variedad de efetos adversos de los EEP, indicados en la Tabla 4, los directores mencionaron daños en el cableado eléctrico, postes para cableado eléctrico, espectaculares, autos varados, aparatos electrónicos, muerte de ganado vacuno por rayos y accidentes automovilísticos. Todo lo anterior confirma la importancia que tienen estos fenómenos como mediadores del riesgo de desastre.

Tabla 4. Tipos de afectaciones identificadas por EEP.

Unidad pc	Arbolado	Vivienda	Cultivos	Vías de comunicación	Vidas humanas
Est. Colima					
Mpal. Colima	Sí	Sí		Sí	Sí
Mpal. Ixtlahuacán	Sí	Sí		Sí	
Mpal. Villa de Álvarez		Sí		Sí	Sí
Mpal. Armería	Sí	Sí		Sí	
Mpal. Cuauhtémoc	Sí	Sí	Sí		
Mpal. Tecomán	Sí	Sí			Sí
Mpal. Comala	Sí	Sí		Sí	Sí
Mpal. Manzanillo	Sí	Sí		Sí	
Mpal. Coquimatlán		Sí	Sí	Sí	Sí
Mpal. Minatitlán		Sí	Sí		Sí

Fuente: Elaboración propia.

Identificación y monitoreo de EEP

En la Tabla 5 se muestra la manera en la que los directores de Protección Civil en Colima han identificado y monitoreado los EEP. Resulta interesante que la observación directa del cielo constituye una de las estrategias más usadas para identificar la formación de EEP; estrategia que se complementa con la información producida por el SMN y por la CONAGUA. La transmisión de información entre las direcciones de PC también se vuelve relevante, debido a que eso permite a los directores conocer de manera inmediata la situación del tiempo en los municipios vecinos y en determinadas zonas cuenca arriba de sus propias demarcaciones. Aunque existe instrumentación técnica para la medición del estado del tiempo por parte de la universidad estatal, así como otras instituciones educativas y dependencias no gubernamentales, llama la atención que no se mencionara el acceso a dicha información.

Tabla 5. Identificación y monitoreo de EEP.

Unidad pc	Observación directa	Pc estatal Pc municipales	Smn conagua	Sedena marina	Otras
Est. Colima	Sí		Sí	Sí	Imágenes satelitales
Mpal. Colima	Sí	Sí			
Mpal. Ixtlahuacán	Sí		Sí		
Mpal. Villa de Álvarez	Sí				
Mpal. Armería		Sí	Sí		
Mpal. Cuauhtémoc	Sí	Sí			Estación meteorológica propia
Mpal. Tecomán				Sí	Imágenes satelitales
Mpal. Comala			Sí		Comisarios y Centros de Salud
Mpal. Manzanillo			Sí		
Mpal. Coquimatlán		Sí	Sí		Página web Windy.com y Seguridad Pública
Mpal. Minatitlán	Sí	Sí		Sí	Atlas de riesgos

Fuente: Elaboración propia.

El uso de otras fuentes de información, como la Secretaría de la Defensa Nacional o la Secretaría de Marina, la interpretación de imágenes satelitales de otros servicios meteorológicos, o la comunicación con autoridades locales o Centros de Salud, se vuelve relevante para complementar las deficiencias en la predicción a muy corto plazo y seguimiento por parte del SMN. Es decir, resulta interesante que todos los directores utilicen más de una estrategia para identificar y monitorear los EEP.

Por último, sólo algunos directores manifestaron comunicar la información observada o recibida sobre los EEP a la población bajo su jurisdicción. La Unidad Estatal de Protección Civil mencionó que utiliza las redes sociales digitales para informar por medio de publicaciones o boletines. En el caso de Ixtlahuacán, en la comunidad de las Conchas, utilizan un megáfono, instalado por un particular, que suele usarse para dar avisos de cualquier tipo a la comunidad; es decir, se aprovecha un sistema de avisos que ya funciona en la comunidad. Asimismo, la mayoría de los municipios suelen mantener comunicación constante con los comisarios de las comunidades, quienes se encargan de transmitir la información a sus vecinos o avisar a las autoridades de cualquier situación que acontezca.

Conclusiones

La aplicación de entrevistas semiestructuradas a los directores municipales y al director estatal de Protección Civil permitió determinar los mecanismos y estrategias empleadas en Colima para identificar y monitorear los EEP. Asimismo, se pudo comprobar el riesgo asociado a los EEP en todos los municipios del estado y las principales afectaciones que ha tenido la población.

La condición de riesgo asociada a EEP no es homogénea para el estado, e incluso para los municipios, comunidades, colonias o familias; esto se debe a la vulnerabilidad diferencial. De igual manera, la capacidad institucional para gestionar los riesgos en cada municipio es diferencial, por lo que conocer la experiencia y capacidad de respuesta de cada unidad de protección civil es imprescindible para acercarnos a la comprensión del riesgo de desastre en Colima.

Que los directores hayan podido definir o caracterizar, en términos generales, un EEP y tengan identificadas las poblaciones vulnerables, es de suma importancia en términos de previsión, ya que el conocimiento de la condición de riesgo asociado a los EEP, por parte de las autoridades, constituye el primer elemento a considerar en términos de un SAT para estos fenómenos.

Respecto a la identificación y monitoreo, resulta interesante que, ante la falta de un SAT para EEP, los directores de Protección Civil usaron estrategias que van desde la observación directa de algunas manifestaciones del tiempo, hasta el uso de aplicaciones o plataformas digitales para obtener información. Las redes de comunicación a nivel municipal y comunal también constituyen una estrategia relevante para la identificación de los EEP. No obstante, existen limitaciones técnicas que este tipo de estrategias conllevan con respecto a sistemas y equipos tecnológicos específicos para la predicción y seguimiento de EEP.

En este contexto, los EEP Sí-CT son aquellos que brindan una ventana temporal mayor para que los sistemas municipales y estatales de Protección Civil se preparen ante el paso o impacto de CT. Contrario a los EPP No-CT, que se desarrollan en cuestión de horas o minutos. Esto es importante en la configuración del riesgo a la luz de las capacidades institucionales porque, si bien los CT pueden ser pronosticados y monitoreados, los EEP Sí-CT suelen poseer mayores acumulados de lluvia y suelen ocurrir en la porción sur. Mientras que los EEP No-CT son más recurrentes e "imprevisibles", para los actuales sistemas de pronóstico y monitoreo, y ocurren mayoritariamente en el centro y norte del estado.

Por último, si bien se debe avanzar en el desarrollo de estudios científicos para comprender mejor el riesgo asociado a los EEP y se vuelve necesario que las instituciones gubernamentales, encargadas de monitorear el clima y el tiempo, mejoren sus sistemas de pronóstico y seguimiento, el trabajar en mecanismos para la difusión de alertas y la elaboración e implementación de planes de respuesta o contingencia, junto con las poblaciones en riesgo, constituyen componentes fundamentales para el establecimiento de un SAT; aunado al hecho de que se debe trabajar más en la prevención del riesgo de desastre.

Agradecimientos

Agradecemos a los directores municipales y al director estatal de Protección Civil de Colima, por su generosa ayuda y aporte para la realización de esta investigación.

» Referencias bibliográficas

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1996). Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres (Armada Electronica). LA RED: Red de Estudios Sociales en Prevención.

CENAPRED. (2015). ÍNDICE DE RESILIENCIA A NIVEL MUNICIPAL. In Centro Nacional de Prevención de Desastres. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos.

CENAPRED. (2018). Sistemas de Alerta Temprana. Ciudad de México.

CENAPRED. (2020). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México durante el 2020.

CENAPRED. (2023, April 5). Atlas Nacional de Riesgos. Atlas Nacional de Riesgos. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/

Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5406–5430. https://doi.org/10.1002/joc.7225

Domínguez-Sarmiento, C., Cuéllar-Ramirez, P., Welsh-Rodríguez, C., & Ochoa-Martínez, C. (2018). Percepción de riegos hidrometeorológicos en personas interesadas en los objetivos de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. *Antrópica. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(8), 201–214. https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/112

Gutiérrez-Lozano, J., Vargas-Tristán, V., Romero-Rodríguez, M., Plácido de la Cruz, J. M., Aguirre-Bortoni, M. de J., & Silva-Espinoza, H. T. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas* (Mx), 76, 20–33. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56921271003

Herrera, E., Magaña, V., & Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova Scientia*, 10(21), 191–206. https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527

Hewitt, K. (2019). *Interpretations of Calamity* (K. Hewitt, Ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780429329579

INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/col/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=06

Kunkel, K. E. (2003). North American Trends in Extreme Precipitation. *Natural Hazards*, 29(2), 291–305. https://doi.org/10.1023/A:1023694115864

León-Cruz, J. F., Díaz-Peón, A. L., & Rodríguez-García, H. I. (2022). Eventos extremos de precipitación en Colima, México (1981-2018). *Investigaciones Geográficas*, 107. https://doi.org/10.14350/rig.60516

León-Cruz, J., Pineda-Martínez, L., & Carbajal, N. (2020). Advertencias de tormentas severas y tornados en México. 14, 3–14.

Ley de Protección Civil Del Estado de Colima, Pub. L. No. Decreto 133 (2016).

Macías, J. M. (2018). Social-Individual Behaviour Problems Regardin Early Warming Systems Against Disaster. In M. L. Marván (Ed.), *Preventing Health and Enviromental Risks in Latin America*. (1st ed., Vol. 23). The Antropocene: Politik—Economics—Society—Science.

Maskrey, A. (1993). Los desastres No Son Naturales (LA RED). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Maskrey, A. (1997). *IDNDR Early Warning Programme Report on National and Local Capabilities for Early Warning*.

Mendoza-Cano, O., Aquino-Santos, R., López-de la Cruz, J., Edwards, R. M., Khouakhi, A., Pattison, I., Rangel-Licea, V., Castellanos-Berjan, E., Martinez-Preciado, M. A., Rincón-Avalos, P., Lepper, P., Gutiérrez-Gómez, A., Uribe-Ramos, J. M., Ibarreche, J., & Perez, I. (2021). Experiments of an IoT-based wireless sensor network for flood monitoring in Colima, Mexico. *Journal of Hydroinformatics*, 23(3), 385–401. https://doi.org/10.2166/hydro.2021.126

Mendoza-Cano, Oliver., López-de la Cruz, L., Pattison, i., Martinez-Preciado, M. A., Uribe-Ramos, J., Edwards, R. M., Ramírez-Lomelí, I. C., Rincón-Avalos. P., & Velazco-Cruz, J. C. (2019). Disaster Risk Resilience in Colima-Villa de Alvarez, Mexico: Application of the Resilience Index to Flash Flooding Events. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2128. https://doi.org/10.3390/ijerph16122128

Montijo-Galindo, A., & Ruiz-Luna, A. (2018). El rol de la capacidad institucional como medida de adaptación frente a eventos de precipitación extrema en el noroeste de México. *Región y Sociedad*, 30(73). https://doi.org/10.22198/rys.2018.73.a985

Oliveira, P. T., Santos e Silva, C. M., & Lima, K. C. (2017). Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1–2), 77–90. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z

Pérez-Morga, N., Kretzschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V., & Munoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal river basins of the southern mexican Pacific region. *Geofísica Internacional*, 52(3), 277–291. https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71477-6

Pineda-Martínez, L. P., León-Cruz, J. F., & Carbajal, N. (2020). Análisis de tormentas severas y formación de tornados en la región norte de México. *Revista Bio Ciencias*, 7.

SMN. (2012). *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México*. (SEMARNAT).

Wilches-Chaux, Gustavo. (1998). *Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador : o yo voy a correr el riesgo* (1a. ed.). La Red.

Zuñiga-Tovar, A. E., & Magaña-Rueda, V. O. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect to land use cover change. *Investigaciones Geográficas*, 95. https://doi.org/10.14350/rig.59465

» Sección III Vulnerabilidad y riesgos

3

3.1 Factores subyacentes del riesgo de desastres asociados al clima: aportes desde REDESClim

Juan Manuel Rodríguez Esteves
El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, Baja California, México

Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Universidad Veracruzana, México

Palabras Clave: factores subyacentes del riesgo de desastres, reducción del riesgo, desarrollo sostenible.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

El riesgo de desastre es definido como la "posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones o destrucción y daños en bienes en un sistema, una sociedad o una comunidad en un periodo de tiempo concreto, determinados de forma probabilística como una función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa" (NU, 2016). Para reducir el riesgo, se deben construir marcos conceptuales que no solamente comprendan la amenaza o fenómeno natural, sino cómo la sociedad enfrenta estos contextos de riesgo, a partir de su organización, estructura social, desarrollo territorial y la percepción hacia esa amenaza. El papel de la política pública de reducción del riesgo juega un papel central en este proceso.

Los factores o causas subyacentes del riesgo hacen referencia a los factores que definen el desarrollo de una comunidad o parte de una sociedad. Estas causas pueden estar referidas a los contextos de pobreza, marginación, desigualdad social, económica, política, localización geográfica, etc.; pero también a la política de regulación de los usos del suelo (atribución de los gobiernos locales), particularmente en zonas urbanas donde existe un intensivo uso del suelo que, en muchos de los casos, obliga a un sector de la sociedad a ocupar zonas expuestas a las amenazas naturales.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) están orientados a reducir los factores que determinan la pobreza, aumentar la protección al ambiente natural, desarrollar una adaptación al cambio climático y a su variabilidad (NU, 2022). En 2015, las naciones acordaron atender y dirigir sus políticas de desarrollo social, económico y territorial para el cumplimiento de 17 estrategias que van desde la reducción de la pobreza hasta lograr la paz y la justicia. De manera particular, la presente investigación está enfocada en el cumplimiento de las metas relacionadas con los desastres asociados al clima (ODS 11 y 13). Desde el enfoque de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), se busca ofrecer mecanismos de colaboración para atender parte de las metas de estos objetivos.

La estrategia metodológica consistió en una revisión de los principales desastres asociados al clima en México, considerando el impacto económico, pérdidas y daños para ubicar al lector en un contexto general del tema. La adopción de los ODS permitió identificar dos objetivos y cinco metas directamente asociadas al tema de riesgo y desastres, con lo que se realizó un análisis de sus alcances y limitaciones. A partir de lo anterior, se presenta una discusión sobre las causas o factores subyacentes del riesgo de desastre para delimitar una ruta crítica a seguir, con la intención de proponer acciones de política pública para la reducción del riesgo, cambiando el enfoque de gestión del riesgo y no solamente del desastre. La trayectoria de 11 años de la REDESClim ha permitido hacer propuestas para el monitoreo, diagnóstico, pronóstico, modelado del riesgo de desastres, así como de políticas públicas para reducir el riesgo de desastres asociados al clima para reducir el riesgo de desastres asociados al clima, pero también se discuten algunos factores que deben ser atendidos para incidir de manera más profunda en la reducción del riesgo.

El presente artículo está estructurado en cinco apartados. El primero corresponde a un diagnóstico de los principales desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos que han afectado la República Mexicana, e identificar las principales amenazas que pueden afectar al territorio nacional. En un segundo apartado se analizan los ODS (NU, 2015) como una estrategia mundial para alcanzar una nueva agenda para el desarrollo sostenible, poniendo especial énfasis en los objetivos y metas relacionadas directamente con el riesgo y los desastres. En tercer lugar, se discuten los procesos que implican en las causas subyacentes del riesgo de desastres, para demostrar que estos obedecen a un proceso complejo de relaciones entre factores naturales, físicos, sociales, económicos, políticos, etc. El cuarto apartado se dedica al papel que ha desarrollado REDESClim, en los últimos 11 años de trabajo colaborativo, para identificar sus logros, pero, sobre todo para discutir nuevas formas de incidir en la solución de los problemas que se asocian al riesgo y los desastres. Finalmente, se presentan las reflexiones finales que, más que concluir la discusión, presentan nuevas rutas para el cumplimento de los ODS y los objetivos de REDESClim para los próximos años.

Los desastres asociados al clima en México

El territorio nacional está expuesto a un gran número de fenómenos asociados al clima y condiciones hidrometeorológicas como huracanes, inundaciones, sequías, tormentas, ondas de calor, etc., exponiendo a las personas, sus propiedades y la infraestructura civil (Cavazos & Sánchez-Rodríguez, 2015). La exposición de México se debe, entre otros factores, a que sus costas reciben de manera directa los embates de los eventos hidrometeorológicos desde el Golfo de México, mar Caribe y el océano Pacífico; además, y debido a su latitud, se ubica en lo que los expertos han llamado la ruta de los huracanes. Sin embargo, los daños asociados al clima no sólo responden a la intensidad de los fenómenos, sino también a las formas en que la vulnerabilidad toma significado en los asentamientos humanos, como son su propia exposición, organización para enfrentar las amenazas, desarrollo urbano descontrolado, percepción social al riesgo, entre otros factores.

La Tabla 1 muestra un resumen de los principales huracanes y frentes fríos para el periodo de 2005 al 2020, considerados como los que mayores daños desencadenaron.

El huracán Stan se desarrolló entre el 1 y el 5 de octubre de 2005, tocando las costas mexicanas por la península de Yucatán, y se consideró como el peor desastre de la región, después del huracán Mitch en 1998, debido a los daños asociados al ciclón. A Stan se le atribuyen 98 decesos, de los cuales 86 se presentaron en Chiapas, 5 en Oaxaca, 4 en Hidalgo y 3 en Puebla. Además de que el 71% de los fueron en Chiapas, 12% en Veracruz, 8% en Oaxaca, así como 4% en Higalgo y Puebla, cada uno, aproximadamente. Para el caso de Chiapas, la entidad más afectada, los

principales daños se presentaron en los sectores de vivienda, hidráulico y comunicaciones y transportes (SNPC & CENAPRED, 2006). Por su parte, el ciclón tropical Manuel afectó las costas de Guerrero y Sinaloa, principalmente, entre el 13 y 20 de septiembre de 2013. Para el caso de Guerrero, se registraron 105 decesos y 10,497 viviendas dañadas; mientras que en Sinaloa fueron tres muertes y 404 casas dañadas (CENAPRED, 2013). Este ciclón, al igual que Ingrid, impactaron el territorio nacional casi de manera simultánea, por lo que 2013 fue un año atípico.

Los impactos de los desastres asociados a huracanes son eventos recurrentes en algunas entidades del país. Como se mencionó arriba, el estar ubicado sobre la ruta de los huracanes implica que los estados del Pacífico (como Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur y Sinaloa) son frecuentemente afectados por estos eventos. Por su parte, los estados de Quintana Roo, Yucatán y Veracruz son frecuentemente afectos tanto por los huracanes como otros eventos hidrometeorológicos (SSPC, 2020).

Tabla 1. Impactos asociados a eventos hidrometeorológicos en México.

Fenómeno	Año	Cuenca	Muertes	Daños económicos (millones de pesos)
Stan	2005	Atlántico	98	21,062
Wilma	2005	Atlántico	0	18,773
Alex	2010	Atlántico	21	25,015
Karl y Matthew	2010	Atlántico	23	26,842
Manuel	2013	Pacífico	108	28,919
Ingrid	2013	Atlántico	1	24,446
Odile	2014	Pacífico	6	24,133
Patricia	2015	Pacífico	0	3,288
Willa	2018	Pacífico	9	3,627
Frentes Fríos 4 y 5	2020	Atlántico	10	9,895

Fuente: Elaboración propia con datos de Cenapred (2006, 2011, 2013, 2021a, 2021b, 2021c y 2021d).

Los eventos naturales asociados al clima o eventos meteorológicos no son sinónimo de desastres. Para entender el desastre se debe comprender el término de riesgo de desastres, el cual se define en función de tres variables: el fenómeno, la exposición y la vulnerabilidad. Los fenómenos son eventos extremos que pueden impactar de manera negativa a una comunidad, resultado de procesos tanto físicos como sociales; la exposición es el resultado de las relaciones sociedad-naturaleza, que se reflejan en el territorio, basado en las relaciones de producción; la vulnerabilidad hace referencia a las condiciones frágiles de la dimensión social, económicas, políticas, culturales, etc. (Maskrey, 2016). Entendido de esta forma, el desastre es la manifestación del riesgo en el territorio y que no ha sido mitigado, producto de las condiciones físicas, naturales y sociales. Por lo tanto, hablar de la reducción del riesgo es atender los problemas no resueltos del desarrollo sostenible.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) representan la agenda universal para la acción, cooperación de los países miembros de las Naciones Unidas, para poner fin a la pobreza, proteger el planeta, mejorar las vidas y las perspectivas de las personas a nivel mundial. Durante 2015, los estados miembros de Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con lo cual se comprometieron para alcanzar las metas en un periodo de 15 años (NU, 2022).

Desde un inicio, los países acordaron que los desafíos y compromisos de los ODS estaban interrelacionados, por lo que se requieren estrategias integradas, donde no sólo se aborde un objetivo, sin considerar aquellos que estén estrechamente relacio-

nados, como es el cambio climático, ciudades y comunidades sostenibles, entre otros (NU, 2019). De esta forma, se requiere un abordaje amplio e incluyente que permita solucionar problemas actuales, muchos de ellos de carácter estructural, como la pobreza, y definir una agenda para el desarrollo amplio tanto de las personas como del territorio, con especial énfasis en el cambio climático, el cual es un tema transversal a otros problemas a nivel global.

El cambio climático es el objetivo más urgente de cumplir (NU, 2019). Alcanzar 1.5 grados centígrados de aumento en la temperatura, asociado al calentamiento global, para las próximas décadas implicaría, como ya lo estamos viendo, efectos catastróficos e irreversibles como son la acidificación de los océanos, erosión de las costas, eventos meteorológicos extremos, desastres (mal llamados naturales) más frecuentes, pérdida de especies, entre otros.

Los ODS acordados en 2015 son, de manera concreta: 1) Fin de la pobreza, 2) Hambre cero, 3) Salud y bienestar, 4) Educación de calidad, 5) Igualdad de género, 6) Agua limpia y saneamiento, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico, 9) Industria, innovación e infraestructura, 10) Reducción de las desigualdades, 11) Ciudades y comunidades sostenibles, 12) Producción y consumo responsables, 13) Acción por el clima, 14) Vida submarina, 15) Vida de ecosistemas terrestres, 16) Paz, justicia e instituciones sólidas y 17) Alianza para lograr los objetivos (NU, 2022). Como se puede observar, el cumplimiento de cada uno de los objetivos implica la atención de los otros, por lo que se deben acordar, tanto en la escala local como global, estrategias transversales que conjunten esfuerzos y recursos para un verdadero desarrollo sostenible. Cada uno de los objetivos ponen especial énfasis en los grupos más vulnerables, así como niños, mujeres y personas de la tercera edad.

De los 17 objetivos, destacan el número 11 y el 13, los cuales están directamente relacionados con el tema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos. Los objetivos y metas de estos dos se detallan en la Tabla 2.

Las metas sobre Ciudades y Asentamientos Sostenibles tienen el objetivo de abatir el rezago en la vivienda, servicios públicos, transporte, urbanización, patrimonio cultural y natural, así como del impacto ambiental y áreas verdes en los asentamientos humanos. En la mayor parte de los casos, estos rezagos deben ser atendidos por las autoridades locales o municipales, pero implican grandes desafíos, pues este nivel de gobierno suele no contar con los recursos, personal y marcos normativos para su cumplimiento, tal y como ocurre en México. Sin embargo, las metas sobre la reducción de los impactos provocados por los desastres y el cambio climático deben ser atendidos tanto por el nivel local como nacional.

Por su parte, las metas sobre Acción por el Clima buscan contribuir a la resiliencia y adaptación al riesgo de desastres y al cambio climático, lo cual representa procesos de planificación y gestión de un gran número de actores, incluyendo la participación internacional para el financiamiento. Esto puede representar que los temas de reducción del riesgo y adaptación al cambio climático deban ser incluidos en los planes y políticas de ordenamiento territorial y de regulación del uso del suelo con un enfoque de largo plazo, muchas veces ausentes de las políticas gubernamentales.

En la actualidad, México cuenta con instancias de organización e instrumentos para el seguimiento del cumplimiento de las principales metas hacia el desarrollo sostenible, como es el caso del Comité Técnico Especializado de los ODS (INEGI, 2015) y el Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Secretaría de Gobernación, 2017). Sin embargo, estos deben acelerar su alcance a las esferas de la vida cotidiana, involucrando a los actores sociales necesarios para una verdadera gestión integral del riesgo, ya que, como se verá más adelante, el país ha logrado alcances importantes, pero aún siguen ocurriendo desastres que comprometen aspirar al desarrollo sostenible.

Tabla 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible seleccionados.

Objetivos	Metas
11. Ciudades y comunidades sostenibles	Asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles.
	Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles.
	Aumentar la urbanización inclusiva y sostenible, así como la capacidad para la planeación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos.
	Redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural.
	Reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas en comparación con el producto interno bruto mundial.
	Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.
	Proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles.
	Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales, fortaleciendo la planificación del desarrollo.
	Para el 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adopten e implementen políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático, la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, así como desarrollar y poner en práctica la gestión integral de los riesgos de desastre.
	Proporcionar apoyo a los países menos adelantados para que puedan construir edificios sostenibles y resilientes, utilizando materiales locales.
13. Acción por el clima	Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales.
	Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.
	Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.
	Cumplir el compromiso de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de lograr, para el año 2020, el objetivo de movilizar conjuntamente USD 100.000 millones anuales, a fin de atender las necesidades de los países en desarrollo, respecto de la adopción de medidas concretas de mitigación y la transparencia de su aplicación.
	Promover mecanismos para aumentar la capacidad de planificación y gestión eficaces, en relación con el cambio climático en los países menos adelantados y los Estados insulares en desarrollo, haciendo particular hincapié en las mujeres, los jóvenes y las comunidades locales y marginadas.

Fuente: PNUD (2022).

Las causas subyacentes del riesgo de desastres

El riesgo de desastres involucra procesos naturales como sociales. Para el primer caso, el contexto actual de cambio climático aumenta la incertidumbre acerca del comportamiento de los componentes de la atmósfera, por lo que se vienen presentando eventos hidrometeorológicos más intensos y con mayor frecuencia (WMO, 2022). Para el segundo caso, los procesos sociales que intervienen en la conformación y desarrollo de asentamientos humanos involucran un gran número de factores que determinan el comportamiento de las personas para vivir o no en zonas con alta exposición, déficits de servicios públicos, falta de mecanismos para la organización y reducción del riesgo, ausencia de regulación de los usos del suelo, etc. Por lo tanto, entender las causas subyacentes del riesgo es una labor compleja, multidimensional y multidisciplinaria (NU, 2015).

Las causas o factores subyacentes del riesgo de desastres son "procesos o condiciones, a menudo relacionados con el desarrollo, que influyen en el nivel de riesgo de desastres al incrementar los niveles de exposición y vulnerabilidad o reducir la capacidad" (NU, 2016). Desde este enfoque, los también llamados impulsores subyacentes del

riesgo cubren una amplia variedad de factores asociados a la pobreza, la desigualdad social y espacial, condiciones como el cambio climático, variabilidad climática, la urbanización no planificada, así como la falta de marcos reguladores del territorio, usos del suelo y de la gestión del riesgo. Estas condiciones previas para que se desencadenen desastres se pueden intensificar por las altas tasas demográficas, ocupación de costas y riberas de ríos, etc. Con base en Oliver-Smith *et al*. (2016), es necesario indagar sobre algunos temas para comprender, de inicio, las causas subyacentes del riesgo:

- Crecimiento y distribución de la población: analizar los movimientos de la población, asentamientos en zonas susceptibles a desastres, crecimiento demográfico, etc.
- Patrones y procesos del uso del suelo: considerar los planes y programas de desarrollo territorial, papel que juega el riesgo en la planificación de los asentamientos, etc.
- Degradación ambiental y agotamiento de los servicios ecosistémicos: degradación de tierras y desastres, legislación del uso y cambio del suelo, normas ambientales, etc.
- Distribución de la riqueza e ingresos: estudiar el impacto de los desastres en diferentes grupos sociales con base en el ingreso, niveles de pobreza y amenazas naturales, etc. (Oliver-Smith *et al*., 2016).

El riesgo y los desastres, al mismo tiempo que no afectan a la población por igual, tampoco lo hacen en el territorio, por lo que indagar las causas subyacentes del riesgo no implica usar la misma metodología, por lo cual se deben adecuar los marcos analíticos para cada realidad o caso de estudio. De esta forma, identificar las causas subyacentes del riesgo de desastres implica analizar condiciones no resueltas del desarrollo económico, social y territorial.

Un estudio pionero sobre las causas de los desastres, desde la vulnerabilidad, es la propuesta de Blaikie *et al.* (1996), quienes propusieron una serie de presiones que resultan en desastres, en otras palabras, la evolución de la vulnerabilidad. La propuesta radica en demostrar que la progresión de la vulnerabilidad se puede dar en tres escalas, es decir, del nivel global, nacional y local. Lo cual se traduce en causas de fondo (sistemas político-económico), presiones dinámicas (rápido crecimiento urbano, de población, deforestación, etc.) y condiciones inseguras (asentamientos humanos peligrosos, infraestructura débil, grupos sociales marginados, etc.). Estas presiones, al combinarse con la amenaza o evento natural extremo, pueden desencadenar los desastres, por lo que el riesgo es una función de la amenaza y la vulnerabilidad (Blaikie *et al*., 1996).

A partir de las causas de fondo, o causas subyacentes, la vulnerabilidad va tomando significado, particularmente cuando se combina con la amenaza, que no es cualquier evento natural, sino que debe sobrepasar un umbral que la convierta en un evento de alto impacto, quizás extremo, con capacidad de afectar a una población o sector de la sociedad, pero no a toda, sólo a aquel sector de la sociedad que es vulnerable a esa amenaza en particular. Por lo tanto, las causas de fondo más representativas que están directamente asociadas a la vulnerabilidad, ya sea dando origen o incrementándola, son procesos económicos, demográficos, políticos y culturales (estereotipos, discriminación en un sentido amplio, etc.).

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), es una línea temática del SECIHTI, creada el 25 de febrero de 2011 por un grupo de 10 investigadores (as) nacionales de instituciones de educación superior como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Centro de

Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste (Cibnor), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y El Colegio de la Frontera Norte (El Colef). El objetivo general de la red es establecer un puente de colaboración entre los científicos y los tomadores de decisiones para promover el conocimiento y encontrar soluciones al problema de los desastres en México (REDESCLIM, 2020). Un año después de su creación, REDESClim alcanzó una membrecía de 59 investigadores, funcionarios públicos y estudiantes de posgrado, llegando en la actualidad a 140 miembros, tanto de México como de algunos países de América Latina como Colombia, Ecuador, Guatemala y Cuba.

Para organizar sus actividades, se conformaron cinco líneas temáticas, las cuales obedecen a las especialidades de sus miembros, estas líneas son: a) Monitoreo, bases de datos y diseminación de información (34 % de membrecía), b) Diagnóstico y análisis de procesos (34 %), c) Pronóstico meteorológico y prevención de desastres (16 %), d) Modelación climática y análisis de procesos físicos (2 %) y e) Políticas públicas y estrategias de comunicación (14 %) (REDESCLIM, 2020). Es importante aclarar que algunos miembros se especializan en una o más líneas temáticas, muy frecuente en las ciencias atmosféricas, por lo que existen más expertos en la línea de modelación climática, por ejemplo.

Desde sus inicios, REDESClim ha buscado el trabajo colaborativo entre sus miembros, organizando, entre otras actividades, reuniones anuales para elaborar un plan estratégico de corto y mediano plazo, presentar avances y productos de investigación, así como la organización de talleres tanto para sus miembros como para el público en general, cuyas temáticas están relacionadas con sus líneas temáticas. Las coordinaciones de libros son un producto que ha resultado de las reuniones nacionales, que hasta el momento han sido 10, donde se analizan diferentes fenómenos hidrometeorológicos, estudios de caso sobre la relación riesgo-desastres, etc., para difundir los resultados de las investigaciones que realizan sus miembros. Con base en este tipo de productos, a continuación, se presentan los principales aportes de las líneas temáticas de REDESClim hacia los ODS.

Los 17 ODS fueron propuestos para transitar de manera armónica e integral hacia un modelo ideal de desarrollo global, donde se busca erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad de la población mundial como parte de la agenda hacia el 2030 (NU, 2022). Los objetivos abordan temas que son trasversales entre ellos, por lo que tratar de alcanzar uno de ellos puede implicar el atender a otros, por lo que se debe tener una visión amplia y conformar una agenda global con significado en lo local. El tema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos es un problema transversal, entendiendo éste en un sentido amplio que involucra al territorio, la marginación, el déficit de infraestructura urbana y rural, el desarrollo urbano en zonas expuestas a amenazas hidrometeorológicas, etc. Para identificar los temas que se trabajan en REDESClim que están asociados a los ODS, la Tabla 3 presenta los aportes e incidencia de las líneas temáticas de la red, particularmente con los objetivos 11) Ciudades y Comunidades Resilientes y 13) Acción por el Clima.

La información sobre estudios previos de REDESClim en la Tabla 3 se obtuvo de una revisión de las investigaciones presentadas en las últimas cinco reuniones nacionales, donde se presentan los resultados de los últimos ocho años. Las obras de Cavazos (2015), Rodríguez-Esteves *et al.* (2018), REDESCLIM (2018), Frausto-Martínez *et al.* (2020), así como Morales-Hernandez *et al.* (2021), sintetizan gran parte de los temas abordados en relación con las cinco metas de los ODS seleccionados. En este sentido, es difícil ubicar los temas trabajados por REDESClim en una de las metas, ya que, por su propia naturaleza y alcance teórico-metodológico, las investigaciones de la red atienden a uno o más tópicos de los ODS, puesto que el desastre es un tema transversal a diversos aspectos del desarrollo territorial, social y económico.

Por otro lado, atender las necesidades que se tienen en el ODS 11, Ciudades y comunidades sostenibles, permitirá también la solución de algunos temas pendientes del ODS 13, Acción por el clima. De esta forma, REDESClim ha proporcionado herramientas teórico-metodológicas para la solución de estos problemas, pero aún falta la interconexión entre el trabajo académico, donde también participan funcionarios públicos y estudiantes de posgrado, para poder incidir de manera directa en la reducción del riesgo y prevención de desastres, como ya se viene haciendo en casos muy particulares como la colaboración en el Atlas de Riesgo Bahía de Banderas, Nayarit (IMPLAN, 2020) y Apoyo Técnico para el Estudio de Riesgo a Inundaciones del Municipio de Atenango del Río, Guerrero (Frausto-Martínez *et al.*, 2021).

Tabla 3. Aportes de REDESClim a los ODS seleccionados.

Objetivo	Metas	REDESClim	
		Línea temática	**Estudios previos**
Ciudades y comunidades sostenibles	Reducir el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua y reducir las pérdidas económicas directas	Monitoreo	Bases de datos hidrometeorológicos.
		Diagnóstico	Amenazas y desastres hidrometeorológicos.
		Pronóstico	Variabilidad climática, sistemas de alerta temprana.
		Modelado	Modelado de sequías e inundaciones.
		Políticas	Gestión integral del riesgo, vulnerabilidad, asistencia ante desastres, análisis histórico de desastres.
	Aumentar el número de ciudades que implementen políticas y planes integrados para promover la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la resiliencia ante los desastres, así como desarrollar y poner en práctica la gestión integral de los riesgos de desastre	Monitoreo	Monitoreo de indicadores de resiliencia.
		Diagnóstico	Amenazas hidrometeorológicas.
		Pronóstico	Variabilidad climática, sistemas de monitoreo multiamenaza.
		Modelado	Modelado numérico.
		Políticas	Atlas de riesgos, gestión integral del riesgo, percepción del riesgo.
Acción por el clima.	Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales	Monitoreo	Monitoreo de indicadores de resiliencia, bases de datos hidrometeorológicos.
		Diagnóstico	Riesgo de inundación, amenazas hidrometeorológicas.
		Pronóstico	Clima urbano, islas de calor.
		Modelado	Modelado de la vulnerabilidad.
		Políticas	Políticas de prevención, gobernanza ante el cambio climático, adaptación ante huracanes.
	Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales	Monitoreo	Monitoreo de indicadores de resiliencia.
		Diagnóstico	Amenazas y desastres hidrometeorológicos.
		Pronóstico	Sistemas de monitoreo multiamenaza.
		Modelado	Modelado del riesgo de desastres.
		Políticas	Vulnerabilidad y variabilidad climática, adaptación climática, gobernanza ante cambio climático, atlas de riesgo.
	Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto a la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana	Monitoreo	Bases de datos hidrometeorológicos.
		Diagnóstico	Amenazas y desastres hidrometeorológicos.
		Pronóstico	Variabilidad climática y sistemas de alerta temprana.
		Modelado	Modelado de sequía.
		Políticas	Gestión integral del riesgo de desastres, percepción del riesgo, atlas de riesgos.

Fuente: Elaboración propia con datos de de NU (2022) y REDESClim (2020).

Reflexiones finales

El territorio nacional está expuesto a un gran número de eventos hidrometeorológicos y climáticos, lo que lo hace susceptible a los desastres. El impacto de los huracanes es recurrente cada año, tanto en la costa del Pacífico como del Golfo de México y mar Caribe, por lo que deberán ser regiones con una especial atención tanto en la solución de problemas urbanos, de uso del suelo y de organización social para la prevención.

Los ODS son una excelente iniciativa global que puede organizar los esfuerzos nacionales para orientar el futuro de las naciones hacia un crecimiento y desarrollo más armónico con la naturaleza, pero en el camino debe solucionar problemas de pobreza y asegurar el futuro de los habitantes del mundo. Para ello, cada país deberá enfrentar sus propios retos, integrando diferentes políticas de desarrollo alineados con cada uno de los 17 objetivos acordados en 2015 y con un horizonte al 2030. Las causas subyacentes del riesgo de desastres son procesos estrechamente relacionados con los ODS, ya que ambos buscan atender los factores que desencadenan desastres, vistos tanto como necesidades actuales, como problemas no resueltos del desarrollo.

Las conclusiones de este trabajo están alineados con el Programa Sectorial de Seguridad y Protección Ciudadana 2020-2024 del gobierno federal, donde se establece que "la limitada vinculación entre los sectores social, académico, privado y gubernamental, aunada a la falta de coordinación interinstitucional y armonización de políticas públicas, con un marco legal desactualizado y heterogéneo, insuficientes mecanismos y fondos preventivos, una prevaleciente visión reactiva ante el riesgo de desastres, así como una degradación ambiental creciente, no permiten que el país sea resiliente" (SSPC, 2020).

Para que el trabajo de REDESClim tenga un mayor impacto en atender el problema de los desastres, debe incidir en la política pública para la reducción del riesgo, a través de una participación más activa en la elaboración de los atlas de riesgos y en los planes de acción climática, tanto a nivel nacional como estatal y municipal, ya que éstos son los instrumentos o marcos de referencia para reducir el riesgo y la adaptación al cambio climático. Sin embargo, estos instrumentos deberán ser aplicados para el ordenamiento del territorio, así como la reducción de la exposición y el riesgo. Finalmente, otra ruta a seguir es la capacitación en los temas de expertos de REDESClim de funcionarios públicos, estudiantes y público en general, para incidir en el cambio de paradigma que requiere adaptarse al cambio climático y construir asentamientos humanos más seguros.

» Referencias bibliográficas

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres (Armada Electrónica)*. LA RED: Red de Estudios Sociales en Prevención.

Cavazos, T. (2015). *Conviviendo con la Naturaleza El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México* (T. Cavazos, Ed.; Ediciones ILCSA). CENAPRED, INECC, CICESE. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3737.6722

Cavazos, T., & Sánchez-Rodríguez, R. S. (2015). Amenazas naturales, sociedad y desastres . In M. T. Cavazos-Pérez (Ed.), El problema de los Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorlógicos y Climáticos en México (Avani Studio Design, pp. 4–41). *REDESCLIM*.

CENAPRED. (2011). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CENAPRED. (2013). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2013*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CENAPRED. (2021a). *Impacto socioeconómico de los principales desastres*. In Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CENAPRED. (2021b). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2014*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CENAPRED. (2021c). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2015*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CENAPRED. (2021d). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México. Resumen ejecutivo. 2020*. In Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

Frausto-Martínez, O., Luna-Barrera, M., Carreto-Gutiérrez, J. A., Salinas-Vargas, A., De León-López, S. E., Colín-Olivares, O., & Medina-Olivares, M. P. (2021). *Apoyo técnico para el estudio de riesgo a inundaciones, municipio de Atenango del Río, Guerrero*.

Frausto-Martínez, O., Morales-Hernández, J. C., & Aguilar-Becerra, C. D. (2020). *Sistema de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos en México, Ciudad de México*. (G. A. Martínez-Ocampo, Ed.). REDESCLIM.

IMPLAN. (2020). *Atlas de riesgos de Bahía de Banderas, Nayarit. Instituto Municipal de Planeación de Bahía de Banderas, Nayarit*. http://implan.bahiadebanderas.gob.mx/atlas-de-riesgos

INEGI. (2015). Comité Técnico Especializado de los ODS. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://agenda2030.mx/index.html?lang=es#/home

Maskrey, A. (2016). Prólogo. In a. Oliver-Smith, I. Alcántara-Ayala, I. Burton, & A. M. Lavell (Eds.), *Investigación Forense de Desastres Un marco conceptual y guía para la investigación* (Primera Edición, pp. 7–10). UNAM. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14350/sc.02

Morales-Hernandez, J. C., Gonzales-Sosa, E., Welsh-Rodríguez, C. M., & Frausto-Martínez, O. (2021). *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socioecológicos*. (O. Fuentes & F. De Haro, Eds.). Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.

NU. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. *Naciones Unidas*. https://www.undrr.org/es/implementando-el-marco-de-sendai/que-es-el-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de

NU. (2016). Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción del riesgo de desastres. https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportspanish.pdf

NU. (2019). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, 2019. *Naciones Unidas*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf

NU. (2022). Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Naciones Unidas*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/

Oliver-Smith, A., Alcántara-Ayala, I., Burton, I., & Lavell, A. (2016). *Investigación Forense de Desastres Un marco conceptual y guía para la investigación*. https://doi.org/10.14350/sc.02

REDESCLIM. (2018). *Desastres asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos* (G. A. Martínez-Ocampo, Ed.; IMTA). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

REDESCLIM. (2020). Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos. https://www.redesclim.org.mx/

Rodríguez-Esteves, J. M., Welsh-Rodríguez, C. M., Romo-Aguilar, M. L., & Travieso-Bello, A. C. (2018). *Riesgo de desastres en México: eventos hidrometeorológicos y climáticos* (G. A. Martínez-Ocampo, Ed.; REDESCLIM). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Secretaría de Gobernación. (2017). Decreto por el que se crea el Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial de la Federación* (DOF): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5480759&fecha=26/04/2017#gsc.tab=0

SNPC, & CENAPRED. (2006). *Características E Impacto Socioeconómico De Los Principales Desastres Ocurridos En La República Mexicana En El Año 2005* (R. Marín-Cambranis & V. Ramos-Radilla, Eds.; Vol. 7). Impacto Socioeconómico de los Desastres en México.

SSPC. (2020). Programa Sectorial de Seguridad y Protección Ciudadana 2020-2024. México. DOF. *Diario Oficial de la Federación* (DOF): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596027&fecha=02/07/2020

WMO. (2022). State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2021, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization. https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-latin-america-and-caribbean

3.2 Riesgo por eventos de tornados múltiples en el centro de México

Daniela Monterde
División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., México

Luis F. Pineda-Martínez
Unidad Académica de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Zacatecas, México

J. Francisco León-Cruz
Unidad Académica de Estudios Territoriales Yucatán, UNAM.

Noel Carbajal
División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., México

Palabras Clave: Tornados Múltiples, Centro de México, Análisis de riesgo.
ODS 2023: 13 Acción por el Clima.

Introducción

Los tornados representan uno de los fenómenos meteorológicos más extremos en todo el mundo. A pesar de su corto tiempo de vida y su escaso alcance horizontal, los tornados tienen gran potencial de destrucción (Houze, 2014). Estos son definidos como columnas de viento rotando desde superficie hasta la base de una nube cumulunimbus (AMS, 2020). De acuerdo con su escala de medición más común, la escala Fujita mejorada, se ordenan por categorías, tomando en cuenta la velocidad de los vientos y los daños ocasionados (Doswell *et al*., 2009). Su difícil predicción, así como la falta de equipo especializado para su medición a lo largo de toda la república mexicana, hacen que el riesgo asociado a este tipo de fenómeno natural sea aún subestimado.

De acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (EE. UU.), país líder en reportes de tornados con un promedio de más de 1000 tornados anuales, las condiciones meteorológicas de las planicies del centro y sureste son altamente favorables para la tornadogénesis (Bluestein, 2013; Guo *et al*., 2016). Aunque en México estos fenómenos no son tan frecuentes, en comparación con EE. UU., el número de eventos ha aumentado en los últimos años, con un promedio de 44 tornados anuales para el periodo 2015-2020 y un máximo anual registrado de alrededor de 58 en 2017 (León-Cruz & Castillo-Aja, 2022). Como en otros estudios (Carbajal *et al*., 2019; Taszarek *et al*., 2017), se sugiere el progreso de las telecomunicaciones y el alcance de éstas como el principal responsable de dicho aumento.

Los tornados en México poseen diferentes nomenclaturas, provenientes de distintas comunidades, que hacen aún más complicado el correcto registro de estos eventos. Algunos estudios han destacado la distribución espacial de los tipos de tornados en México (León-Cruz & Castillo-Aja, 2022; Medrano & Avendaño García, 2015). Los tornados del tipo supercelda tienden a originarse principalmente al norte del país, debido a condiciones meteorológicas similares a las que controlan la tornadogénesis en el sur de los EE. UU. Por otra parte, los tornados de tipo no-supercelda son los que regularmente se forman en el resto de la república mexicana, especialmente a lo largo de una zona conocida como la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). A pesar de ser fenómenos naturales recurrentes, el comienzo de su estudio en México es reciente. Esto implica desde el desconocimiento de áreas vulnerables y propensas para su formación hasta la difusión errónea de información.

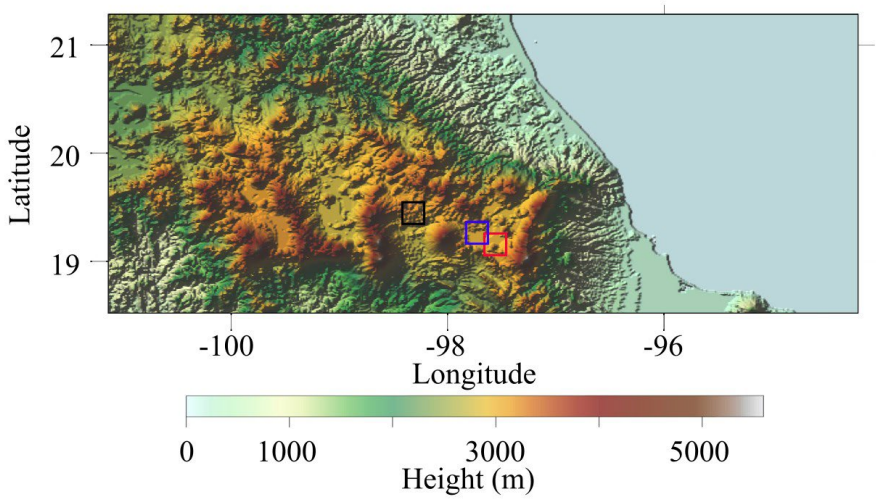
En la formación de tornados, existen ocasiones en donde masas de aire con diferentes propiedades físicas convergen, provocando suficiente inestabilidad para generar tormentas severas. Dentro de esta colisión de masas, por cizalladura del viento y convergencia, se pueden generar regiones de alta vorticidad, dando paso a la inestabilidad por cizalladura o de Kelvin-Helmholtz (Markowski & Richardson, 2010). Este tipo de inestabilidad crea pequeños vórtices o misociclones espaciados a lo largo de la línea cortante del viento, entre los límites de ambas masas de aire. Dado el ambiente altamente inestable que ocasiona nubes de tormenta y la vorticidad generada en superficie, se pueden generar más de un tornado simultáneamente, este tipo de eventos se conocen como tornados múltiples (TM) o familias de tornados (Lee & Wilhelmson, 1997; Rodríguez *et al*., 2021).

Los TM han sido reportados en países como Estados Unidos e Italia (Markowski & Richardson, 2010), así como en México (UNAM, 2022). Uno de los casos más extraordinarios registrado en México fue el ocurrido el 1 de mayo de 2020 en las cercanías de San Nicolás Buenos Aires, Puebla (SNBAP), en donde un total de cinco vórtices simultáneos permanecieron activos por alrededor de 10 minutos en las inmediaciones de una zona poblada. Un caso más de TM ocurrió tan sólo 10 días antes y a 25 km de distancia de SNBAP, entre Huamantla, Tlaxcala y San José Chiapa, Puebla (SJCP), donde tres vórtices generados simultáneamente dejaron un desafortunado saldo de una persona fallecida y diversos daños materiales. Entre otros sucesos se encuentran la pareja de tornados simultáneos en Hueyotlipan, Tlaxcala (HUETLA) en el 2019; y uno más del 2012, en Ciudad de México (CDMX) sobre el Zócalo, arrasando con instalaciones de una manifestación política. Los eventos de tornados múltiples SNBAP, SJCP y HUETLA servirán como casos de estudio para este trabajo.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es divulgar eventos de TM ocurridos en México, y analizar las condiciones meteorológicas bajo las cuales se desarrollan por medio de simulaciones numéricas, así como su impacto y el potencial de amenaza en zonas urbanas y rurales del país.

Área de estudio

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) representa la zona con mayor incidencia de tornados en México (León-Cruz *et al*., 2019). La FVTM recorre el país desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México. En los últimos años la porción centro-este de la FVTM ha sido escenario de diferentes casos de TM, especialmente, los estados de Puebla, Tlaxcala, Estado De México y la CDMX. Esta área en particular alberga gran parte de los volcanes y montañas más importantes de México, entre ellos el nevado de Toluca, volcán Popocatépetl, volcán Iztaccíhuatl, volcán La Malinche, y el pico de Orizaba. En la Figura 1 se presenta un mapa de los casos de TM analizados en este estudio y su ubicación dentro de la FVTM.



► **Figura 1.** Topografía de la zona de estudio. Los recuadros negro, azul y rojo indican la ubicación aproximada de los TM en HUETLA, SJCP y SNBAP, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Simulaciones numéricas

A fin de obtener un mayor conocimiento de la amenaza natural, que puede traducirse en la generación de entendimiento sobre las condiciones meteorológicas presentes en la formación de los casos de tornados, se realizaron simulaciones numéricas de los eventos de TM de SNBAP, SJCP y HUETLA con la versión 4.0.1 del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock *et al.*, 2021).

Se diseñó un dominio madre a resolución de 4 km y con salidas cada 30 minutos (D01). Dentro de éste, un dominio anidado con una resolución espacial de 1 km, escribiendo resultados cada 30 minutos (D02). Para este análisis se trabajó con el dominio anidado. El modelo fue inicializado con datos del Análisis Global Operacional Final (FNL, por sus siglas en inglés) del NCEP (ds083.3) (National Centers for Environmental Prediction National Weather Service NOAA U.S. Department of Commerce, 2015), con una resolución espacial de 0.25° × 0.25°, y alimentado con datos cada 6 horas.

Las simulaciones con el modelo WRF cubrieron un periodo de 72 horas, considerando un día antes y un día después de cada evento de tornado. Las configuraciones físicas del modelo incluyeron la parametrización Thompson graupel (Thompson *et al.*, 2008) para la microfísica, el esquema Yonsei University (Hong *et al.*, 2006) para la capa limite planetaria, el esquema Kain-Fristch new eta (Kain, 2004) para la parametrización de cúmulus y los esquemas RRTM (Mlawer *et al.*, 1997) para radiación de onda corta y Dudhia (Dudhia, 1989) para radiación de onda larga. Para cada caso de tornado múltiple, se usaron los datos de salida de la temperatura, humedad específica (para convergencia de humedad) y vectores de viento.

Componentes sociales

A fin mostrar un panorama más amplio sobre las repercusiones de las amenazas naturales, particularmente de los TM en el centro del país, se analizaron las componentes sociales de vulnerabilidad y exposición. El primer componente se entiende como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente por algún fenómeno natural (Lavell *et al.*, 2012); mientras que la segunda se refiere al inventario de elementos, población y recursos económicos en un área determinada donde eventos peligrosos pueden ocurrir (Cardona *et al.*, 2012). Las componentes sociales que interfieren en la generación de escenarios de riesgo son multidimensionales, incluyen procesos acumulativos y suelen ser significativamente dinámicos.

En este sentido, y con el objetivo de explorar la vulnerabilidad de la región de estudio ante TM, se emplearon los resultados de un índice de vulnerabilidad ante tornados en México (León-Cruz & Castillo-Aja, 2022). Dicho índice, computado en función del último censo nacional de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del 2020, expone, a nivel nacional y empleando a los municipios como unidad de análisis, la distribución espacial de las características sociales que inciden en la vulnerabilidad ante tornados en el país. Por otro lado, la exposición se calculó con base en la densidad poblacional a nivel municipal (INEGI, 2021) y empleando un sistema de clasificación basado en quintiles.

El índice de vulnerabilidad utilizado contempló un total de 12 indicadores seleccionados con base en investigaciones previas (p. ej., Cutter *et al.* (2003); Siagian *et al.* (2014); Frigerio *et al.* (2016)) y que son ampliamente aceptados como factores que influyen en la vulnerabilidad social ante amenazas naturales. Dichos indicadores fueron normalizados (de 0 a 1) y se les aplicó un análisis factorial basado en componentes principales, de donde se extrajeron un total de 5 factores: a) características estructurales, b) educación, c) Edad y movilidad, d) Género, y e) servicios médicos. La varianza explicada por cada uno de los factores fue empleada para generar un índice de vulnerabilidad ponderado.

$$VT= FnVnVt$$

Donde IVT es el índice de vulnerabilidad ante tornados a nivel municipal, Fn indica el factor, Vn la varianza explicada por dicho factor y Vt la varianza total explicada por los cinco factores. Para más información sobre dicho índice, se sugiere consultar León-Cruz & Castillo-Aja (2022).

Resultados y Discusión

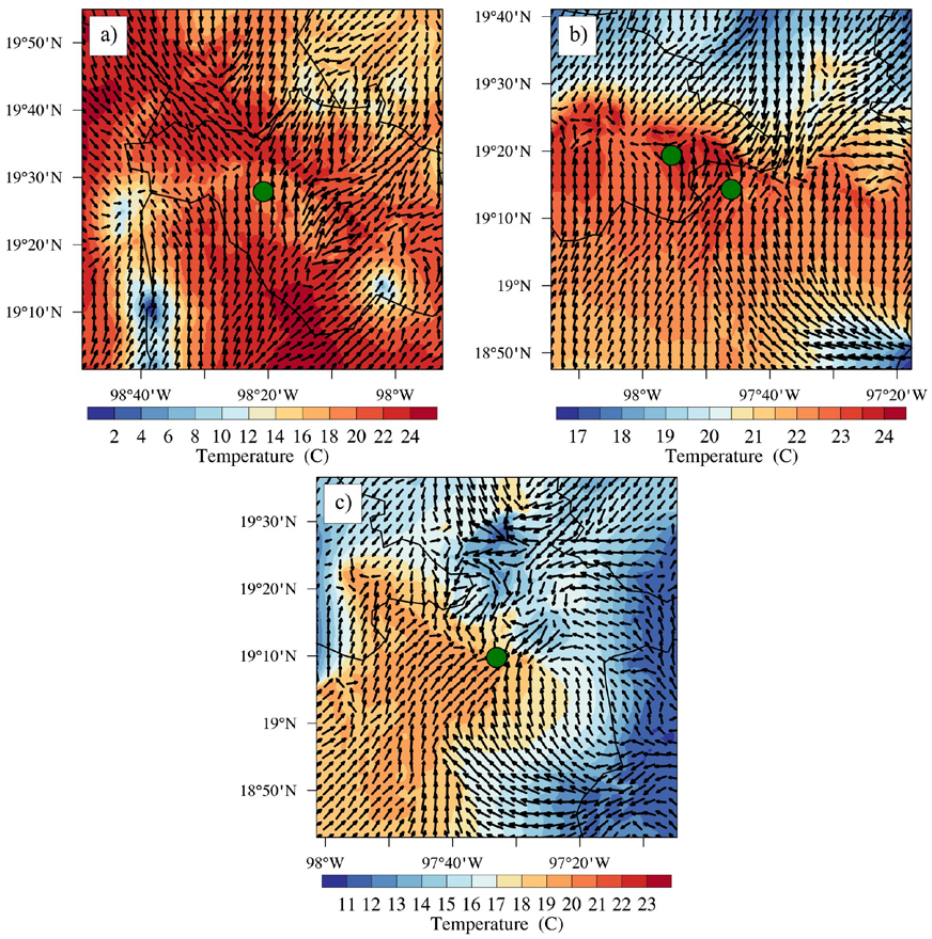
Modelación Numérica

En la Figura 2 se muestra la distribución horizontal de la temperatura (°C) y de vectores de viento de los casos simulados de tornados. Para todos los casos, se observan el encuentro de dos y hasta tres masas de aire con propiedades distintas en las inmediaciones de los sitios de formación de los TM. En estos sitios, la cizalladura (o cortante del viento) en superficie origina el nacimiento de áreas de vorticidad con un diámetro no mayores a los 4 km, espaciadas de forma regular, conocidas como misociclones (Brady & Szoke, 1989; Fujita, 1981). Esta concentración de vorticidad es parte fundamental de la tornadogénesis no-supercelda. Por otro lado, resalta el alto gradiente de temperatura entre las distintas masas de aire, ocasionando intensos contrastes térmicos que, a su vez, permiten regiones potenciales de vorticidad.

De los reportes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019, 2020a) se expone la presencia de vaguadas para los casos de Tlaxcala y SJCP que afectaron primordialmente el centro del país. Para los tornados de SJCP, el reporte mostraba la presencia de un anticiclón de niveles medios extendiéndose desde el Caribe hasta el Golfo de México. Este anticiclón contribuyó al flujo de humedad hacia la región centro-este del país, facilitando la generación de tormentas y una posterior tornadogénesis. Dicha situación meteorológica fue afectada también por la orografía, causando el desarrollo de nubes de tormenta por convección forzada por el terreno. Trabajos previos han estudiado la influencia de los frentes de tormenta dentro de la generación de TM, donde intervienen diferentes tipos de inestabilidad, entre ellos la inestabilidad de cizalladura, como las fuentes que propician la convección profunda (Forbes & Bluestein, 2001; Lee & Wilhelmson, 1997). El evento de SNBAP ha sido, hasta ahora, el caso de TM más intenso al desencadenar cinco tornados

simultáneos. Para este caso, el aviso meteorológico del SMN indicaba un sistema frontal en el centro del país (SMN, 2020b). La zona del evento estaba dominada por el avance de un frente frío y una vaguada prefrontal generando inestabilidad baroclínica y, posteriormente, un frente de tormenta, que fue intensificado por los flujos locales modulados por la orografía. Estas condiciones pudieron causar la fuerte inestabilidad que precedió a la tornadogénesis múltiple.

El contenido de humedad de las masas de aire juega un papel fundamental en la formación de tormentas a lo largo de zonas de inestabilidad. Es esta humedad la que asciende sobre el nivel de convección y puede generar, bajo determinadas circunstancias, el crecimiento de nubes convectivas profundas. En este sentido, además de la temperatura y los campos de viento, también se analizó la convergencia de humedad (MFC, por sus siglas en inglés). Esta variable involucra tanto la variable de advección de humedad específica, como el producto de la convergencia de masas y la humedad específica (Banacos & Schultz, 2005). La MFC se puede entender como el aumento de humedad en una zona determinada (Bhushan & Barros, 2007).

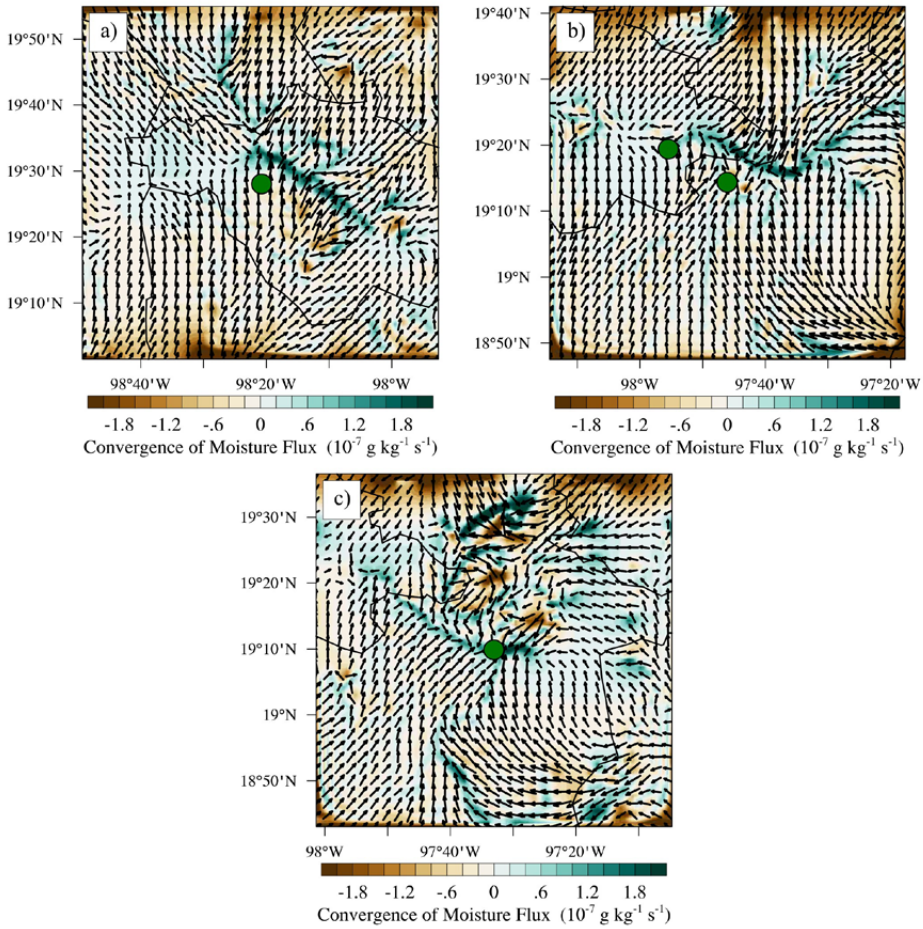


► **Figura 2.** Temperatura superficial (°C) con vectores de viento para los casos a) HUETLAX, b) SJCP y c) SNBAP. Los círculos indican los sitios en donde ocurrieron los TM. Las líneas negras indican la división estatal.

Fuente: Elaboración propia con salidas del modelo WRF-ARW.

En la Figura 3 se muestra MFC, en superficie, para cada uno de los casos de TM. En cada uno de los eventos de tornados se distinguen franjas de MFC bien establecidas en los sitios donde los vientos convergen, lo cual es congruente con la localización de las líneas sobre las cuales se formaron los vórtices. Este resultado está relacionado con los valores más altos de MFC en las tres situaciones de tornado, indicando la existencia de un considerable contenido de humedad. Algunos estudios que evalúan la tornadogénesis simple y múltiple (como Markowski & Richardson, 2010; Ulanski &

Garstang, 1978) describen la presencia de vorticidad en superficie, que se consigue por medio de los procesos de convergencia que, a su vez, generan corrientes ascendentes, por continuidad de masa (Doswell, 2001). En este sentido, los vórtices superficiales se originan en ambientes con fuertes contrastes térmicos (Figura 2) y con un incremento del contenido de humedad (Figura 3).



► **Figura 3.** Convergencia de humedad (g kg^{-1} s^{-1}) con vectores de viento para los casos a) HUETLA, b) SJCP y c) SNBAP. Los círculos indican los sitios en donde ocurrieron los TM. Las líneas negras indican la división estatal.

Fuente: Elaboración propia con salidas del modelo WRF-ARW.

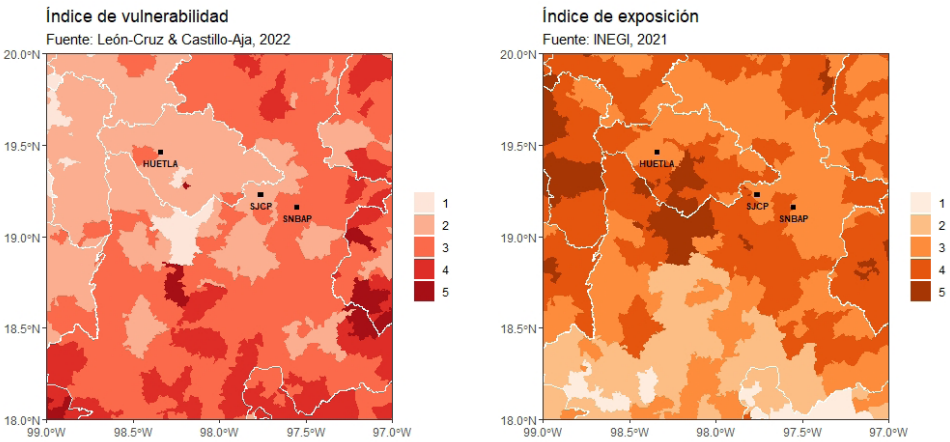
Vulnerabilidad y exposición

Como se mencionó anteriormente, el riesgo asociado a TM depende, en un primer momento, de la amenaza natural. En este sentido, la generación de conocimiento sobre los entornos meteorológicos, bajo los que se han observado este tipo de fenómenos, son de vital importancia para la determinación de escenarios potenciales. No obstante, además del análisis del fenómeno natural, deben considerarse otros elementos de carácter social. Dos de estos elementos primordiales son la vulnerabilidad y la exposición. Por consiguiente, y empleando un índice de vulnerabilidad ante tornados (León-Cruz & Castillo-Aja, 2022), así como un cálculo propio de la densidad poblacional, se muestran estos dos componentes del riesgo en la Figura 4.

Para el caso de la vulnerabilidad, se puede observar cómo sobre los municipios afectados por eventos de TM, estos valores indican niveles intermedios (valor de 3) y bajos (valor de 2). Estos niveles de vulnerabilidad están asociados con condiciones intermedias de pobreza y marginación, así como de acceso a servicios médicos y características de la población como la edad y el género (León-Cruz & Castillo-Aja, 2022). Es interesante notar que, independientemente que los tornados registrados no se localicen sobre regiones muy vulnerables (valores 4 y 5), una buena parte del do-

minio de análisis sí cuenta con este tipo de valores, principalmente hacia la porción sur de Puebla y en los límites con el estado de Veracruz. Muchos de estos municipios están integrados por comunidades rurales, lo que está relacionado con los elementos determinantes de la vulnerabilidad antes mencionados. Teniendo en cuenta que un fenómeno natural, ya sean TM o cualquier otro, no respeta límites municipales, la presencia de estos fenómenos representa un riesgo latente para la población de la zona, tanto por su desplazamiento aleatorio en la superficie como por las limitantes que existen al momento de establecer regiones potenciales de formación.

El caso de la exposición es otro factor determinante en el nivel de riesgo asociado a la formación de TM. Mientras mayor cantidad de bienes y población existan, mayor probabilidad habrá de que éstas puedan sufrir algún daño. En este sentido, y como se puede observar en la Figura 4, los eventos registrados se localizan sobre regiones catalogadas con exposición media y alta (valores 3 y 4), y en los límites de zonas con niveles de exposición muy altos (valor de 5). Es claro que esto se debe a la localización geográfica (centro del país) y la extensión de los territorios (municipios pequeños), que propicia la acumulación de la población en diversos núcleos (p. eje., cabeceras municipales y regiones industriales en desarrollo). Teniendo en cuenta que los TM registrados se han documentado en este tipo de zonas, la exposición potencial que existe ante estos es significativamente alta, lo que a su vez incrementa el nivel de riesgo. Esto se puede corroborar con los impactos sociales que causó particularmente uno de los eventos analizados (caso de SJCP).



► **Figura 4.** Convergencia de humedad (g kg^{-1} s^{-1}) con vectores de viento para los casos a) HUETLA, b) SJCP y c) SNBAP. Los círculos indican los sitios en donde ocurrieron los TM. Las líneas negras indican la división estatal.

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2021).

Conclusiones

La formación de TM en México es un fenómeno común, principalmente en la región centro del país, justo en la zona de la FVTM. Aunque estos fenómenos son poco documentados, podría existir una posible relación entre la densidad poblacional de esa región con el número de casos reportados. Desde el punto de vista meteorológico se mostró que existen las condiciones dinámicas en la atmósfera que, combinada con los forzantes topográficos, causan una convergencia de masas de aire con un alto potencial para la formación de tormentas severas, tornados y, en algunos casos, eventos de TM.

Por otro lado, los indicadores sociales muestran que el potencial impacto de tormentas severas, y en este caso eventos de TM, pueden afectar áreas urbanas, rurales y zonas agrícolas de mayor vulnerabilidad, debido a índices altos de exposición. En síntesis, este tipo de análisis se puede convertir en una herramienta muy útil para los sistemas de protección civil a nivel local y municipal, para realizar planes de prevención y una adecuada gestión del riesgo a eventos de tormentas severas y TM.

» Referencias bibliográficas

AMS. (2020). Tornado. Https://Glossary.Ametsoc.Org/Wiki/Tornado. https://mpmequipos.mx/producto/ams-tornado-200-tope/

Banacos, P. C., & Schultz, D. M. (2005). The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. *Weather and Forecasting*, 20(3), 351–366. https://doi.org/10.1175/WAF858.1

Bhushan, S., & Barros, A. P. (2007). A Numerical Study to Investigate the Relationship between Moisture Convergence Patterns and Orography in Central Mexico*. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6), 1264–1284. https://doi.org/10.1175/2007JHM791.1

Bluestein, H. B. (2013). *Severe Convective Storms and Tornadoes*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05381-8

Brady, R. H., & Szoke, E. J. (1989). A Case Study of Nonmesocyclone Tornado Development in Northeast Colorado: Similarities to Waterspout Formation. *Monthly Weather Review*, 117(4), 843–856. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0843:ACSONT>2.0.CO;2

Carbajal, N., León-Cruz, J. F., Pineda-Martínez, L. F., Tuxpan-Vargas, J., & Gaviño-Rodríguez, J. H. (2019). Occurrence of Anticyclonic Tornadoes in a Topographically Complex Region of Mexico. *Advances in Meteorology*, 2019, 1–11. https://doi.org/10.1155/2019/2763153

Cardona, O., Aalst, M., Birkmann, J., Fordham, M., Mcgregor, G., Perez, R., Pulwarty, R., Schipper, L., & Bach, S. (2012). *Determinants of risk: exposure and vulnerability*.

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards *. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002

Doswell, C. A. (2001). Severe Convective Storms—An Overview. *Meteorological Monographs*, 50, 1–26. https://doi.org/10.1175/0065-9401-28.50.1

Dudhia, J. (1989). Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077–3107. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

Forbes, G. S., & Bluestein, H. B. (2001). Tornadoes, Tornadic Thunderstorms, and Photogrammetry: A Review of the Contributions by T. T. Fujita. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(1), 73–96. https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0073:TTTAPA>2.3.CO;2

Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De Amicis, M., Mugnano, S., & Boffi, M. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography*, 74, 12–22. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.06.014

Fujita, T. T. (1981). Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(8), 1511–1534. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1511:TADITC>2.0.CO;2

Guo, L., Wang, K., & Bluestein, H. B. (2016). Variability of tornado occurrence over the continental United States since 1950. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(12), 6943–6953. https://doi.org/10.1002/2015JD024465

Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341. https://doi.org/10.1175/MWR3199.1

Houze, J. R. A. (2014). Cloud Dynamics (Elsevier, Ed.; 2nda Edition, Vol. 104). ScienceDirect.

Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170–181. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2

Lee, B. D., & Wilhelmson, R. B. (1997). The Numerical Simulation of Nonsupercell Tornadogenesis. Part II: Evolution of a Family of Tornadoes along a Weak Outflow Boundary. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(19), 2387–2415. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2387:TNSONT>2.0.CO;2

León-Cruz, J. F., & Castillo-Aja, R. (2022). A GIS-based approach for tornado risk assessment in Mexico. *Natural Hazards*, 114(2), 1563–1583. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05438-0

Markowski, P., & Richardson, Y. (2010). *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470682104

Medrano, M. M., & Avendaño García, A. (2015). Climatología de tornados en México. *Investigaciones Geográficas*, 0(83). https://doi.org/10.14350/rig.35726

Rodríguez, O., Bech, J., Arús, J., Castán, S., Figuerola, F., & Rigo, T. (2021). An overview of tornado and waterspout events in Catalonia (2000–2019). *Atmospheric Research*, 250, 105415. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105415

Siagian, T. H., Purhadi, P., Suhartono, S., & Ritonga, H. (2014). Social vulnerability to natural hazards in Indonesia: driving factors and policy implications. *Natural Hazards*, 70(2), 1603–1617. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0888-3

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. D., Duda, M. G., Barker, D., & Huang, X. (2021). *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. NCAR Technical Notes, NCAR/TN-556+STR.* https://doi.org/https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97

SMN. (2019). *Pronóstico Meteorológico General*. Boletín No.272. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias

SMN. (2020a). *Pronóstico Meteorológico General*. Boletín No. 222. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias

SMN. (2020b). *Pronóstico Meteorológico General*. Boletín No. 243. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias

Taszarek, M., Brooks, H. E., & Czernecki, B. (2017). Sounding-Derived Parameters Associated with Convective Hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145(4), 1511–1528. https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0384.1

Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., & Hall, W. D. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12), 5095–5115. https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1

Ulanski, S. L., & Garstang, M. (1978). The Role of Surface Divergence and Vorticity in the Life Cycle of Convective Rainfall. Part I: Observation and Analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(6), 1047–1062. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<1047:TROSDA>2.0.CO;2

UNAM. (2022). Tornados en México, más comunes de lo que se piensa. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022_478.html

3.3 Aeroalérgenos y calor extremo que impactan la salud humana. Caso de estudio: Hermosillo, Sonora

Luis Brito Castillo
Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste S.C., Unidad Guaymas, km 2.35 Camino al Tular S/N, estero de Bacochibampo, Guaymas, Sonora, México

Carmen Isela Ortega Rosas
Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica Hermosillo, Carrera de Lic. En Ecología, Ley Federal del Trabajo SN Col. Apolo, Hermosillo, Sonora, México

Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica Hermosillo, Carrera de Lic. En Ecología, Ley Federal del Trabajo SN Col. Apolo, Hermosillo, Sonora, México

Palabras Clave: Sonora, onda de calor, salud humana, alergias, calentamiento.
ODS: 9, 11 y 13 Industria, Innovación e Infraestructura, Ciudades y Comunidades Sostenibles y Acción por el Clima.

Introducción

La ocurrencia de temperaturas atípicas, en particular las temperaturas máximas, agravan los problemas de salud en la población más vulnerable, en especial de las personas que son sensibles a enfermedades alérgicas, ya que pueden contribuir al aumento en el número de defuciones por enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Secretaría de Salud, 2020): "El calor modifica el comportamiento humano, la transmisión de enfermedades, la calidad del aire y las infraestructuras sociales esenciales como la energía, el transporte y el agua" (Secretaría de Salud, 2020). Por tal motivo, el calor puede influir negativamente en la economía familiar al traducirse en un alto consumo energético (uso de aires acondicionados y ventiladores) y en el abastecimiento de agua, en particular, si la región padece condiciones de sequía (SMN & CONAGUA, 2022). Una persona, expuesta al calor excesivo durante un tiempo prolongado, puede experimentar confusión, cansancio, debilidad, mareo y dolor de cabeza debido a un trastorno corporal conocido como hipertermia, en el que los mecanismos que regulan la temperatura corporal no funcionan correctamente (NIH, 2022). Si la temperatura corporal iguala o supera los 40°C, la persona experimenta confusión, náuseas o vómitos y respiración acelerada con consecuencias fatales. Según un estudio realizado por la Secretaría de Salud (2020), en los últimos años se ha observado en México un incremento de los casos de deshidratación, golpe de calor y quemaduras solares, así como de las defunciones por estas causas. No es de extrañar que el incremento de las temperaturas tenga relación con el calentamiento que se observa en muchas regiones del mundo (IPCC, 2021).

Otros efectos, directa e indirectamente relacionados con el calor, son los deshielos repentinos que pueden producir inundaciones, así como el incremento de incendios forestales cuando las condiciones son muy secas y las plantas se encuentran en un estado de deshidratación que favorece la combustión de la materia seca (Shaposhnikov *et al*., 2014) que, al estar expuesta al fuego, incrementa la emisión de partículas contaminantes en el aire, perjudiciales al ser humano.

Un aspecto, igualmente importante en cuestiones de salud, es que temperaturas más cálidas pueden adelantar el crecimiento de las plantas y el inicio de la floración, lo que provoca que la temporada de polen comience antes y tenga una mayor duración (Prevéy, 2020; Schramm *et al*., 2021). El incremento de polen en la atmósfera coincide con el incremento de enfermedades alérgicas (Lancia *et al*., 2021; Ortega-Rosas *et al*., 2020a, 2022) que puede llegar a ser un problema de salud en la población.

Hermosillo, Sonora, normales climatológicas y condiciones generales

En la zona urbana de Hermosillo, capital del estado de Sonora, México, se registra una precipitación normal anual de 364.6 mm, con menos de cuarenta días de lluvia en el año (SMN, 2022) y registrar temperaturas ≥ 40°C a la sombra durante la temporada cálida (de mayo a octubre) que puede afectar la salud de sus pobladores (El Imparcial, 2022). Según las observaciones registradas en la estación meteorológica convencional Hermosillo II (DGE, 29°05'56" N; 110°57'15" W; elevación 221 msnm) del Servicio Meteorológico Nacional, el mayor valor anual de la normal climatológica de temperatura máxima (39.6°C), en la ciudad de Hermosillo, se presenta en junio (periodo 1950–2010). En el caso de la máxima temperatura mensual, que es de 41.1°C, ocurre en junio y julio, mientras que la temperatura máxima diaria registrada (47.5°C) tuvo lugar el 23 de junio de 1998.

Como se verá más adelante, en la actualidad esta marca ha sido superada y podría ser un tema de interés para protección civil de Hermosillo. Debido a estas condiciones, el municipio de Hermosillo, Sonora, se encuentra entre los diez municipios de México con mayor índice de riesgo por ondas de calor y es el segundo, en orden de ocurrencia, con más muertes registradas por exposición al calor natural excesivo (SNPC & CENAPRED, 2018). Según reportes de la Comisión Nacional del Agua, en la ciudad de Hermosillo, se han registrado temperaturas superiores a 48°C (*El imparcial*, 2022), situándola como una de las ciudades más cálidas del planeta. Estas dos condiciones, altas temperaturas y bajas precipitaciones, agravan la situación actual de la baja disponibilidad hídrica en la ciudad, que representa un desafío para el personal responsable de la prestación de servicios, planificación y respuesta a emergencias (Pablos *et al*., 2012).

Las ondas de calor

Existen diferentes definiciones de onda de calor en función de la intensidad de temperatura, umbral y duración (Sharma, *et al*., 2022). Algunos consideran umbrales absolutos y relativos de temperatura (Robinson, 2001), en combinación con la duración del evento y tomando en cuenta las temperaturas mínimas (Herrera, 2012). Por ejemplo, Smoyer-Tomic *et al*. (2003) toman en cuenta un valor fijo o absoluto de temperatura máxima de 32°C para Canadá. Si este valor es igualado o superado en, al menos, tres días consecutivos, se establece que ocurre una onda de calor. Recordemos que Canadá se localiza por encima de los 45° de latitud norte, por lo que temperaturas superiores a 32°C ya se consideran atípicas para los pobladores.

Los incrementos de temperatura en las últimas décadas, debido al calentamiento global, ha propiciado ondas de calor 'catastróficas' en Canadá y el oeste de Estados Unidos. Por ejemplo, la onda de calor reportada a finales de junio y principios de julio de 2021 (White *et al*., 2022) indica que la temperatura más alta registrada alcanzó los

49.6°C, con consecuencias fatales. Según las estimaciones, 900 muertes fueron atribuidas a la onda de calor a lo largo tanto de British Columbia, Canadá, como en Washigton y Oregon, Estados Unidos. Hubo otras afectaciones como inundaciones debido al rápido deshielo de los glaciares, incremento rápido de incendios forestales y mortandad masiva de peces, por citar algunos.

Otro criterio para definir una onda de calor lo encontramos en la National Weather Service (NWS, por sus siglas en inglés) (Robinson, 2001), que propone un umbral de temperatura máxima de 40.6°C y otro de temperatura mínima de 26.7°C. Los cuales, si se igualan o se superan durante dos días consecutivos, se considera como una onda de calor. Para la ciudad de México, Jáuregui (2009) empleó un umbral igual o mayor a 30°C durante tres días consecutivos y una temperatura mínima promedio de 25°C. Como se nota, los valores umbrales para definir una onda de calor varían geográficamente, por lo que no existe una definición única de umbrales.

Así, por ejemplo, para los países del sudeste de Asia, Sharma *et al.* (2022) reportan diferentes criterios utilizados para definir una onda de calor, donde además de la duración, el umbral se establece a partir de los percentiles 90, 95 y 99 de la distribución de temperaturas máximas diarias. Resalta el hecho de que, según estos autores, la temperatura media anual en los países analizados muestra una tendencia significativa hacia el incremento, lo cual es consistente con el calentamiento global reportado en otras partes del mundo (IPCC, 2021) y sugiere un aumento en la ocurrencia de ondas de calor.

La situación actual se ha vuelto alarmante, principalmente en países europeos, donde el calor en 2022 causó afectaciones de diversos tipos en la población. Debido a esto, como medida de mitigación y prevención la ciudad de Sevilla, España, impulsó un programa piloto para otorgar nombres a las ondas de calor mortales (Harvey, 2022a, b). La combinación de ondas de calor con la ocurrencia de sequías puede causar sinergia y una amplificación de impactos, por ejemplo, en la producción de granos. La co-existencia de ambos fenómenos es posible, ya que su origen generalmente responde a anomalías similares en la circulación atmosférica (Feng, *et al.*, 2021). He *et al.* (2022) afirman que, entre 1981 y 2021, en más del 92% de las áreas productoras de trigo, ocurrió al menos un evento combinado de sequía y onda de calor, los cuales han mostrado una expansión rápida a nivel global durante la estación de crecimiento del trigo.

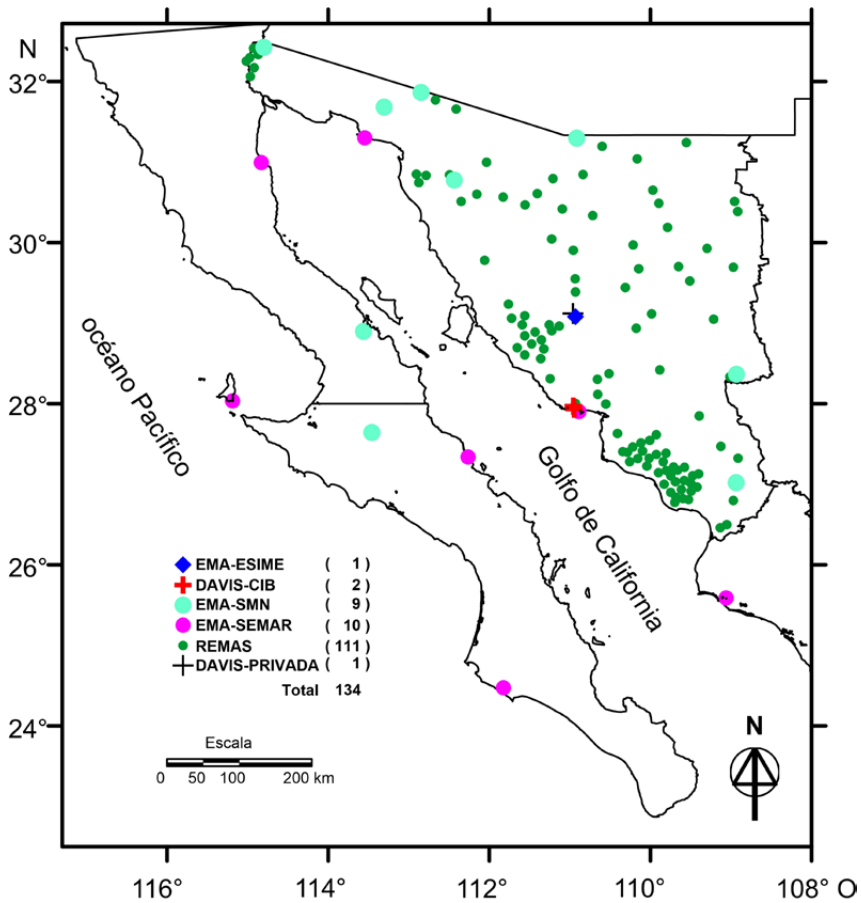
En el caso de los efectos de las ondas de calor en la salud humana, los estudios son limitados (Sharma *et al.*, 2022), pero se conocen muy bien los síntomas que produce la hipertermia sobre el cuerpo humano (Secretaría de Salud, 2020; NIH, 2022) como golpes de calor (*El Imparcial*, 2022). Otro efecto de la ocurrencia de ondas de calor sobre la salud humana, aparentemente no relacionado, parece ser el incremento de enfermedades alérgicas debido a que temperaturas más cálidas pueden adelantar el crecimiento de las plantas y el inicio de la floración, lo que lleva a una temporada de polen que comienza más temprano y tiene una mayor duración.

Para estudiar esta asociación nuestro objetivo en este trabajo es correlacionar los incrementos de temperaturas atípicas (>40°C) con observaciones de las concentraciones de polen y esporas de hongos en el aire de la ciudad de Hermosillo, Sonora, durante el periodo 2015-2019 y contrastar los resultados con los registros de pacientes atendidos por enfermedades alérgicas, a fin de establecer el tipo de relación que existe entre las tres variables. Se le dará particular atención a la onda de calor del 4 de junio de 2016, cuando la temperatura alcanzó 49.4°C a la sombra a las 15:20 hrs (hora local), superando todos los registros de temperatura de ese año.

Observaciones meteorológicas

Se utilizaron los datos históricos de temperatura del aire de un total de 134 estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) (Figura 1): 20 pertenecen a la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN); dos pertenecen al Centro

de Investigaciones Biológicas del noroeste (CIB); una está ubicada en la zona urbana de Hermosillo (Misión del Sol, 2022) y 111 estaciones pertenecientes a la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS-SIAFESON, 2022). Todas las EMAS cubren el periodo 2015–2019 y la mayoría tiene más de nueve años de registros con intervalos de 10 minutos entre observaciones. Se verificó la consistencia de los datos de temperatura entre estaciones, a fin de identificar posibles errores, como datos negativos en verano o valores dudosos por tratarse de desviaciones extremas en relación con el resto. Si fuera el caso, el dato fue removido en cálculos posteriores.



► **Figura 1.** Posición de 134 estaciones meteorológicas automáticas con registros históricos de diferentes fuentes. En la zona urbana de Hermosillo se ubica la EMA-ESIME y DAVIS-PRIVADA.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN, CIB, Misión del Sol y SIAFESON.

Para los análisis se calcularon las anomalías horarias de temperatura a partir de los datos históricos de cada serie. La anomalía de temperatura se calculó como la diferencia de la temperatura máxima reportada en cada hora menos su correspondiente media histórica. La media histórica de cada serie se estimó identificando primero las temperaturas máximas horarias de cada estación y, posteriormente, promediando, para cada hora correspondiente, todas las temperaturas máximas de todos los años hasta completar el ciclo anual de 8760 promedios horarios (24 * 365). En el cálculo, el día 29 de febrero de los años bisiestos fue descartado, ya que la mayoría de las estaciones cuentan con sólo nueve años de datos. Ésto corresponde a sólo dos observaciones horarias (una cada cuatro años) para el 29 de febrero.

Tomando como referencia los valores de las anomalías extremas de temperatura ocurridas el día 4 de junio de 2016 que, como se verá más adelante, resultaron de una onda de calor muy atípica, se identificaron los días, entre el 1 de mayo y 31 de octubre

de cada año entre 2015 y 2019, en los que, al menos, 40 EMAS de las 134 que tienen datos, registraron anomalías similares o superiores a las del 4 de junio de 2016. Este procedimiento permite asegurar la identificación de otros eventos similares con temperaturas extremas al ocurrido durante la onda de calor y contrastar los resultados con los registros de pacientes con enfermedades alérgicas.

Monitoreo de Polen y esporas de hongos en la atmósfera

Para el análisis del presente estudio se utilizaron observaciones de polen y esporas de hongos realizadas en la ciudad de Hermosillo en el período 2015–2019. El equipo de muestreo está instalado en el techo de las instalaciones de la Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica Hermosillo. Para los registros, se emplearon Trampas de Esporas tipo Hirst (TETH, Burkard Mannufacturing, Co, UK), las cuales basan su funcionamiento en el principio del impacto (Hirst, 1952), succionando 10 litros de aire/min, similar al volumen de inhalación de aire por el pulmón humano. Todo el material particulado que es succionado (principalmente polen y esporas), queda adherido a una cinta Melinex que es retirada al final del período de muestreo de siete días para su análisis en laboratorio, tratando de evitar su contaminación. Las cintas Melinex son montadas en portaobjetos para su observación al microscopio óptico a 40×10 aumentos. La identificación de los tipos polínicos se realiza bajo la supervisión del segundo autor de este trabajo, quien con su experiencia ha adquirido reconocimiento sustentado en diversas publicaciones (Ortega Rosas *et al*., 2020a; Ortega-Rosas *et al*., 2020b, 2022). Además, el trabajo se complementa consultando material de polen de referencia de la región y atlas de polen y esporas de hongos existentes en la literatura, y se determinan sus concentraciones. El método de recuento que se utiliza es el de 4 barridos horizontales continuos y equidistantes a lo largo de toda la preparación incluyendo el borde de la preparación en el caso del primer y último barridos. A lo largo de cada uno de estos barridos, que representa una sub-muestra analizada del 12–13% de superficie total, se va contando el número de granos de polen para cada tipo polínico identificado. La longitud total de la cinta representa un día completo de muestreo por lo que se obtiene información sobre la concentración polínica del aire a lo largo del día. La concentración polínica está expresada como una media diaria en granos de polen por metro cúbico de aire. Los datos de concentración acumulada anual de polen y esporas de hongos son expresados como un índice integral de polen anual (APIn por sus siglas en inglés) e índice integral de esporas anual (ASIn por sus siglas en inglés) (Galán *et al*., 2007; Sofiev & Bergman, 2013). La metodología es estandarizada y se aplica por todos los grupos de trabajo de los diferentes países componentes en la European Aeroallergen Network (EAN), la Red española de Aerobiología (REA) y por la Red Mexicana de Aerobiología (REMA). Los captadores permiten obtener datos homologables entre sitios de muestreo a nivel mundial y pueden funcionar de manera continua los 365 días del año por lo que es posible obtener muestras horarias.

En total se identificaron 17 especies de esporas de hongos y 43 especies de polen. La descripción completa de estas especies se puede consultar en Ortega-Rosas *et al*. (2022). Para poder hacer una comparación entre especies, primero se estandarizaron los registros de cada especie por separado, restando la media histórica diaria en el periodo 2015–2019 a cada registro diario y dividiendo el resultado por la desviación estándar en el mismo periodo. Una vez estandarizadas las series de manera individual, se procedió a estimar el acumulado total de todas las especies para cada día, con el fin de analizar su variabilidad interanual.

Pruebas de sensibilidad alérgica al polen y esporas de hongos

En la Tabla 1 se muestran los datos correspondientes a los casos particulares de pacientes atendidos en Hermosillo, Sonora, relacionados con alergias al polen y esporas durante los años 2015 al 2018. Estos datos fueron proporcionados por el "Hospital General

Zona 2 Hermosillo" del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). Las observaciones se realizan por un especialista que registra los casos de alergias dentro de la ciudad y realiza varias pruebas de sensibilización a polen y esporas de hongos a la población de Hermosillo. La sensibilización alérgica al polen y las esporas, generalmente, se documenta estimulando las concentraciones de inmunoglobulina E (IgE) específica, ya sea con pruebas cutáneas o con la cuantificación de IgE sérica específica. Los datos corresponden a las pruebas diarias realizadas (cuando ocurrían casos de consulta) a pacientes con sensibilidad alérgica positiva a cada tipo de polen y esporas de hongos. Es decir, los días que se presentan datos son los días en los que los pacientes solicitaron consulta con un especialista en el área de Alergología de dicha clínica del IMSS.

Tabla 1. Registros de pacientes atendidos en el "Hospital General Zona 2 Hermosillo" del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) relacionados con resultados positivos de alergias al polen y esporas entre 2015 y 2018.

Fecha	Polen	Esporas	Total
2015			
5/mayo	11	2	13
15/julio	2	2	2
16/julio	21	1	22
29/septiembre	10	0	10
29/octubre	2	0	2
9/noviembre	5	0	5
10/diciembre	3	0	3
2016			
25/abril	8	1	9
28/abril	6	1	7
17/mayo	10	0	10
14/junio	2	0	2
1/agosto	13	2	15
10/octubre	8	0	8
14/octubre	6	0	6
11/noviembre	14	0	14
22/noviembre	14	2	16
23/noviembre	5	0	5
14/diciembre	12	6	18
22/diciembre	6	0	6
27/diciembre	13	1	14

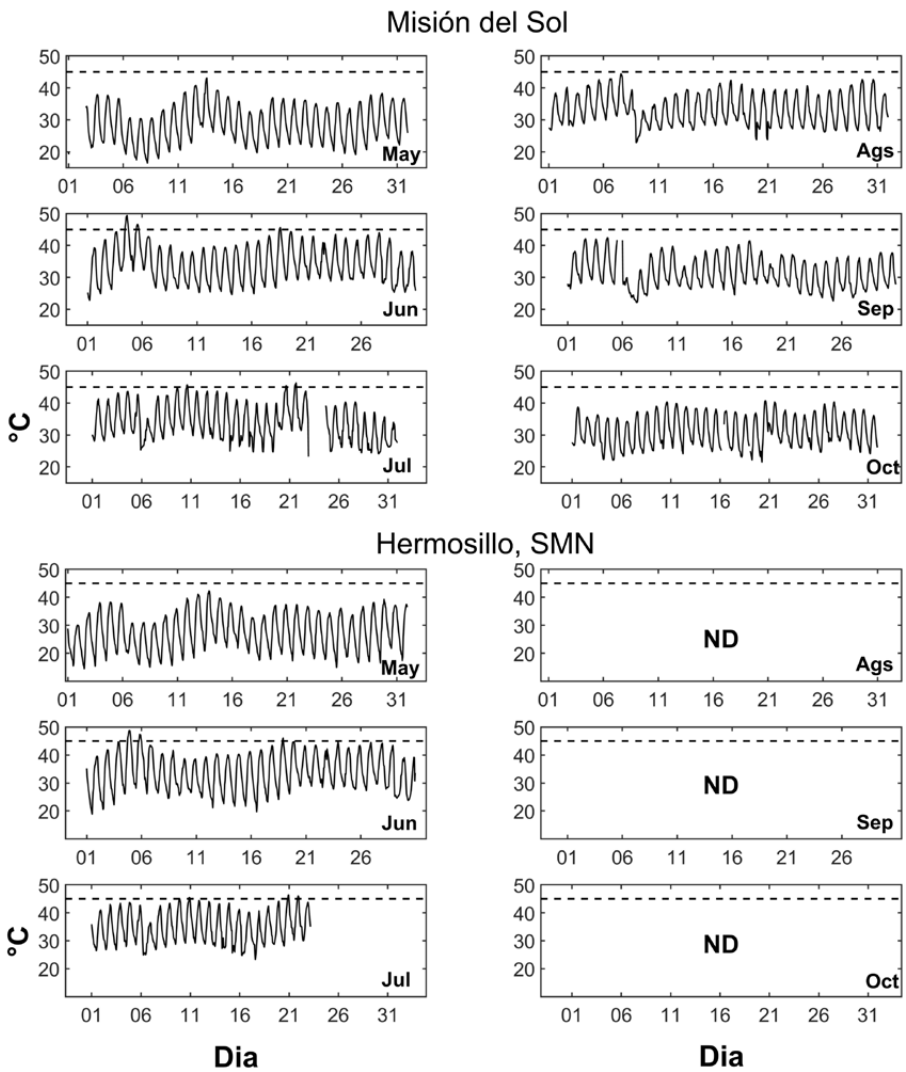
Fecha	Polen	Esporas	Total
2017			
8/junio	2	0	2
20/junio	2	0	2
15/agosto	6	0	6
21/septiembre	3	0	3
22/septiembre	1	1	2
28/septiembre	10	0	10
19/octubre	5	0	5
23/noviembre	1	0	1
24/noviembre	2	0	2
13/diciembre	15	1	16
14/diciembre	11	0	11
2018			
6/febrero	22	2	24
13/febrero	5	0	5
15/febrero	12	1	13
20/febrero	2	1	3
22/febrero	22	2	24
27/febrero	13	2	15
13/marzo	4	0	4
20/marzo	4	0	4
27/marzo	17	2	19

Fecha	Polen	Esporas	Total
2018			
3/abril	17	0	17
5/abril	13	0	13
8/mayo	12	0	12
21/agosto	2	0	2
23/agosto	13	0	13
24/agosto	3	2	5
28/agosto	3	0	3
30/agosto	7	5	12
3/septiembre	4	1	5
4/septiembre	10	0	10
17/septiembre	0	1	1
2/octubre	4	1	5
23/octubre	4	1	5
8/noviembre	4	1	5
20/noviembre	13	4	17
22/noviembre	9	4	13
27/septiembre	2	0	2
29/noviembre	2	2	4

Fuente: Archivos del "Hospital General Zona 2 Hermosillo", IMSS (2022).

Temperaturas atípicas

El 4 de junio de 2016 la máxima temperatura registrada en la EMA Misión del Sol, de Hermosillo, alcanzó los 49.4°C a la sombra, a las 15:20 hrs (hora local). Si bien esta EMA es privada, temperaturas muy altas también se registraron en otras estaciones, como en la EMA Hermosillo del SMN (29°04'42"; 110° 55' 48" W, elevación 220 msnm) que registró 48.8 °C a las 14:00 hrs. En ambos casos, la temperatura máxima fue muy atípica por dos razones: (1) ocurrió muy temprano en el verano y (2) superó cualquier registro de temperaturas de 2016 (Figura 2).

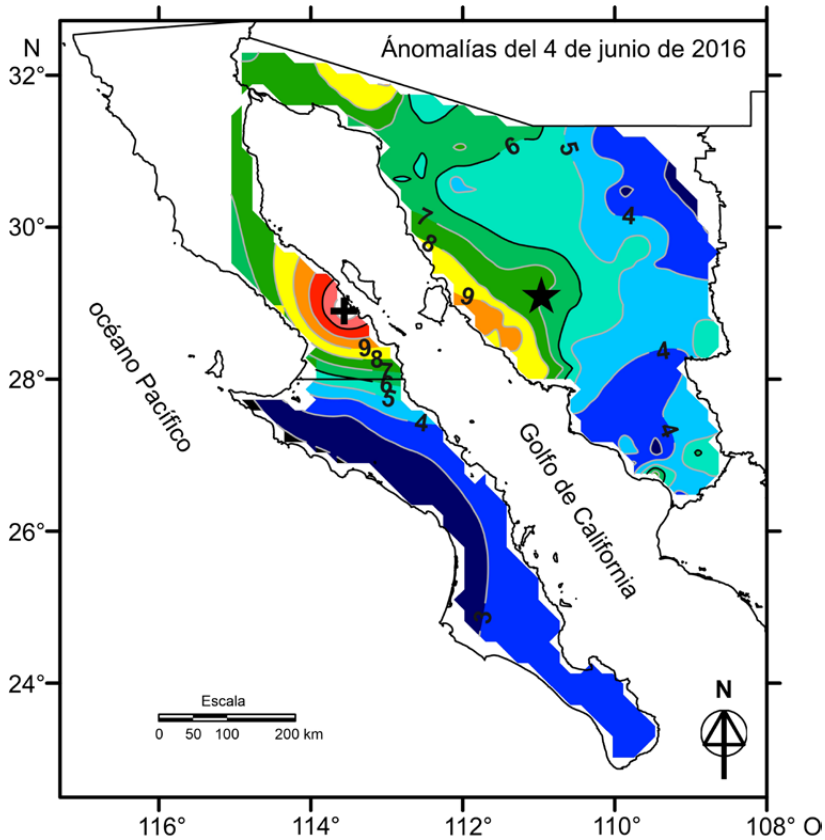


► **Figura 2.** Observaciones horarias de temperaturas del aire en las estaciones meteo-rológicas automáticas Misión del Sol (panel superior) y Hermosillo (panel inferior) para los meses de mayo a octubre de 2016. La línea punteada indica una temperatura de referencia de 45°C. ND = Sin dato.

Fuente: Elaboración propia con datos de Misión del Sol y SMN.

Una onda de calor atípica

La causa de las altas temperaturas, registradas el 4 de junio en la zona urbana de Hermosillo, fue una onda de calor cuyos efectos fueron tan amplios que abarcaron los estados de Sonora, Baja California y la zona fronteriza entre México y Estados Unidos (Figura 3). Un análisis detallado de los registros históricos de 134 EMAS distribuidas en toda la región (Figura 1), la mayoría localizadas en el estado de Sonora, indica que esta onda de calor atípica tuvo lugar entre el 3 y 5 de junio de 2016. Durante esos días los termómetros de muchas EMAS registraron temperaturas muy elevadas, con anomalías mayores a 8 °C. Las temperaturas más altas registradas se observaron el día 4 de junio en el que, en unas cuantas horas (entre las 15:00 y 22:00 hrs, hora local), los incrementos de temperatura superaron los 40°C a la sombra, con el mayor incremento (49.4°C, anomalía de 8.2°C) registrado en la zona urbana de Hermosillo, marcando un nuevo récord para el mes de junio en los registros históricos de la ciudad. Por su duración (de 3 a 4 días) e intensidad (Temperaturas mayores a 40°C y anomalías horarias superiores a 8°C), este fenómeno es considerado una onda de calor muy atípica (Figura 3). A nivel regional las anomalías registradas fueron de hasta 12°C en la EMA Bahía Ángeles del SMN (28°54’00” N,113°33’36” W, elev. 10 msnm) donde se registró una temperatura de 43.4°C a las 14 hrs (hora local) para el sitio.



► **Figura 3.** Anomalías de temperaturas extremas (°C), registradas en las estaciones meteorológicas automáticas de la región de estudio (ver Figura 1). En el mapa la estrella indica la posición de la ciudad de Hermosillo, Sonora; y la cruz, la posición de la EMA Bahía de los Ángeles.

Fuente: Elaboración propia.

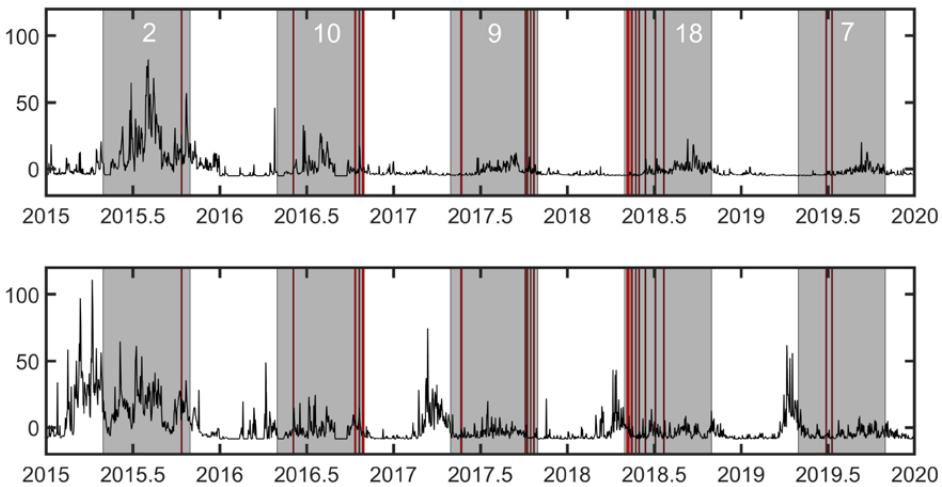
Si bien, en terreno continental, los mayores incrementos de temperatura ocurrieron en el centro-occidente de Sonora (con anomalías extremas superiores a 9°C), es posible que sus efectos se sintieran mucho más al norte según consta por la cobertura de un anticiclón posicionado a ~ 6 km de altura (500 hPa) sobre el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, que se puede constatar consultando los mapas a través del sitio de la National Oceanic and Atmospheric Administration-National Centers for Environmental Predictions (NOAA & NCEP, 2022). El anticiclón se desplazó, el día uno de junio, desde el Pacífico nororiental hacia el continente mientras se desarrollaba hasta alcanzar, el día cuatro, su mayor cobertura. Los anticiclones en esa posición pueden comprimir la atmosfera en niveles inferiores, calentando el aire y elevando las temperaturas superficiales. Por los efectos negativos de esta onda de calor, el gobierno federal decretó desastre natural en actividades agropecuarias, acuícolas y pesqueras del noroeste de Sonora (DOF, 2016). Lo sorpresivo de este suceso fue que, durante su mayor intensidad, el incremento de temperatura ocurrió en unas cuantas horas el día 4 de junio, entre las 3 de la tarde y 10 de la noche, hora local.

Días con temperaturas atípicas en Hermosillo y su relación con el número de pacientes con enfermedades alérgicas

La Figura 4 muestra las series acumuladas de valores estandarizados de 17 especies de esporas de hongos y 43 especies de polen. También se indican los días en los que 40 o más EMAS registraron, de manera concurrente, anomalías extremas de temperaturas iguales o superiores a las observadas el 4 de junio de 2016.

Como se puede apreciar en la Figura 4, la cantidad de esporas de hongos es mayor durante el verano, cuando las condiciones son más cálidas y húmedas, y disminuye durante los meses frescos, cuando las condiciones resultan desfavorables para su propagación. En el caso de las observaciones de polen, su cantidad es mayor durante

la primavera, justo antes del verano, cuando las plantas florecen incrementando el polen en la atmósfera. Por su parte, el número de días con anomalías extremas de temperatura es muy variable y no muestra una regularidad a lo largo de los veranos. Por ejemplo, en 2018 superó la cantidad de días observada en el resto de los años, presentándose al inicio del verano, fenómeno inusual, puesto que se espera que las temperaturas sean más extremas entre mediados y finales del verano.



► **Figura 4.** Acumulado diario de valores estandarizados de 17 especies de esporas de hongos (panel superior) y 43 especies de polen (panel inferior). Las barras grises indican los meses cálidos, de mayo a octubre, mientras que las barras rojas indican los días durante los cuales más de 40 estaciones meteorológicas automáticas en la región registraron una anomalía atípica de temperatura igual o superior a la observada durante la onda de calor del 4 de junio de 2016. Los números indican el número de días identificados en cada año.

Fuente: Elaboración propia de observaciones de polen y esporas de hongos realizadas en la ciudad de Hermosillo en el periodo 2015–2019.

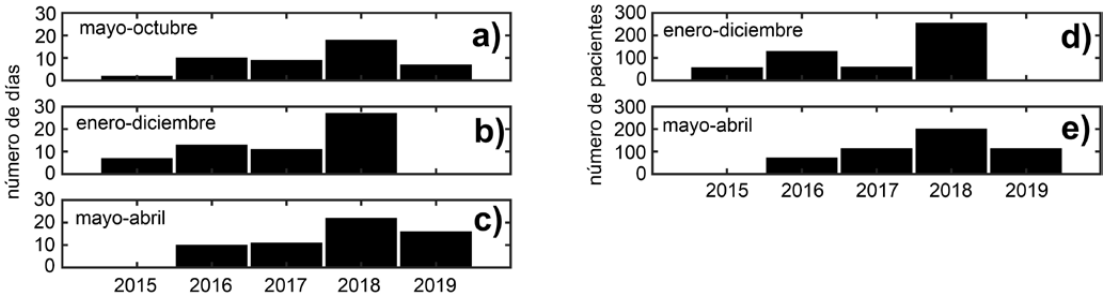
Esto indica que, en 2018, la región del noroeste de México experimentó un verano cálido más temprano con anomalías de temperatura extrema que fueron del doble de las ocurridas en 2017 y un poco menos del doble a las ocurridas en 2016. Aunque a diferencia de 2018, en ambos casos, la mayor densidad sucedió a finales del verano. Este último resultado confirma la tesis de lo inusual que fueron las temperaturas cálidas el 4 de junio de 2016 durante la onda de calor, que superaron incluso los valores de temperatura observados ya entrado el verano (Figura 2). Finalmente, una cantidad menor de días con anomalías extremas de temperatura se observó en 2017 y, por último, la menor cantidad se identificó en 2015.

Debido a que se observa una alternancia entre la cantidad de registros de polen y de esporas de hongos entre los meses frescos y cálidos, resulta razonable analizar en cada año los registros totales de pacientes que resultaron positivos en las pruebas de sensibilidad alérgica para ambos casos. Para poder comparar estos registros con el número de días con anomalías extremas de temperatura, las frecuencias de pacientes se estimaron de dos maneras considerando el año: (1) desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre y (2) desde el 1 de mayo hasta el 30 de abril. En el primer caso, el cálculo cuantifica los registros positivos entre los meses frescos, que corresponden al invierno del año anterior, más los del verano del año actual. En el segundo caso, los registros positivos se cuantifican entre mayo y abril, considerando el año del último mes. Es decir, el cálculo, además del verano, toma en cuenta los meses frescos del invierno posterior. Los resultados se muestran en la Figura 5.

Como se aprecia en la Figura 5, hay consistencia entre las cantidades acumuladas en todos los casos. Por ejemplo, 2018 muestra las mayores frecuencias tanto de días con anomalías extremas de temperatura como de días de registro y de pacientes con resultados positivos en las pruebas de sensibilidad alérgica de esporas de hongos y polen, mientras que 2015 muestra las menores cantidades. Estos resultados otorgan evidencia parcial de una relación directa entre temperaturas cálidas extremas y número de pacientes positivos a pruebas de sensibilidad alérgica. Ésto significa que

entre mayor sea el número de días con temperaturas extremas en la región noroeste, y principalmente en la zona urbana de Hermosillo, se espera que se incremente el número de pacientes con registros positivos en las pruebas de sensibilidad alérgica a esporas de hongos y polen y viceversa.

Más aún, si consideramos el año juliano (de enero a diciembre), 2016 ocupa el segundo lugar en el número de pacientes con pruebas positivas (Figura 5b y d), lo cual es consistente con el hecho de que 2016 mostró la segunda mayor frecuencia de días con anomalías extremas de temperatura, después de 2018 (Figura 4 y 5a). Sin embargo, el resultado es diferente si se considera el año entre mayo y abril. En este caso, el segundo lugar en frecuencia lo ocupa el año 2019 (Figura 5c y e). En 2019 hubo menos días que registraron anomalías extremas de temperatura (Figura 4), por lo que no corresponde a la relación descrita anteriormente. Además, cabe mencionar que no fue posible obtener registros para ese año, ya que los documentos consultados sólo llegan hasta 2018. Pero es posible argumentar que si se cuantifican los registros de pacientes entre enero y diciembre, es decir, cuando en el cálculo además del verano se consideran los meses frescos inmediatos anteriores al verano, la relación tiene sentido puesto que las temperaturas cálidas observadas desde los meses frescos pueden adelantar el comienzo del crecimiento de las plantas y el inicio de la floración, lo cual es congruente con lo que se reporta en la literatura (Schramm *et al.*, 2021). Ésto, a su vez, resulta en una temporada de polen que comienza más temprano y tiene una mayor duración, que se ve reflejado en el número de pacientes sensibles a enfermedades alérgicas.



► **Figura 5.** Cantidades totales entre 2015 y 2019 de a) número de días en que 40 o más estaciones meteorológicas automáticas mostraron anomalías extremas de temperaturas iguales o superiores a las observadas durante la onda de calor del 4 de junio de 2016; b) y c) número de días en el que hubo registros de pacientes que dieron positivo en las pruebas de sensibilidad alérgica; y d) y e) número de pacientes positivos a las pruebas de sensibilidad alérgica. En cada caso, se indica el periodo de meses en que se realizó el cálculo.

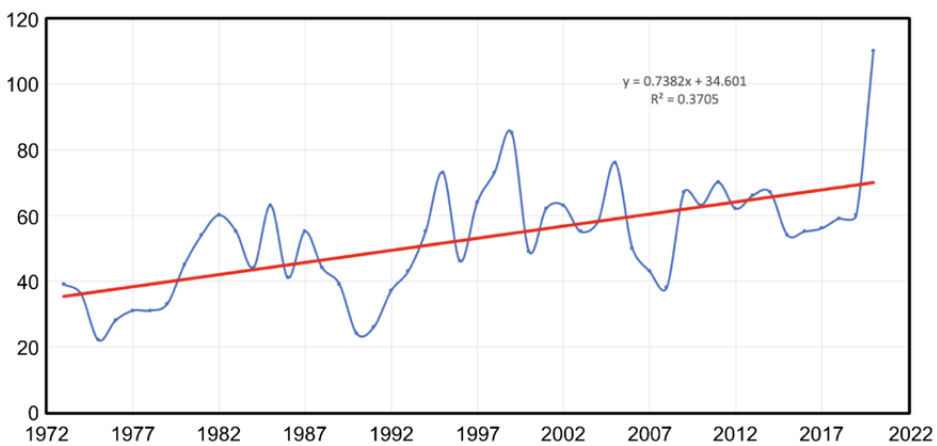
Fuente: Elaboración propia con datos de SMN, CIB, Misión del Sol, SIAFESON y observaciones de polen y esporas de hongos realizadas en la ciudad de Hermosillo en el periodo 2015–2019.

Schramm *et al.* (2021) analizaron 9,679 publicaciones relacionadas con el monitoreo de las concentraciones de polen alérgico en varias ciudades alrededor del mundo, concluyendo que la temperatura y precipitación a corto y largo plazo tienen un impacto directo en la fenología de las plantas y en la producción de polen (e.g., Garcia-Mozo *et al.* (2015)). Bajo el escenario del cambio climático global, el incremento de días con mayor temperatura contribuye a la alteración en las estaciones polínicas y expone a la población de las ciudades a una mayor cantidad de polen por eventos climáticos extremos (D'Amato *et al.*, 2014). Por ejemplo, 78 de 122 análisis de artículos muestran que el adelanto en las estaciones polínicas fue correlacionado positivamente con temperaturas más cálidas (Schramm *et al.*, 2021), así mismo, 65 de 96 análisis de artículos encontraron una correlación directa entre la temperatura y

el promedio diario de concentraciones polínicas alrededor del mundo, lo que sugiere que las concentraciones diarias de polen más altas ocurren con temperaturas más cálidas (Schramm *et al.*, 2021). Concluyendo, este análisis abre una línea de investigación, que debería seguir explorándose, relacionada con ondas de calor y los efectos del polen en el aire en personas que sufren de enfermedades alérgicas.

Reflexiones finales

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2021 la ciudad de Hermosillo, capital de Sonora, contaba con 936,263 habitantes (INEGI, 2022), siendo la ciudad más poblada de la entidad. Debido a su clima seco, muy árido (INEGI, 2017), las temperaturas superiores a 40°C son comunes en verano. Al parecer, temperaturas extremas cada vez más cálidas serán más frecuentes en el futuro cercano, junto a la consecuente ocurrencia de ondas de calor atípicas, según lo muestra el incremento paulatino en el número de días con temperaturas superiores a 40°C (Figura 6). Esto es consistente con el calentamiento global (IPCC, 2021), así como con las condiciones extremadamente cálidas y secas que se observan en los países de Europa en 2022. Sin embargo, aún no es claro cuáles serán las consecuencias de estos incrementos de temperatura sobre la salud de las personas, particularmente de aquellas que son sensibles a enfermedades alérgicas.



► **Figura 6.** Incremento en el número de días con temperaturas superiores a 40°C, periodo 1973–2020 (línea azul), de mayo a octubre, según consta en los registros de la estación Hermosillo II del SMN, a las que se le ajustó un modelo de regresión lineal (línea roja).

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación Hermosillo II del SMN.

Se ha publicado recientemente (Bastl *et al.*, 2018; Schramm *et al.*, 2021) que el aumento de temperaturas en las ciudades está relacionado con el incremento de la concentración de polen en el aire y estaciones polínicas más largas, lo que puede incrementar en gran medida la incidencia de exacerbaciones de asma, disminución de la productividad laboral y de los días de asistencia escolar, así como podría generar grandes costos por parte del sector salud para el tratamiento de enfermedades relacionadas con alergias, todo esto resulta en pérdidas económicas serias para los países (Bastl *et al.*, 2018). Por lo que es posible afirmar que si esta situación no se atiende adecuadamente podría convertirse en un problema de salud serio para sus habitantes, pues, como hemos mostrado en este trabajo, hay una relación directa entre el número de días con anomalías extremas de temperaturas cálidas y el número de pacientes con resultados positivos a pruebas de sensibilidad alérgica por esporas de hongos y polen. Si bien el análisis se hizo con los datos obtenidos de una sola clínica del IMSS en Hermosillo, arroja indicios de la importancia de esta relación, y puede ser muy útil a las autoridades de salud, quienes tienen la oportunidad de tomar medidas preventivas ante posibles incrementos de enfermedades alérgicas como consecuencia de la llegada de ondas de calor atípicas.

» Referencias bibliográficas

Bastl, K., Kmenta, M., Berger, M., & Berger, U. (2018). The connection of pollen concentrations and crowd-sourced symptom data: new insights from daily and seasonal symptom load index data from 2013 to 2017 in Vienna. World Allergy Organization Journal, 11, 24. https://doi.org/10.1186/s40413-018-0203-6

D'Amato, G., Cecchi, L., D'Amato, M., & Annesi-Maesano, I. (2014). Climate change and respiratory diseases. European Respiratory Review, 23(132), 161–169. https://doi.org/10.1183/09059180.00001714

DOF. (2016, November 15). Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. Https://Www.Dof.Gob.Mx/Index_113.Php?Year=2016&month=11&day=15#gsc.Tab=0.

El imparcial. (2022). 10. "Hermosillo rompe récord de temperatura para un 12 de julio: 47 grados." Https://Www.Elimparcial.Com/Sonora/Hermosillo/Hermosillo-Rompe-Record-de-Temperatura-Para-Un-12-de-Julio-47-Grados-20200712-0034.Html .

El Imparcial. (2022, June 18). 2. "Bomberos de Hermosillo auxilian a un hombre que sufrió golpe de calor." 3. Https://Www.Elimparcial.Com/Sonora/Hermosillo/Bomberos-de-Hermosillo-Auxilian-a-Un-Hombre-Que-Sufrio-Golpe-de-Calor-20220718-0042.Html .

Feng, Y., Liu, W., Sun, F., & Wang, H. (2021). Changes of compound hot and dry extremes on different land surface conditions in China during 1957–2018. International Journal of Climatology, 41(S1). https://doi.org/10.1002/joc.6755

Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez-Vilches, E. (2007). Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología. REA. In Publications Services of the University of Cordoba. . SERVICIO DE PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.

Garcia-Mozo, H., Oteros, J., & Galan, C. (2015). Phenological changes in olive (<i>Ola europaea L.</i>) reproductive cycle in southern Spain due to climate change. Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 22(3), 421–428. https://doi.org/10.5604/12321966.1167706

Harvey, Ch. (2022a). CLIMATEWIRE. In https://subscriber.politicopro.com/article/eenews/2022/06/22/seville-launches-first-program-to-name-and-rank-heat-waves-00041129.

Harvey, Ch. (2022b). Scientific American. In https://www.scientificamerican.com/article/zoe-becomes-the-worlds-first-named-heat-wave/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=today-in-science&utm_content=link&utm_term=2022-07-26_top-stories&spMailingID=71885544&spUserID=NTA.

He, Y., Fang, J., Xu, W., & Shi, P. (2022). Substantial increase of compound droughts and heatwaves in wheat growing seasons worldwide. International Journal of Climatology, 42(10), 5038–5054. https://doi.org/10.1002/joc.7518

Herrera-Alanís, J. L. (2012). Análisis de las Olas de Calor en la República Mexicana [Tesis Doctorado, Universidad Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/analisis-de-las-olas-de-calor-en-la-republica-mexicana-79993?c=J9A39W&d=true&q=*:*&i=2&v=1&t=search_0&as=0

Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. Annals of Applied Biology, 39(2).

INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2017. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/

INEGI. (2022). Número de habitantes. Sonora. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/poblacion/

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Vol. Volume IPCC AR6 W (Switzerland, Ed.). Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico City (UNAM, Ed.; Vol. 70). Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.

Lancia, A., Capone, P., Vonesch, N., Pelliccioni, A., Grandi, C., Magri, D., & D'Ovidio, M. C. (2021). Research Progress on Aerobiology in the Last 30 Years: A Focus on Methodology and Occupational Health. Sustainability, 13(8), 4337. https://doi.org/10.3390/su13084337

NIH. (2022). ¿Qué es la hipertermia? https://salud.nih.gov/preguntele-a-carla/que-es-la-hipertermia

NOAA, & NCEP. (2022). Weather Prediction Center. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/#page=ovw

Ortega Rosas, C. I., Calderón-Ezquerro, M. D. C., & Gutiérrez-Ruacho, O. G. (2020). Fungal spores and pollen are correlated with meteorological variables: effects in human health at Hermosillo, Sonora, Mexico. International Journal of Environmental Health Research, 30(6), 677–695. https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1625031

Ortega-Rosas, C. I., Brito-Castillo, L., & Gutiérrez.Ruacho, O. G. (2022). Estacionalidad de los aeroalergénos en Hermosillo, Sonora durante el 2019 y su efecto en la salud poblacional. In E. Gonzalez-Sosa, A. C. Travieso.Bello, M. L. Romo, & C. Welsh (Eds.), Vulnerabilidad, resiliencia y riesgos emergentes en época de pandemia. Una visión desde REDESClim. Universidad Autónoma de Querétaro.

Ortega-Rosas, C. I., Enciso-Miranda, C. A., Macías-Duarte, A., Morales-Romero, D., & Villarruel-Sahagún, L. (2020). Urban vegetation cover correlates with environmental variables in a desert city: insights of mitigation measures to climate change. Urban Ecosystems, 23(6), 1191–1207. https://doi.org/10.1007/s11252-020-00982-8

Pablos, N., Scott, C., Wilder, M., Salazar, A., Díaz-Escalante, R., Brito, L., Watts, C., Moreno Vázquez, J., Oroz, L., & Neri, C. (2012). Hermosillo, ciudad sin agua para crecer. Vulnerabilidad hídrica y reos frente al cambio climático (pp. 127–169).

Prevéy, J. S. (2020). Climate Change: Flowering Time May Be Shifting in Surprising Ways. Current Biology, 30(3), R112–R114. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.12.009

REMAS-SIAFESON. (2022). Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora. https://www.siafeson.com/remas/

Robinson, P. J. (2001). On the Definition of a Heat Wave. Journal of Applied Meteorology, 40(4), 762–775. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2

Schramm, P. J., Brown, C. L., Saha, S., Conlon, K. C., Manangan, A. P., Bell, J. E., & Hess, J. J. (2021). A systematic review of the effects of temperature and precipitation on pollen concentrations and season timing, and implications for human health. International Journal of Biometeorology, 65(10), 1615–1628. https://doi.org/10.1007/s00484-021-02128-7

Secretaría de Salud. (2020). Manual de procedimientos estandarizados para la vigilancia epidemiológica de daños a la salud por temperaturas naturales extremas. In SVEDSTNE. Dirección General de Epidemiología.

Shaposhnikov, D., Revich, B., Bellander, T., Bedada, G. B., Bottai, M., Kharkova, T., Kvasha, E., Lezina, E., Lind, T., Semutnikova, E., & Pershagen, G. (2014). Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010. Epidemiology, 25(3), 359–364. https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000090

Sharma, A., Andhikaputra, G., & Wang, Y.-C. (2022). Heatwaves in South Asia: Characterization, Consequences on Human Health, and Adaptation Strategies. Atmosphere, 13(5), 734. https://doi.org/10.3390/atmos13050734

SMN. (2022). Estación 26139 HERMOSILLO II.

SMN, & CONAGUA. (2022). Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte

Smoyer-Tomic, K., Kunh, R., & Hudson, A. (2003). Head waves hazards: An overview heat wave impacts in Canada. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards 28:463–485

SNPC, & CENAPRED. (2018). Mapas de riesgo por temperaturas máximas (3a etapa ondas de calor).

Sofiev, M., & Bergman, K. (2013). Allergenic Pollen (M. Sofiev & K.-C. Bergmann, Eds.). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4881-1

White, R. H., Anderson, S., Booth, J. F., Braich, G., Draeger, C., Fei, C., Harley, C. D. G., Henderson, S. B., Jakob, M., Lau, C.-A., Mareshet Admasu, L., Narinesingh, V., Rodell, C., Roocroft, E., Weinberger, K. R., & West, G. (2023). The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021. Nature Communications, 14(1), 727. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36289-3

WU. (2022). Mision del Sol - ISONORAH20. https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ISONORAH20

3.4 Caracterización de inundaciones pluviales en la comunidad rural maya Santa María Poniente

Alejandro Sánchez Zavalegui
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Rosalía Chávez Alvarado
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

José Manuel Camacho Sanabria
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Palabras Clave: Ruralidad, cartografía participativa, riesgo, inundación.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

En la actualidad el problema de las inundaciones se ha tornado relevante, puesto que, debido al cambio climático, la intensidad y frecuencia de dicha amenaza se ha visto incrementada. A nivel nacional, la amenaza por inundaciones en las áreas urbanas y rurales ha presentado una tendencia de ir en aumento. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), entre el año 2000 y 2020, el 90% de las declaratorias de emergencia y desastre fueron producto de las inundaciones (CENAPRED, 2023). Siendo las comunidades rurales las que habitualmente sufren mayores afectaciones ante eventos de inundación a causa de las condiciones de vida que les subyace, como el nivel de pobreza, la alta marginalidad, los materiales de vivienda, entre otros (Frausto *et al*., 2006; Maldonado & Cóccaro, 2011).

Respecto al estudio de las amenazas, para comprender su nivel de afectación, es necesario la caracterización de sus niveles de afectación, aunado a su origen, el daño que produce y las condiciones ambientales que favorecen o intensifican sus efectos (Hernández *et al*., 2003; Velázquez-Palomares, 2017). Entre las características clave para el estudio de las inundaciones están la geomorfología (Hernández *et al*., 2003), la ubicación y cuantificación de los elementos expuestos (Perevochtchikova & de la Torre, 2010; Ribera Masgrau, 2004), el relieve y las curvas de nivel (Huatatoca-Chimbo & Chanaluisa-Chiliquinga, 2019), elementos que en conjunto permiten establecer zonas de inundación que requieren atención prioritaria. Por otra parte, la caracterización de las inundaciones también engloba la relación que guardan los sistemas meteorológicos y la cantidad de precipitación (Herrera *et al*., 2018; Matías-Ramírez *et al*., 2007), debido a que las precipitaciones pueden darse, en mayor o menor medida, por un sistema meteorológico, ya sea este un sistema tropical o un sistema frontal derivado a la ubicación geográfica de la zona (Ibisate-González *et al*., 2000; Matías-Ramírez *et al*., 2007; Pérez-Briceño *et al*., 2016).

En el estado de Quintana Roo son escasas las investigaciones referentes al tema de las inundaciones pluviales (inundaciones que se caracterizan por acumulación de agua sobre el terreno, producto de precipitación y no por alguna otra causa) en entornos rurales, siendo mayormente investigados los fenómenos hidrometeorológicos como los huracanes y su impacto socioeconómico en las zonas urbanas (Camacho-Sanabria *et al*., 2019; Chávez Alvarado, 2018; Frausto *et al*., 2006; Palafox-Muñoz & Frausto-Martínez, 2008). En este capítulo, se aborda la caracterización de las inundaciones pluviales en la comunidad de Santa María Poniente, un fenómeno que ha marcado la vida de sus habitantes en los últimos años, debido a precipitaciones severas, atípicas y extremas. Este análisis se realiza con una perspectiva mixta, donde convergen elementos cuantitativos y cualitativos. Este enfoque metodológico, inclinado hacia la vertiente cualitativa, busca profundizar en los rasgos del espacio habitado, que propician el desarrollo de las inundaciones pluviales, con la finalidad de generar conocimiento base que permita la implementación de futuras estrategias efectivas para prevenir y mitigar el riesgo asociado a estas inundaciones en entornos rurales escasamente estudiados.

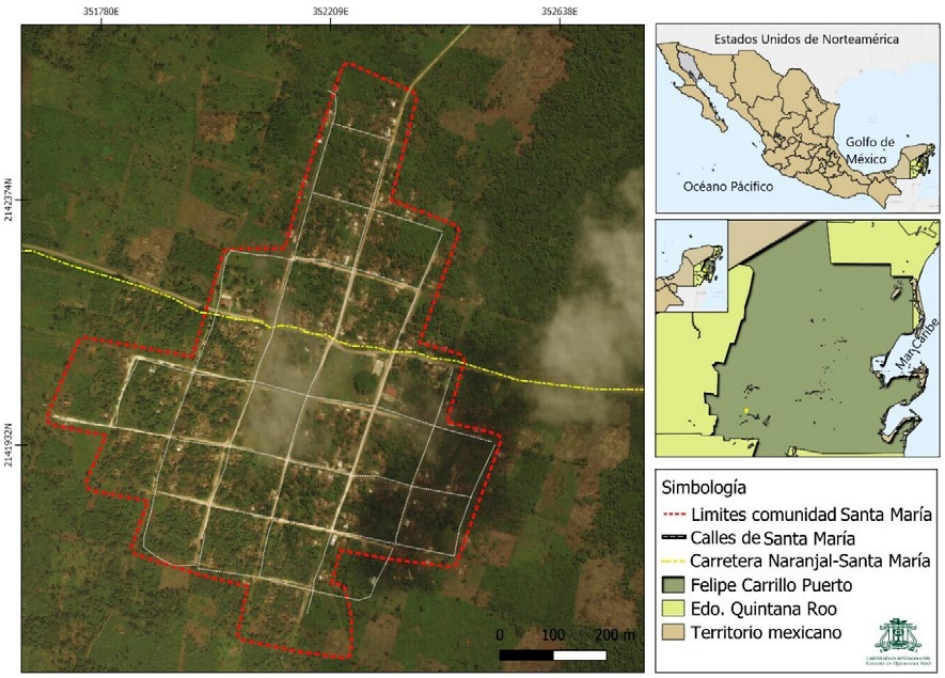
Área de estudio

El área de estudio se eligió a partir de dos ejes fundamentales: 1) ser una entidad rural con alto nivel de marginalidad y pobreza, y 2) presentar reiteradas afectaciones por inundaciones pluviales. Para cumplir dichos criterios, en primera instancia se identificaron, mediante una inspección en fuentes académicas y hemerográficas (Tabla 1), eventos de inundación pluvial en entornos rurales mayas, donde destacó la comunidad de Santa María Poniente, con una población de 804 habitantes, la cual, de acuerdo con el censo de población y vivienda (INEGI, 2020), presentan alta marginalidad y pobreza. Dicha comunidad se ubica en la zona maya del centro del estado de Quintana Roo, perteneciente al municipio de Felipe Carrillo Puerto (Figura 1), caracterizada por tener un relativo aislamiento geográfico, al localizarse a 15.3 km de la carretera principal "Chetumal-Mérida".

Tabla 1. Eventos de inundación en el área de estudio durante el periodo 2002-2022.

Área afectada	Fecha de afectación	Autor
Zonas mayas de la península de Yucatán	24 de septiembre de 2002	Rosales (2003)
Zona maya centro/sur de Quintana Roo	26 de septiembre de 2002	Sánchez *et al*. (2021)
Comunidades rurales de Felipe Carrillo Puerto	2 de julio de 2005	Municipio de Othón P. Blanco (2018)
Zonas rurales de Carrillo Puerto	22 de julio de 2008	Municipio de Othón P. Blanco (2018)
Santa María Poniente	4 de octubre de 2013	Por esto Quintana Roo (2013)
Santa María Poniente	20 de octubre de 2015	Municipio de Othón P. Blanco (2018)
Santa María Poniente	14 de noviembre de 2017	Novelo (2017)
Santa María Poniente	16 de junio de 2018	El Quintana Roo (2018)
Santa María Poniente	5 de septiembre de 2019	Novedades Quintana Roo (2019)
Santa María Poniente	31 de mayo de 2020	Caamal (2020)
Santa María Poniente	20 de agosto de 2020	Xiu (2020)
Santa María Poniente	31 de mayo de 2022	Caamal (2022)

Fuente: Elaboración propia con datos de Rosales (2003); Xiu-Chan (2020); Chan (2020); Novelo (2017); El Quintana Roo (2018); Municipio de Othón P. Blanco. (2018); Novedades Quintana Roo (2019); Caamal (2020, 2022).



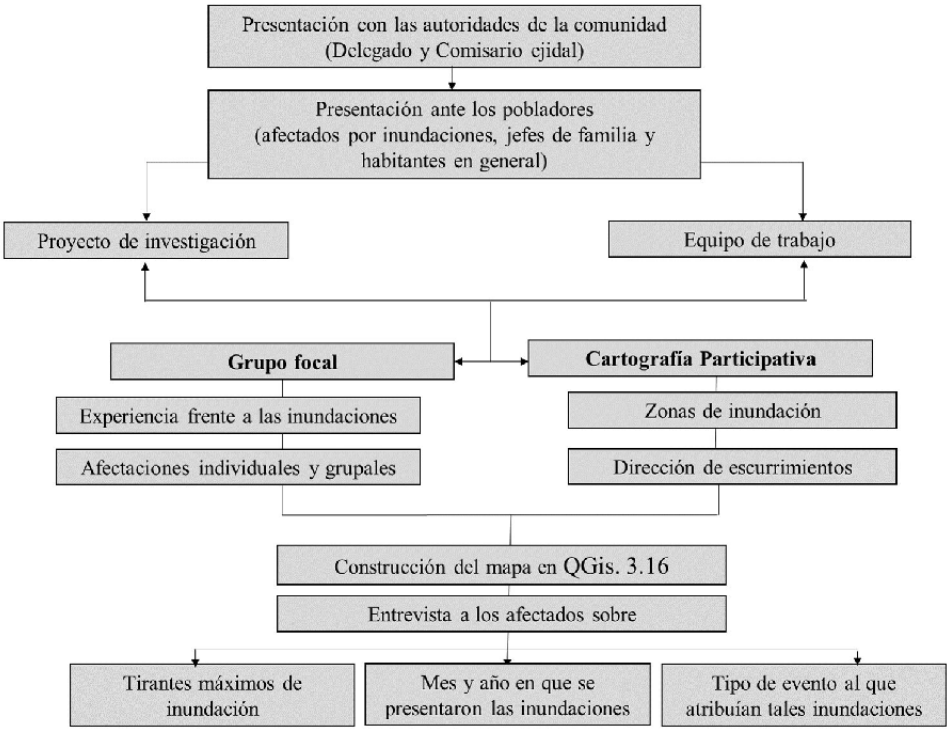
► **Figura 1.** Área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

Para la construcción de los mapas de inundación, se implementaron técnicas cualitativas, en primer lugar se convocó un grupo focal compuesto por los habitantes afectados por las inundaciones pluviales (Figura 2), permitiendo obtener información cualitativa socio-ambiental (Buss-Thofehrn *et al.*, 2013). Este grupo focal a cabo con el apoyo de la autoridad de la comunidad (delegado y comisario ejidal) que convocó a los pobladores, con los cuales se entabló una charla donde narraron sus experiencias, como individuos y como colectivo, frente a las inundacione, acotándose las afectaciones individuales que han tenido dentro de sus terrenos y las afectaciones generales dentro de la comunidad.

Para la identificación de las zonas de inundación se llevó a cabo, con el grupo focal, el método de mapeo cualitativo denominado "cartografía participativa"(Figura 2), que consiste en la representación colectiva del territorio y/o espacio, así como los rasgos inmersos dentro de él (Diez-Tetamanti *et al.*, 2012). Se les pidió a los participantes que señalasen las zonas de inundación y la dirección de los escurrimientos en una imagen del área de su comunidad, y que estos, con su experiencia como residentes de la comunidad, pudieran identificar estas zonas, para posteriormente digitalizar esta construcción social en un mapa, utilizando los sistema de información geográfica (QGis 3.16). Por último, con el mapa obtenido se procedió a entrevistar a los habitantes de dichas zonas para conocer los tirantes máximos de inundación, el mes y año en que se presentaron las inundaciones, y a qué tipo de eventos (nortes o huracanes/tormentas) atribuían tales inundaciones.

Se registró que las inundaciones ubicadas en la zona centro de la comunidad (Zona 7) tardan de 3 a 7 días en desaparecer, dependiendo de la intensidad de las lluvias, la prevalencia de éstas, la profundidad del terreno (Tabla 2) y considerando el suelo como una variable del espacio habitado, con potencial de exacerbar el estancamiento de las aguas. La comunidad estudiada, por ejemplo, se ubica sobre suelos de tipo leptosol y gleysol (Figura 5), caracterizados por presentar poca permeabilidad lo que se traduce en inundaciones de larga duración (Fragoso-Servón *et al.*, 2017). Indicándose por los habitantes que las principales afectaciones que se tienen en las escuelas son las plagas de moscos y ranas, que afectan severamente la actividad de

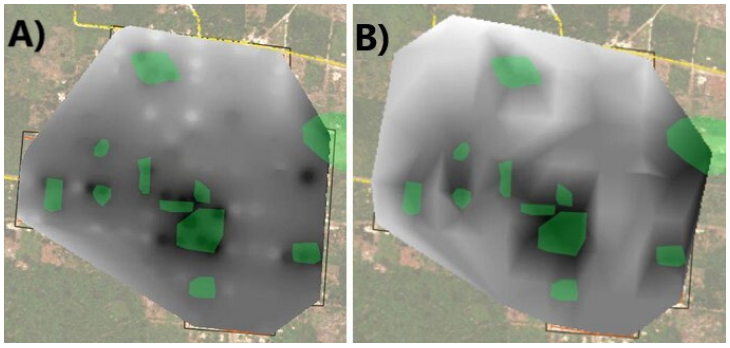


► **Figura 2.** Ruta metodológica para la construcción del mapa de inundaciones

Fuente: Elaboración propia.

los niños en las aulas, disminuyendo un 40% la cantidad de niños que asisten a clases cuando la inundación llega a 50 cm, teniendo sólo alrededor de 19 a 21 niños en el aula durante las inundaciones.

Los datos tomados en campo se exportaron al programa Garmin BaseCamp, para extraer automáticamente los puntos de referencia del dispositivo GPS y abrir los archivos gpx en el programa QGis. 3.16. Mediante el plugin complementario GPX se colocó cada punto en formato GPX, para convertidos a formato shape de ESRI bajo el datum WGS 84, con una proyección de coordenadas UTM 16 N, quedando constituidos los puntos shape en la tabla de atributos por las coordenadas X, Y, además del eje Z como la elevación. Con los cuales se procedió a construir dos MDE con el objetivo de discernir el método más adecuado para representar el terreno: el primero con el modelo de triangulación lineal y el segundo a partir de una interpolación mediante el método de ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés), modificando el método del vecino más cercano, aunado al modelo lineal, con el modelo del vecino natural aunado a las celdas de Voronoi (Fallas, 2007; Mena-Frau *et al.* 2011), en la cual la triangulación de puntos se realizó con los nodos de esta malla en los circuncentros de menos triángulos de Delaunay (Figura 3).



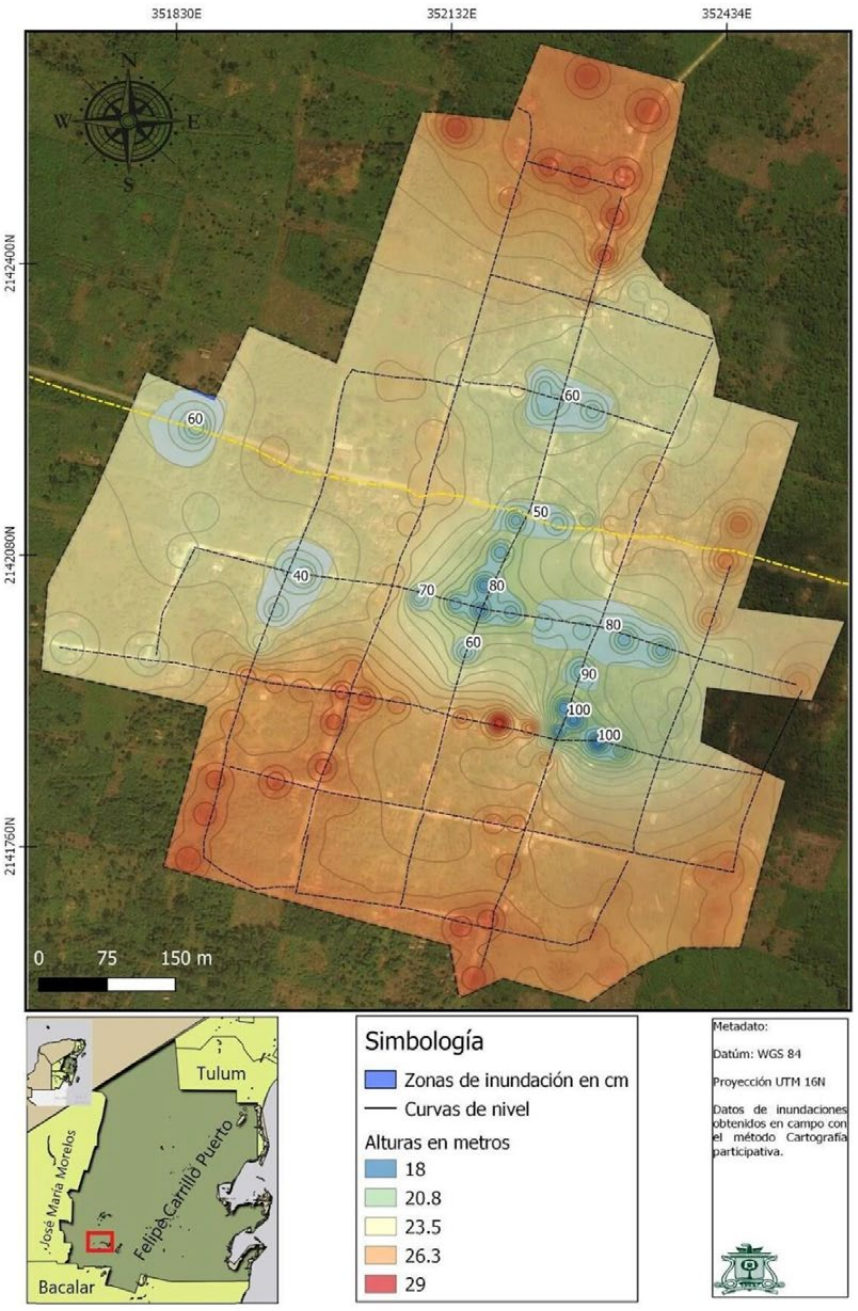
► **Figura 3.** MDE a partir del modelo del vecino natural (A) y el modelo de triangulación lineal (B).

Fuente: Elaboración propia.

Optando por el segundo método, al arrojar un resultado más similar a la realidad, pues se obtuvo que el tamaño de celda, aunado a la interpolación más precisa y suave mediante el vecino natural, se ajusta mejor y denota una forma más gráfica de las zonas de inundación. Efectuándose el proceso de extracción de curvas de nivel, mediante la aplicación de la herramienta "extrac to level curves", con una equidistancia de 0.5 metros, para tener una mayor representación del terreno.

Zonificación de las inundaciones en la comunidad de Santa María Poniente

A partir de la información obtenida con el grupo focal, la cartografía participativa y la interpretación del relieve del terreno permitieron la identificación de 10 zonas de inundación directas en cultivos, viviendas, iglesia y escuelas. Siendo las zonas 4, 5 y 7 las más afectadas, con inundaciones de 80 a 100 cm de altura (Figura 4).



► **Figura 4.** Zonas de inundación de la comunidad de Santa María Poniente.

Zona 1=cultivo, Zona 2-6 y 8-10= viviendas, Zona 7= iglesia y escuelas. Fuente: Elaboración propia.

Se registró que las inundaciones ubicadas en la zona centro de la comunidad (Zona 7) tardan de 3 a 7 días en desaparecer, dependiendo de la intensidad de las lluvias, la prevalencia de estas, la profundidad del terreno (Tabla 2) y considerando al suelo como una variable del espacio habitado, con potencial de exacerbar el estancamiento de las aguas. La comunidad se ubica sobre suelos de tipo leptosol y gleysol (Figura 5), caracterizados por presentar poca permeabilidad, lo que se traduce en inundaciones de larga duración (Fragoso-Servón *et al.* 2017). Los habitantes indicaron que las principales afectaciones que se tienen en las escuelas son las plagas de moscos y ranas, que afectan severamente la actividad de los niños en las aulas, disminuyendo un 40% la cantidad de niños que asisten a clases cuando la inundación llega a 50 cm, teniendo sólo alrededor de 19 a 21 niños en el aula durante las inundaciones.

Tabla 2. Afectaciones en la comunidad Santa María Poniente.

Afectación	Altura de la inundación	Hogares afectados	Recurrencia durante un año	Duración de la inundación
Anegación del terreno circundante a las viviendas	A partir de los 20 cm	23	5 veces	1 día
Anegación dentro de la vivienda	A partir de los 30 cm	23	3 veces	1 día
Pérdida de hortalizas en el solar familiar	A partir de los 40 cm	3 (no todos lo realizan)	1 vez	3 días
Daños en bienes materiales	A partir de los 60 cm	16	1 vez	4 días en el exterior 3-5 días en el interior
Pérdida de cultivos de maíz en del solar familiar	A partir de 70 cm	1 (no todos lo realizan)	1 vez cada dos años	3-6 días
Abandono momentáneo de los hogares. Daños en infraestructura escolar	A partir de 80 cm	9 (algunas familias no abandonan sus hogares)	Suelen ocurrir cada dos a tres años	8 días en el exterior 10 días en el interior
Muerte de animales de corral (crías de cerdos) y gallinas. Daños en infraestructura escolar	A partir de los 90-100 cm	6	Suelen ocurrir cada dos a tres años	10 días en el exterior 9-11 días en el interior

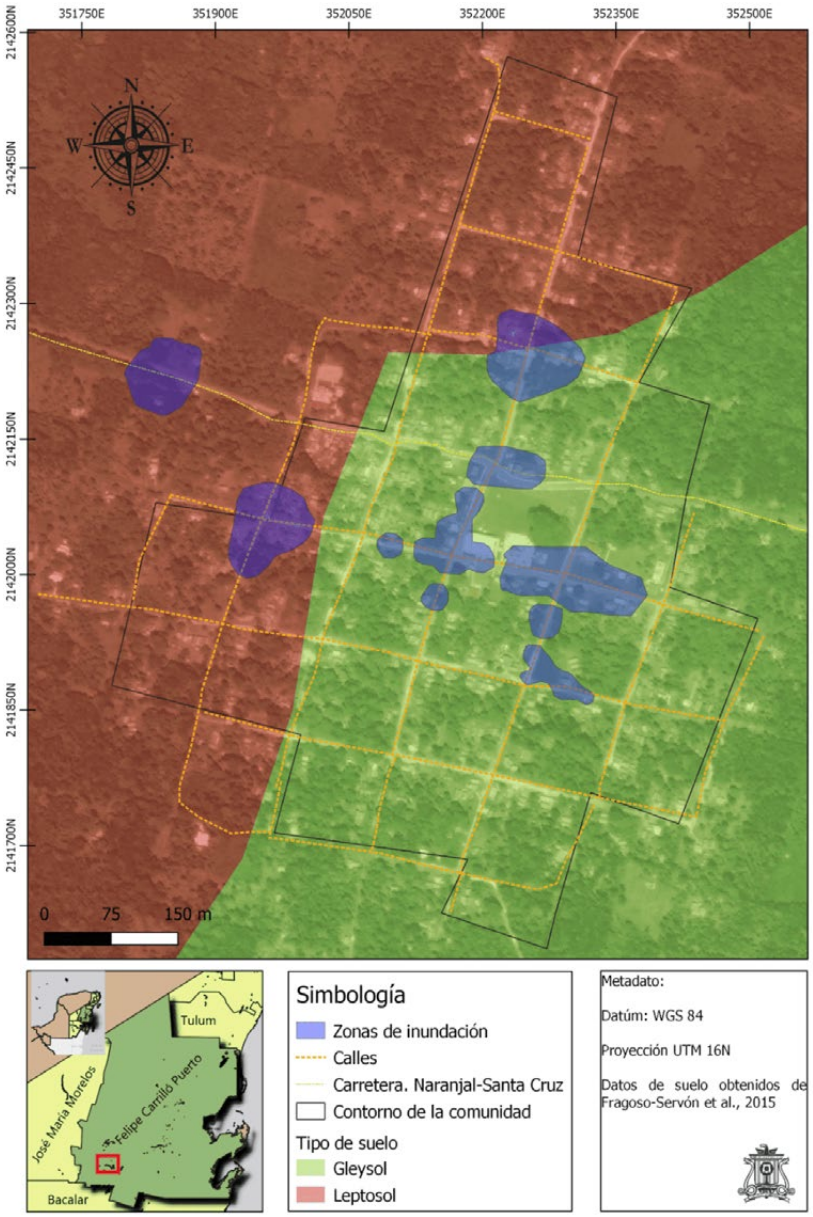
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de los habitantes durante el trabajo de campo (2021).

Al comparar el mapa elaborado a partir de la interpretación digital del relieve (Figura 6A) con el mapa coloreado por los habitantes (Figura 6B), se obtuvo una gran similitud entre estos, evidenciando que los habitantes tienen pleno conocimiento de las zonas más afectadas. En la Figura 6B se pueden observar las zonas que los pobladores consideran que tienden a inundaciones extremas y que afectan fuertemente su vida cotidiana, al ubicarse alrededor de la plaza del pueblo, donde es paso obligatorio para ir a la iglesia o escuelas, como el jardín de niños (preescolar) que ha presentado inundaciones de 50 cm y la escuela primaria con inundaciones de 80 a 100 cm, llegando el agua hasta las ventanas de las aulas (Figura 7).

Por otra parte, a partir del recorrido en campo se contabilizaron las viviendas afectadas dentro de las zonas de inundación. Identificándose 34 hogares expuestos ante inundaciones y que sufren, en mayor o menor medida, las afectaciones por dicho fenómeno, derivado de la altura del terreno donde se encuentran (Figura 8). De los cuales 15 hogares se ubicaron en zonas con inundaciones extremas que van desde los 80 a 100 cm de altura, las cuales causan pérdida de bienes materiales, daños en la vivienda y muerte de animales (cerdos y gallinas) (Tabla 2). Situación que ha llevado a los habitantes de Santa María Poniente a abandonar momentáneamente sus hogares, quedándose sólo algunas familias en sus hogares, lo que ha producido, en palabras de los propios pobladores, una sensación de "inseguiridad".

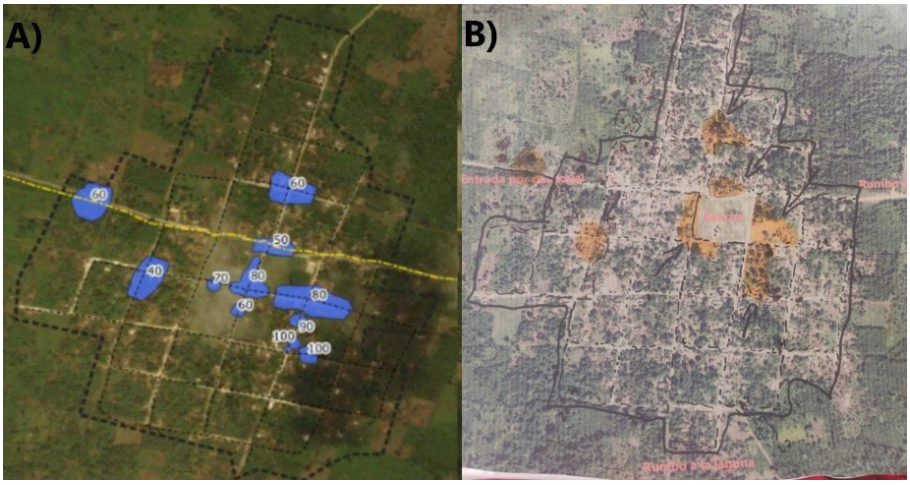
► **Figura 5.** Tipo de suelo de la comunidad de Santa María Poniente.

Fuente: Elaboración propia.



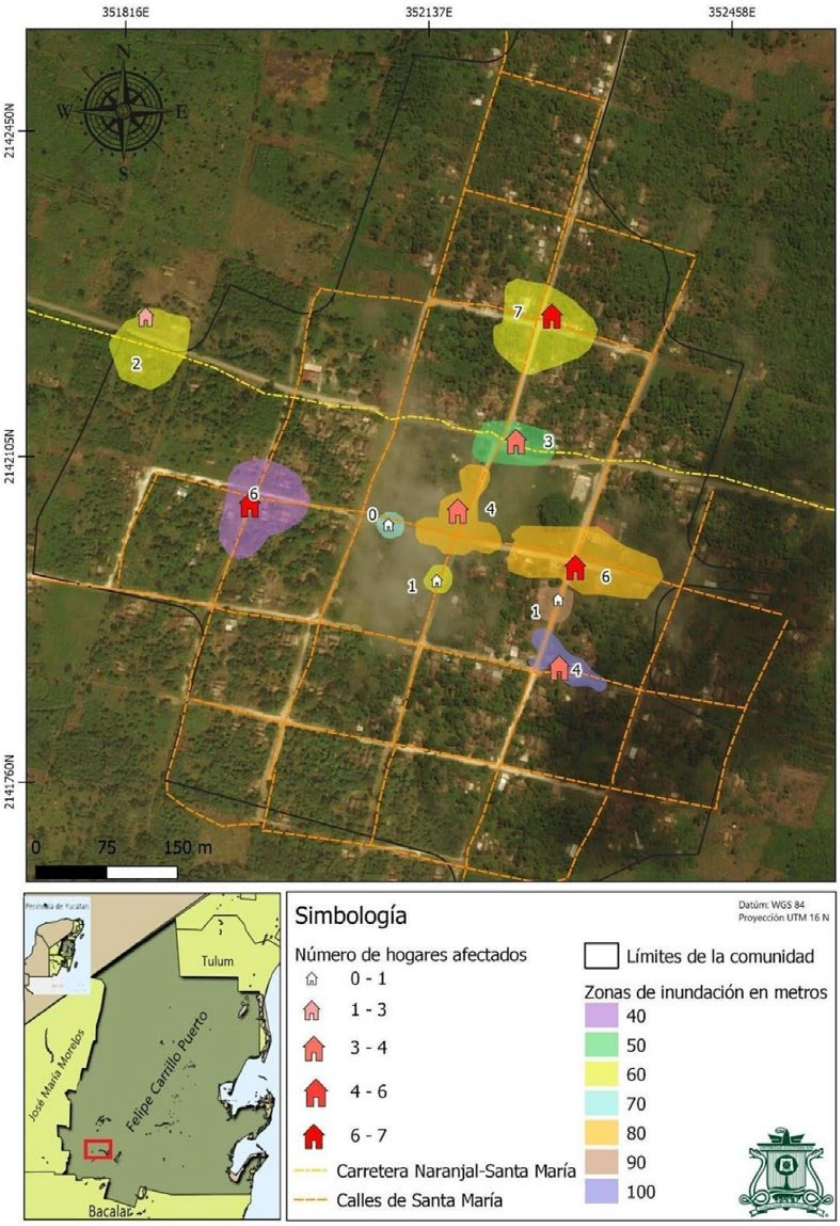
► **Figura 6.** Zonas de inundación según la percepción de los habitantes.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en la investigación de campo (2021).



► **Figura 7.** Nivel de inundación en el jardín de niños (preescolar).

Fuente: Fotografía de los autores, tomada durante el trabajo de campo (2021).

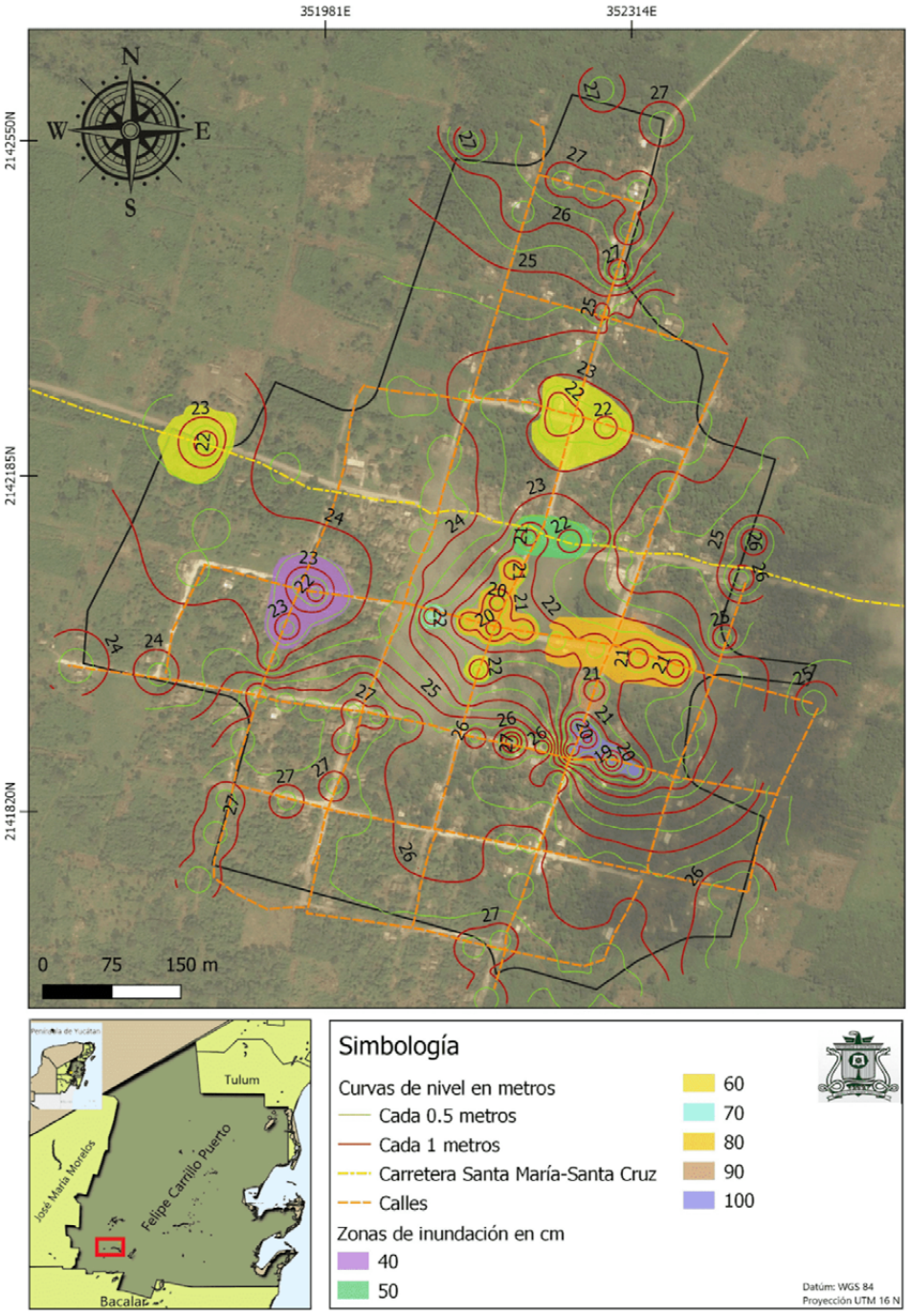


► **Figura 8.** Elementos expuestos en Santa María Poniente.

Fuente: Elaboración propia.

Curvas de nivel (alturas del terreno) dentro la comunidad Santa María Poniente

En el mapa de curvas de nivel (Figura 9) se puede observar que existe concordancia entre las zonas de inundación y las zonas más bajas del terreno, siendo las áreas con menor altitud las que presentan inundaciones más pronunciadas. Destacándose que uno de los principales problemas es la poca planificación de los asentamientos humanos, puesto que, si bien hay viviendas en zonas altas (los lomeríos de alturas entre los 26 a 27 metros), igual existen viviendas en las zonas bajas (entre 19 a 20 metros) y, por ende, susceptibles a inundarse. Situación que trae consigo eventos de inundación pronunciados, llegando a inundaciones históricas de hasta 168 cm de altura, lo que representa una afectación severa a los bienes materiales (Tabla 3).



► **Figura 9.** Curvas de nivel con equidistancia de 0.5 metros y 1 metro

Elaboración Propia.

Teniéndose como ejemplo el caso del señor Patricio, cuya vivienda se ubica en la zona más baja del pueblo (con una diferencia de hasta nueve metros con la zona más alta) (Figura 10), quien señala que ha sufrido severas inundaciones que han provocado la pérdida de sus bienes materiales y parte de su ganado porciono, los cuales son su principal fuente de ingreso. En este trabajo se identificaron cinco familias más, bajo las mismas condiciones, coincidiendo con Pacheco-Suárez *et al*. (2020), quienes mencionan que, en eventos de inundación extrema, inclusive los animales de corral se ven afectados, trayendo pérdidas económicas a sus dueños e incrementando su vulnerabilidad económica.

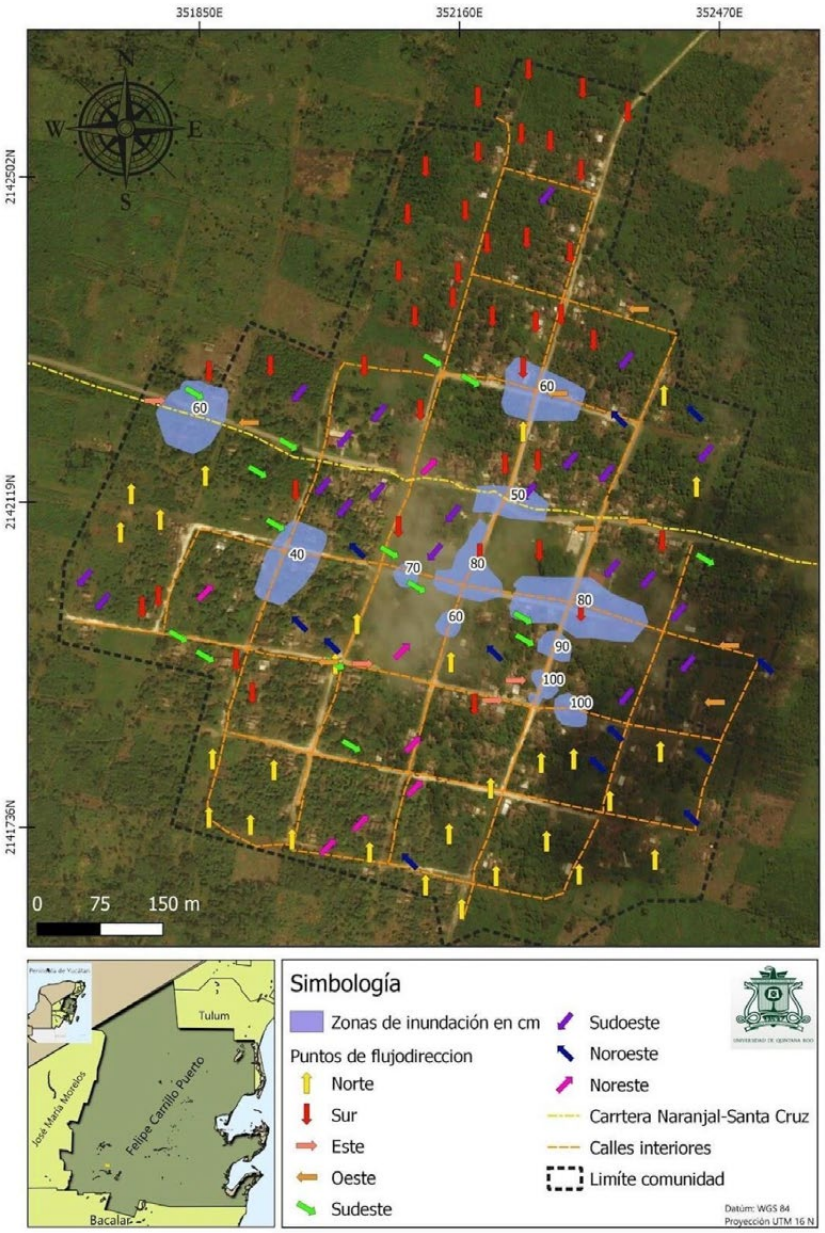
► **Figura 10.** Vivienda de familia damnificada por inundaciones durante el 2020.

Fuente: Fotografía cortesía de un habitante de la localidad (2021).

Dirección del flujo de la escorrentía pluvial dentro la comunidad Santa María poniente

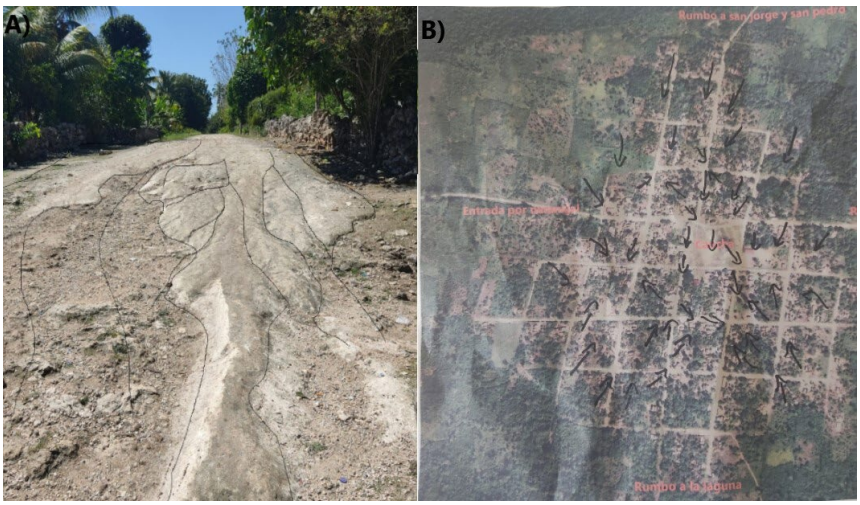
El mapa de dirección de flujo (Figura 11), construido mediante la información narrativa recabada de los participantes del grupo focal, permitió apreciar la dirección del escurrimiento hídrico producto de las lluvias, bajo la perspectiva de los habitantes locales. Se destaca que, de acuerdo con lo mencionado, las casas que se ubican en lo que ellos llaman "cuencos", son las que presentan mayores niveles de inundación, derivado de que se encuentran rodeadas de lomas y ubicadas en los puntos más bajos del poblado. Es de notar la concordancia entre lo señalado por los habitantes, sobre la dirección que toman los escurrimientos durante las lluvias intensas, y lo obtenido en la interpretación de las curvas de nivel y lo apreciado en la altura del terreno (Figura 11; Figura 12B). Cabe destacar que, según lo mencionado, el escurrimiento de las lluvias es rápido, lo que se puede explicar por el tipo de suelo (Figura 5), aunado a la compactación del mismo, conduciéndose este flujo de forma superficial, acumulándose en la superficie del terreno y fluyendo sobre este, hacia las áreas más bajas de comunidad, por lo que bajo dichas características el flujo se podría considerar de tipo hortoniano (Hernandez *et al*., 2012).

En la Figura 12A se puede observar cómo el caudal de la escorrentía causa erosión sobre el terreno (calle), evidenciándose que no sólo se ven afectadas las edificaciones, sino también la infraestructura vial, debido a que, en contraste con la zona urbana, las vialidades en el entorno rural en su gran mayoría son de terracería (calle de tierra compactada) y no de carpeta asfáltica, por lo cual son altamente susceptibles a sufrir deterioro y erosión ante factores físicos como los escurrimientos pluviales. Una de las afectaciones secundarías es la proliferación de musgo, derivado de que durante las inundaciones y lluvias esta vegetación propicia que el suelo se vuelva resbaloso, suscitando un peligro para los pobladores de edad avanzada, que suelen evitar salir de sus viviendas por miedo a sufrir una caída que repercuta en su salud.



► **Figura 11.** Dirección de la escorrentía pluvial en Santa María Poniente.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de los habitantes durante el trabajo de campo, con comprobación digitalizada (2021).



► **Figura 12.** Dirección de flujo mediante cartografía participativa.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de los habitantes durante el trabajo de campo (2021).

En la Figura 12B se observa como los habitantes definieron mediante flechas el flujo que tienen los escurrimientos pluviales en la comunidad, señalando que estos no se ven afectados por estructuras que delimitan los predios (bardas de piedra acomodada) o por cercos de madera, pero sí por las banquetas de la zona aledaña al domo que fungen como bordos que propician aún más el estancamiento de aguas.

De acuerdo con lo señalado por los habitantes en la Figura 13A se puede observar como las estructuras semipermanentes, bardas de piedras acomodadas y cercas de madera presentan grandes ranuras, las cuales facilitan la infiltración de las aguas acumuladas, por lo cual no modifican el caudal de los escurrimientos pluviales además de ser estructuras que, por sus materiales y forma de elaboración, pueden ser retirados en caso de ser necesario con relativa facilidad. En contraste con estructuras como banquetas, bardas y calles asfaltadas (Figura 13B) que por sus materiales y forma de elaboración propician encharcamientos, así como el incremento de la duración de las inundaciones. Situación mencionada por Torres-Pérez & Pérez-Monsreal (2011) quienes señalan que las banquetas mal diseñadas pueden incrementar encharcamientos, y por Larenze *et al.* (2023) quienes sostienen que el asfalto puede reducir la permeabilidad del suelo produciendo estancamiento de aguas.

► **Figura 13.** Bardas de piedra, cercos de madera, banquetas y bordos en la zona del domo.

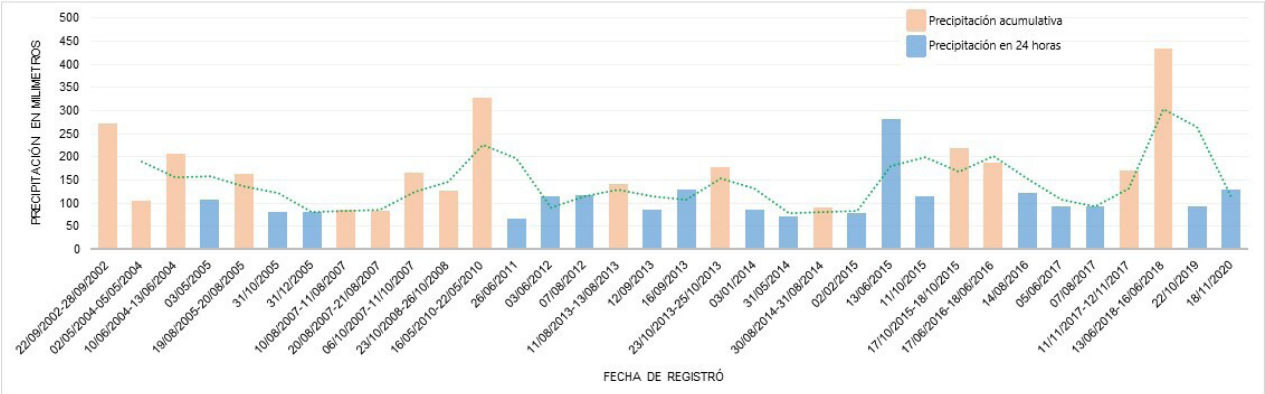
Fuente: Fotografías de los autores tomadas en campo (2020).

Análisis de los sistemas meteorológicos y las inundaciones pluviales

Respecto a la relación de las inundaciones pluviales con los sistemas meteorológicos, se identificaron bibliográficamente 34 eventos de inundación, considerando que estos ocurren con precipitaciones mayores a 60 milímetros (mm) en 24 horas a partir de datos obtenidos del histórico de precipitación proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2002-2020), con lecturas realizadas en la estación climatológica de Felipe Carrillo Puerto. De los cuales, 16 ocurrieron debido a lluvias consecutivas, es decir, a fenómenos de precipitación en periodos de 2 a 7 días, que dieron lugar a precipitaciones acumulativas "lámina total" (Figura 14). Por otra parte, se registraron 18 eventos de inundación provocados por un único evento de precipitación en 24 horas (Figura 14), que se encontró dentro de la clasificación de la Secretaría de Marina (SEMAR) (2020), en un rango de lluvia muy fuerte a extraordinaria, caracterizadas por valores de 65 mm a 282 mm.

Respecto a lo anterior, los habitantes locales mencionan que las lluvias que más afectaciones causan en la comunidad son aquellas que se producen de forma súbita e intempestiva, es decir, en un solo día, puesto que, al ocurrir en un solo día, la baja permeabilidad del suelo se satura y la infiltración de la precipitación es más tardada.

Por otra parte, con base en el registro histórico de la CONAGUA (2020), la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) (2015) y los tirantes máximos recabados mediante la memoria selectiva de los habitantes locales (Tabla 3), se identificó que los sistemas tropicales son aquellos que producen mayor incidencia de precipitación e inundación (Tabla 3, Figura 15) esto concuerda con Hernández-Cerda *et al.* (2021), quienes asocian una mayor precipitación en la península de Yucatán a dichos sistemas atmosféricos, destacando entre estos los huracanes y tormentas.



► **Figura 14.** Milímetros (mm) de precipitación durante el periodo 2002-2020.
Fuente: Elaboración propia con datos históricos de Conagua (2002-2020). Elaboración propia.

► **Figura 15.** Sistemas meteorológicos asociados a inundaciones en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos históricos de CONAGUA (2002-2020) y NOAA (2021).

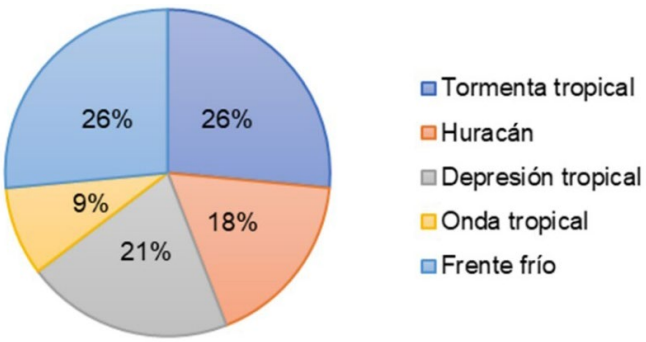


Tabla 3. Tirantes máximos (en centímetros) en las zonas inundables de Santa María Poniente.

Fecha de inundación	Lámina total en milímetros de precipitación	Tirante máximo por zona en cm										Sistema meteorológico
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	
22/09/2002-28/09/2002	272.1	90	84	100	120	150	127	167	104	132	153	Huracán Isidoro C3
02/05/2004-05/05/2004	105	48	32	56	121	81	50	65	40	51	59	Depresión tropical
10/06/2004-13/06/2004	207.4	86	64	100	150	160	89	110	80	100	96	Ondas tropicales N°.7 y 8
03/05/2005	108.2	50	33	58	125	83	52	66	42	52	61	Depresión tropical
19/08/2005-20/08/2005	163.5	75	50	88	160	110	78	100	63	79	92	Onda Tropical No. 29/Depresión Tropical José
31/10/2005	82	38	25	44	94	63	39	50	31	40	46	Remansos del huracán Wilma C4
31/12/2005	82	38	25	44	94	63	39	50	31	40	46	Frente frio N°.24
10/08/2007-11/08/2007	86.5	40	27	47	100	66	41	53	33	42	48	Bandas nubosas del huracán Dean C4
20/08/2007-21/08/2007	83.3	38	26	45	96	64	40	51	32	40	47	Huracán Dean C4
06/10/2007-11/10/2007	166.6	77	51	90	162	128	79	102	64	81	93	Depresión tropical 15
23/10/2008-26/10/2008	126	58	39	68	145	97	60	77	48	61	71	Tormenta tropical Omar
16/05/2010-22/05/2010	328	91	101	100	128	132	96	122	106	110	94	Frente frío N°.35
26/06/2011	65.6	30	20	35	76	50	31	40	25	32	37	Tormenta tropical Arlene
03/06/2012	113.6	52	35	61	131	87	54	70	44	55	64	Sistema de baja presión con 10% de evolucionar a huracán
07/08/2012	116.6	54	36	63	134	90	56	72	45	56	65	Tormenta tropical Ernesto
11/08/2013-13/08/2013	142.2	66	44	76	164	109	68	87	55	69	80	Depresión tropical con 70% de evolucionar a tormenta
12/09/2013	85.7	39	26	46	99	66	41	53	33	41	48	Tormenta tropical Ingrid
16/09/2013	128.6	59	40	69	130	89	61	79	49	62	72	Remanentes del Huracán Ingrid

Fecha de inundación	Lámina total en milímetros de precipitación	Tirante máximo por zona en cm										Sistema meteorológico
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	
23/10/2013-25/10/2013	178.4	82	55	96	106	97	85	100	69	86	100	Frente frío N°.7
03/01/2014	86.3	40	27	46	79	66	41	53	33	42	48	Frente frío N°.23
31/05/2014	70.9	33	22	38	62	54	34	44	27	34	40	Bandas nubosas del huracán Amanda C4/influencia de vaguada Monzónica
30/08/2014-31/08/2014	90.5	42	28	49	104	70	43	56	35	44	51	Tormenta tropical Dolly
02/02/2015	78.4	36	24	42	90	60	37	48	30	38	44	Frente frío N°33
13/06/2015	282.6	110	77	122	168	157	135	144	90	100	118	Depresión tropical 91-L
11/10/2015	115.6	53	36	62	133	89	55	71	44	56	65	Frente frío N°. 3
17/10/2015-18/10/2015	218.5	101	67	117	162	150	104	134	84	106	123	Frente frío N°. 7
17/06/2016-18/06/2016	186.6	86	57	100	160	130	89	115	72	90	105	Tormenta tropical Danielle/onda tropical N°.6
14/08/2016	122.4	56	38	66	141	94	58	75	47	59	69	Tormenta tropical Earl, canales de baja presión y onda tropical N°.24
05/06/2017	93.3	43	29	50	107	72	44	57	36	45	52	Nubosidad de la tormenta tropical Kalvin
07/08/2017	92.2	42	28	50	106	71	44	57	35	45	52	Tormenta tropical Franklin
11/11/2017-12/11/2017	169.9	78	52	91	166	130	81	104	65	82	95	Frente frío N°. 9
13/06/2018-16/06/2018	434.5	110	90	120	140	160	100	150	140	100	90	Zona de Inestabilidad/OT 3
22/10/2019	93.2	43	29	50	107	72	44	57	36	45	52	Frente frio N°. 6/Zona de baja presión en el Golfo
18/11/2020	130.2	60	40	70	100	90	60	80	50	63	80	Frente frío N°. 11/ondas del Huracán Eta C4

Fuente: Elaboración propia con registros históricos de CONAGUA (2002-2020) y NOAA (2015).

Conclusiones

Las zonas de inundación coinciden tanto con la interpretación de las curvas de nivel como con la percepción de los habitantes locales afectados y con los datos de las autoridades locales. El relieve de la comunidad estudiada resulta ser un factor físico que se encuentra ligado a los eventos de inundación, sin embargo, la altura interior de los predios puede acrecentar las afectaciones ante las inundaciones.

El tirante máximo de inundación depende no sólo de la altitud del terreno, sino también de la cantidad de precipitación, el tiempo de duración de ésta y el tipo de suelo. Se tiene, entonces, que los sistemas meteorológicos que más precipitación generan son los sistemas tropicales, destacando entre ellos las tormentas, como las que más lluvia dejan y, por ende, más eventos de inundación provocan.

Las construcciones de larga duración, tales como los muros de rocas dispuestas en forma de bordo maya y las cercas hechas de bajareque, no alteran el flujo de la escorrentía pluvial ni fomentan la retención de aguas, a diferencia de las estructuras permanentes como aceras y muros de bloque.

En cuanto a las afectaciones severas al patrimonio familiar, se identifican pérdidas en los cultivos del solar y mortandad en animales de corral, como cochinos y gallinas, además de daños en las viviendas, principalmente cuando las inundaciones llegan hasta los 150 cm o más. Por último, la mala planificación en el desarrollo de los asentamientos humanos se ve incrementada en la zona rural, donde inclusive sitios de resguardo ante amenazas, como los refugios (escuelas), se encuentran en un área físicamente vulnerable. Por lo cual unas de las preguntas que surge es: ¿Qué estrategias podrían implementarse para mejorar la situación de dicha comunidad ante las inundaciones?

» Referencias bibliográficas

Buss-Thofehrn, M., López-Montesinos, M. J., Rutz-Porto, A., Coelho-Amestoy, S., Oliveira-Arrieira, I. C. de, & Mikla, M. (2013). Grupo focal: una técnica de recogida de datos en investigaciones cualitativas. *Index de Enfermería*, 22(1–2), 75–78. https://doi.org/10.4321/S1132-12962013000100016

Caamal, J. (2020, June 19). Siguen inundadas nueve comunidades mayas en Felipe Carrillo Puerto. *Novedades Quintana Roo*. https://sipse.com/novedades/siguen-inundadas-nueve-comunidades-mayas-en-felipe-carrillo-puerto-369063.html.

Caamal, J. (2022, May 31). Más de 30 mil casas de la zona maya, en riesgo ante la temporada de huracanes. *Novedades Quintana Roo*. https://sipse.com/novedades/mas-de-30-mil-casas-de-la-zona-maya-en-riesgo-ante-la-temporada-de-huracanes-425861.html.

Camacho-Sanabria, J. M., Chávez-Alvarado, R., & Velázquez-Torres, D. (2019). Propuesta Metodológica para medir la Resiliencia Urbana ante Huracanes e Inundaciones en el Caribe Mexicano. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 3(2), 28. https://doi.org/10.55467/reder.v3i2.30

CENAPRED. (2023, April 5). Atlas Nacional de Riesgos. *Atlas Nacional de Riesgos*. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/

Chan, M. (2020, June 8). Familias de Naranjal Poniente vuelven a inundarse por las lluvias. *Turquesa News*. https://turquesanews.mx/felipe-carrillo-puerto/familias-de-naranjal-poniente-vuelven-a-inundarse-por-las-lluvias/

Chávez Alvarado, R. (2018). Gestión del riesgo de desastre en el caribe mexicano. El caso de estudio de Chetumal, Quintana Roo. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 2(2), 46. https://doi.org/10.55467/reder.v2i2.17

CONAGUA. (2020). *Reporte climatológico del mes de octubre de 2020 Reporte de clima en México*, Año 10, Número 10.

Diez-Tetamanti, J., Escudero, H. B., Carballeda, A., Barberena, M., Hallak, Z., Rocha, E., Massera, M., Vázquez, Z., Barceló, M., Coñuecar, V., Gómez, D., Feü, C., Martínez, N., & Romero, N. (2012). *CARTOGRAFÍA SOCIAL. Investigación e intervención desde las Ciencias Sociales, métodos y experiencias de aplicación* (1a ed.). Universidad de la Patagonia.

El Quintana Roo. (2018, June 17). S.O.S en la zona maya por inundaciones. *El Quintana Roo*. https://elquintanaroo.mx/s-o-s-en-la-zona-maya-por-inundaciones/

Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional.

Fragoso-Servón, P., Pereira Corona, A., Bautista Zúñiga, F., & Zapata Buenfil, G. de J. (2017). Digital soil map of Quintana Roo, Mexico. *Journal of Maps*, 13(2), 449–456. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1328317

Frausto, O., Ihl, T., Rojas, J., Goldacker, S., Chale, G., Giese, S., Wurl, J., Careaga, P., & Bacab, R. (2006). Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán. *Teoría y Praxis*, 2, 87–103. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456145113005

Hernandez, H., Padilla, F., & Juncosa, R. (2012). Análisis de los procesos de flujo subterráneo y superficial en problemas medioambientales: adaptación de un código numérico gestionado con SIG a la cuenca del Río Barcés, A Coruña. *Revista Real Academia Galega de Ciencias*, 31, 163–212.

Hernández, M. A., González, N., Cabral, M. G., Giménez, J. E., Hurtado, M. A., Maiola, O. C., & Hernández, M. A. (2003). Importancia de la caracterización física del riesgo hídrico en la llanura húmeda. In M. Orlando (Ed.), *Inundaciones en la Región Pampeana, Facultad de Ciencias Naturales y Museo* (pp. 159–173). Sistema nacional de Repositorios Digitales.

Hernández-Cerda, M. E., Azpra-Romero, E., & Lomas-Barrié, C. T. (2021). Cristóbal, la tormenta tropical del 2020 que dejó precipitaciones atípicas en la Península de Yucatán. *Entorno Geográfico* (Vol. 21, pp. 125–156). https://doi.org/https://doi.org/10.25100/eg.v0i21.11296

Herrera, E., Magaña, V., & Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova Scientia*, 10(21), 191–206. https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527

Huatatoca-Chimbo, J. L., & Chanaluisa-Chiliquinga, W. O. (2019). *Análisis geomorfológico de la subcuenca del Río Pambay para determinar las zonas vulnerables y inundaciones mediante el modelamiento hidrológico* [Tesis de Ingeniería]. Universidad Estatal Amazónica.

Ibisate-González, de M., Ollero-Ojeda, A., & Ormaetxea-Arenaza, O. (2000). Las inundaciones en la vertiente cantábrica del País Vasco en los últimos veinte años: principales eventos, consecuencias territoriales y sistemas de Prevención. *Revista Serie Geográfica*, 9, 177–186.

INEGI. (2020). Censo General de Población y Vivienda 2000. 2020

Larenze, G., Eugenia-Garat, M., Luna, I., Fernandez-Müller, I., Sastre, M., Farías, N., & Antonella-Lopez, M. (2023). Infiltración de agua de lluvia en mezclas asfálticas porosas. In Concordia UTN & Facultad Regional (Eds.), *Jornadas de Ciencia y Tecnología* (JorCyTec 2023) (pp. 113–136). AJEA. https://doi.org/10.33414/ajea.1302.2023

Maldonado, G. I., & Cóccaro, J. M. (2011). Esquema teórico para el estudio de la vulnerabilidad socio-territorial a inundaciones en ámbitos rurales. *Revista Geográfica Venezolana*, 52(2), 81–100. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730387006

Matías-Ramírez, L. G., Oropeza-Orozco, O., Lugo-Hubp, J., Cortez-Vázquez, M., & Jáuregui-Ostos, E. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 7–25. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56906402

Mena-Frau, C., Molina-Pino, L., Ormazábal-Rojas, Y., & Morales-Hernández, Y. (2011). Generalización de modelo digital de elevación condicionada por puntos críticos de terreno. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 17(3), 439–457. https://doi.org/10.1590/S1982-21702011000300007

Municipio de Othón P. Blanco. (2018). Programa de Desarrollo Urbano del área metropolitana de Chetumal, Calderitas, Xul-Ha.

NOAA. (2021). National hurricane center tropical cyclone report. *Tropical storm Dolly* (1-3 of september).

Novedades Quintana Roo. (2019, September 5). Atienden zonas de riesgo en Felipe Carrillo Puerto. *Diario Novedades Quintana Roo*. https://sipse.com/novedades/habitantes-comunidades-zonas-riesgo-inundaciones-felipe-carrillo-puerto-343465.html.

Novelo, C. (2017, November 15). Con el agua hasta el cuello. *De Peso*. https://depeso.com/chetumal/con-el-agua-hasta-el-cuello/.

Pacheco-Suárez, T. L., Rodríguez-Ríos, E., Loor-Bravo, L. D., & Arteaga Pita, I. G. (2020). Valoración económica del impacto de la inundación de febrero 2019 en la Unión, Santa Ana, Manabí, Ecuador. *Revista San Gregorio*, 43, 21–35. https://doi.org/https://doi.org/10.36097/rsan.v1i43.1460

Palafox-Muñoz, A., & Frausto-Martínez, O. (2008). *Turismo: desastres naturales, sociedad y medio ambiente* (Plaza y Valdes & UAQROO, Eds.; Primera Edición). SEDESOL.

Perevochtchikova, M., & de la Torre, J. L. L. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 73–98. https://doi.org/10.1353/lag.2010.0010

Pérez-Briceño, P., Alfaro, E., Hidalgo, H., & Jiménez, F. (2016). Distribución espacial de impactos de eventos hidrometeorológicos en América Central. *Revista de Climatología*, 16, 63–75.

Ribera-Masgrau, L. (2004). *Documents d'anàlisi geogràfica. In Documents d'anàlisi geogràfica (Issue 43)*. https://ddd.uab.cat/record/1370

Rosales, M. (2003). Perder la milpa: los efectos de Isidoro en comunidades del sur del estado. *Revista de La Universidad Autónoma de Yucatán*, 17(223), 54–65.

SMN. (2020). Clasificación de la precipitación acumulada en 24 horas para pronósticos a corto y mediano plazo. In Secretaria de Marina. Meteorología SEMAR.

Torres-Pérez, M. E., & Pérez-Monsreal, R. (2011). EL RETO DEL DISEÑO URBANO ARQUITECTÓNICO, TECNOLÓGICO Y SUSTENTABLE. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 6(10), 69–81. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477976550005

Velázquez-Palomares, J. (2017). *Caracterización geomorfológica del municipio de Tlacotalpan, Veracruz, con enfoque de riesgo por inundación* [Tesis de Licenciatura , Universidad Autónoma del Estado de México]. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/69492

Xiu-Chan, J. (2020, August 31). Piden construir camino alterno en el tramo Mixtequilla-Chan Santa Cruz. *Por Esto! Quintana Roo*. https://www.poresto.net/quintana-roo/2020/8/31/piden-construir-un-camino-alterno-en-el-tramo-mixtequilla-chan-santa-cruz-7540.html.

3.5 Resiliencia de la vegetación en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an ante eventos meteorológicos extremos

Gabriel Sánchez-Rivera
División de Desarrollo Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Leticia Gómez-Mendoza
Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México

Adrián Cervantes-Martínez
División de Desarrollo Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Palabras Clave: RB Sian Ka'an, resiliencia, eventos hidrometeorológicos.
ODS: 13 Acción por el Clima.

Introducción

La Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (RBSK), localizada en el estado de Quintana Roo, frente a las costas del Caribe mexicano, representa una de las más importantes áreas naturales de la región y del país por la biodiversidad que alberga, así como por su importancia como reservorio de carbono, entre otras (Brenner & Vargas del Río, 2010).

Por su parte, el estado de Quintana Roo es la región con mayor incidencia de huracanes intensos en el país, dado que se encuentra en la trayectoria de sistemas ciclónicos provenientes de las islas de Cabo Verde, los cuales recorren más de 5,000 km, ofreciendo la posibilidad de alcanzar un gran desarrollo (Rosengaus-Moshinsky, 2010). Debido a lo anterior, particularmente la porción terrestre de la reserva ha enfrentado diversidad de eventos hidrometeorológicos intensos que han incidido en la capacidad de resistencia y resiliencia de la vegetación que alberga.

Los efectos de los vientos y lluvias de gran intensidad asociados a los ciclones pueden ocasionar desastres en los sistemas naturales, no sólo por las alteraciones a la biodiversidad de la región, sino por el detrimento de los servicios ecosistémicos (Solow, 2017; van de Pol *et al.*, 2017). Por otro lado, los huracanes, las lluvias así como los vientos asociados a estos, pueden crear las condiciones propicias para la regeneración de ciertas especies capaces de resistir vientos huracanados (Snook, 1993), por lo que también pueden identificarse beneficios de los ciclones para los ecosistemas (Vink y Ahsan 2018).

En la literatura científica no se identificó una definición única y consensuada sobre el término "evento extremo", dado que depende de la disciplina y el objeto de estudio en particular desde el cual se aborde cada investigación. Una definición ampliamente aceptada sobre el concepto de eventos extremos los define como aquellos eventos que exceden algún tipo de límite en términos de magnitud, duración y frecuencia, es decir, los eventos extremos se caracterizan por presentar una amplia proporción entre el mayor impacto y un impacto típico (Décamps, 2008).

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2018) define como evento extremo aquellos que se puede identificar cuando una sola variable hidrológica, meteorológica o climática (por ejemplo, lluvia o viento) excede sus umbrales específicos (percentiles, valores absolutos fijos y/o periodos de retorno). Para ello propone el método denominado "Excedente a un umbral relativo (Exceeding a relative threshold)", el cual agrupa a los eventos en función de la rareza de su ocurrencia, clasificándolos en "muy raros" y "extremadamente raros", al superar los percentiles 90 y 99, respectivamente (WMO, 2018).

Holling (1996) definió la resiliencia como la magnitud de la perturbación que un sistema puede absorber antes de que este cambie su estructura, al modificarse las variables y los procesos que controlan su comportamiento. Mientras que Oliver *et al.* (2016) plantean que en el concepto de resiliencia ecológica, se reconoce la existencia de múltiples estados estables y la capacidad de ellos para resistir los "cambios de régimen" entre estados alternativos. Por su parte, Ghazoul y Chazdon (2017) sugieren que para poder comprender los procesos que derivan en que un ecosistema padezca el menoscabo de su dinámica y rendimiento funcional, es necesario realizar estudios desde diferentes escalas espaciotemporales y dimensionales.

Buma y Wessman (2011), y Van de Pol *et al.* (2017), plantean que gran parte del conocimiento de las capacidades de resiliencia de los ecosistemas se tiene a partir del estudio de perturbaciones provocadas por eventos singulares, sin considerar los efectos derivados de múltiples eventos perturbadores, por lo que Hodgson *et al.* (2015) y Nimmo *et al.* (2015) proponen un modelo teórico bivariado en el cual la resiliencia se puede estudiar a partir de dos variables: "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (resiliencia), donde la resistencia está representada por la medida en que un sistema absorbe una perturbación externa, y la resiliencia se estima determinando la tasa de recuperación, que refleja la capacidad de retorno a condiciones equivalentes previas a la perturbación (Bhaskar *et al.*, 2018).

Si bien, para comprender la dinámica de los procesos de recuperación de los ecosistemas, se requiere contar con datos previos y posteriores a la ocurrencia de eventos perturbadores extremos, la toma de muestras y mediciones en campo se puede ver restringida a causa de los daños y el bloqueo de accesos a los sitios (Holm *et al.*, 2017). Por lo que los métodos indirectos, como la utilización de imágenes derivadas de satélites, presentan una alternativa para estimar el alcance espaciotemporal de las afectaciones. Las técnicas de percepción remota con productos diseñados para registrar diferentes rangos del espectro electromagnético han posibilitado la combinación algebraica de bandas espectrales capaces de detectar variaciones en la cubierta vegetal, recibiendo el nombre de "índices verdes". El Índice Normalizado de Vegeración (NDVI, por su siglás en inglés) es el más utilizado para la detección de cambios espaciotemporales de la vegetación (Yengoh *et al.*, 2016).

Autores como Parker *et al.* (2018) cuantificaron el cambio en la vegetación aplicando el NDVI e imágenes Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging), tras el paso de los huracanes Jova (2011) y Patricia (2016). Otros estudios a gran escala, aplicando técnicas de muestreo, son los de Jimenez-Rodríguez *et al.* (2018), quienes identificaron la relación de la estructura y composición de la selva, capacidad de recuperación y magnitud del daño.

El objetivo de este estudio consistió en evaluar la capacidad de resiliencia de la vegetación ante el impacto e interacción de múltiples eventos hidrometeorológicos intensos ocurridos en distintos estadios temporales, mediante el análisis de series de tiempo, a través de un modelo bivariado de resistencia y taza de recuperación, medido en función de la actividad fotosintética, estimada a partir del índice normalizado de vegetación (NDVI).

Los resultados obtenidos inciden en el complimiento de los ODS: 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, y 15. Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica. (Raj et al., 2022)

Materiales y métodos

Área de estudio

La Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (RBSK) fue decretada en el año 1986, con la finalidad de crear una zona de protección, mejoramiento, conservación y restauración de los sistemas ecológicos contenidos en ella (CONANP, 2022). Se localiza en la zona sur del estado de Quintana Roo, en las coordenadas 19° 05'- 20° 08' N, 87° 23'- 88° 03' W. comprende aproximadamente 528,000 ha, de las cuales cerca de 120,000 ha son marinas Figura 1.

► **Figura 1.** Mapa de localización de la zona terrestre de la RBSK.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la información de la sexta serie de uso del suelo y vegetación (INEGI, 2015), en la RBSK se presentan los siguientes tipos de vegetación:

- Selva baja y mediana subperennifolia
- Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia
- Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subperennifolia
- Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia
- Manglar
- Tular
- Vegetación de Petén
- Vegetación de dunas costeras

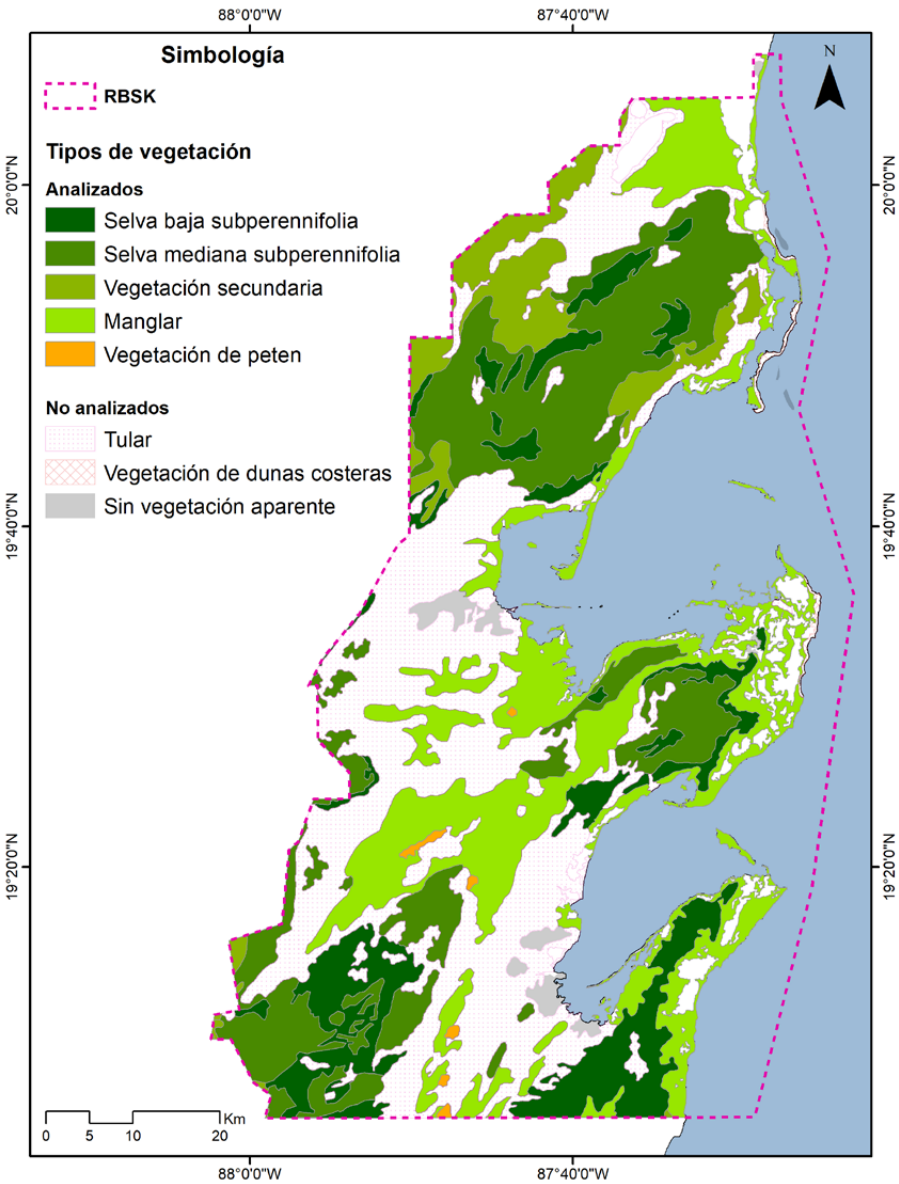
El presente estudio analiza las capacidades de resiliencia de la vegetación de tipo selva baja y mediana, vegetación secundaria, manglar y petén, las cuales fueron reclasificadas como se muestra en el Tabla 1.

Tabla 1. Reclasificación de usos de suelo y vegetación.

ID	Clave	Descripción	Superficie [Ha]	Porcentaje de ocupación [%]
1	SB	Selva baja subperennifolia (SBQP; SBQ)	51,308.96	8.6%
2	SM	Selva mediana subperennifolia (SMQ)	95,046.84	16.0%
3	VS	Vegetación secundaria (VSA/SBQ; VSA/SMQ; VSa/SMQ	26714.89	4.5%
4	PT	Vegetación de peten	1,223.73	0.2%
5	VM	Manglar	92,049.17	15.5%

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2015).

En la Figura 2 se presenta la distribución de las clases de vegetación dentro de la RBSK y las consideradas para el análisis de la resiliencia.



► **Figura 2.** Distribución espacial de los usos de suelo y tipos vegetación dentro de la RBSK, considerados para el análisis de la resiliencia.

Fuente: Elaboración propia.

Datos y métodos

A través de la cuantificación de los cambios en la cobertura, tomando como criterio principal la respuesta fotosintética de la vegetación, se efectuó el análisis e identificación de efectos resultantes de la interacción de eventos intensos en categoría de extremos sobre la vegetación presente en la RBSK, analizando series de tiempo del NDVI (IRI, 2019), lo que permitió evaluar los cambios en la vegetación (Albalawi & Kumar, 2013; Anyamba & Tucker, 2005; Bai *et al*., 2008; Cook & Pau, 2013; de Jong *et al*., 2011; Shalaby & Tateishi, 2007; Symeonakis & Drake, 2004; Townshend *et al*., 2012).

Los productos derivados de imágenes satelitales fueron adquiridos y procesados desde la plataforma de análisis espacial basada en la nube Google Earth Engine (GEE, 2022c), utilizando las siguientes colecciones:

- *CHIRPS Pentad: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data. V2.0 Final* (Funk *et al*., 2015).
- *MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global* (USGS, 2022b).
- *MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global* (USGS, 2022b).
- *USGS Landsat 5, 7 y 8. Surface Reflectance Tier 1* (USGS, 2022a).

A partir de la base de datos del *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS, 2019), versión "v04r00", se obtuvieron las características y trayectorias de los ciclones utilizados para el presente trabajo.

Para estimar los periodos de sequía se utilizó como parámetro de referencia la serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) calculado a 3 meses (SPI-3M). La información fue adquirida de la base de datos de la biblioteca de datos climáticos del International Research Institute for Climate and Society (IRI, 2022).

Finalmente, los modelos considerados para estimar la resiliencia de la vegetación fueron los siguientes:

Indice Normalizado de Vegetación (NDVI)

La estimación y comparación estadística de la capacidad de resiliencia ecológica (Holling 1996) se obtuvieron mediante la comparación de los valores del NDVI, propuesta por Rouse *et al*. (1973), antes y después del paso por tierra de los ciclones tropicales.

El NDVI se calcula como la diferencia normalizada de dos bandas espectrales (rojo e infrarrojo cercano), cuya variación estandarizada queda dentro del rango de -1 a +1. La Ecuación 1) para su cómputo se define como:

► **Ecuación 1.** Determinación del NDVI. Fuente: (Rouse *et al*. 1973).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Donde:
NDVI = Índice normalizado de vegetación.
NIR = Infrarrojo cercano.
R = Rojo.

Modelo Land-Trendr (LT-GEE)

Se aplicó el modelo LT-GEE para discriminar la variación anual de la fenología de la vegetación en los valores de NDVI y poder diferenciar los cambios bruscos asociados a diversos eventos perturbadores. Dicho modelo está conformado por un conjunto de algoritmos desarrollados para la detección de cambios a partir de series temporales obtenidas de imágenes satelitales de resolución moderada, que permite recrear la historia de un pixel o un área determinada, considerando cualquier banda o índice espectral, identificando los cambios en la masa forestal a partir de puntos de ruptura

o interrupción (vértices) que separan los periodos de cambio duradero o estabilidad en la trayectoria espectral, descartando los cambios asociados a los procesos fenológicos (Goeking & Menlove, 2017; Kennedy *et al*., 2018).

Land-Trendr, en Google Earth Engine (LT-GEE), utiliza la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945) para evaluar tendencias monotónicas (sin estacionalidad) en datos discretos (no de punto flotante), con lo que busca detectar la existencia de tendencias crecientes o decrecientes y su magnitud "pendiente de Sen" (GEE, 2022a).

El modelo se ejecuta a partir de la función "*Temporal Segmentation Land-Trendr*", integrada en el conjunto de algoritmos de GEE (2022b), a partir de la cual se determinan los puntos de interrupción (vértices), bajo un modelo estadístico armónico/lineal por partes.

La ecuación utilizada es la siguiente (Ecuación 2):

$$Y = A + B \times t + C \times cos(2 \times \pi \times temp\ (t)) + D \times sin(2 \times \pi \times temp\ (t)) + E \times cos(4 \times \pi \times temp\ (t)) + F \times sin(4 \times \pi \times temp(t)) + \ldots$$

► **Ecuación 2.** Determinación del coeficiente de correlación de Pearson.

Fuente: GEE (2022b).

Donde:
t t = hora de inicio de la imagen.
temp (t) temp (t) = año fraccionario de la hora de inicio.

Modelo teórico bivariado

La cuantificación de los componentes de la resiliencia en el modelo propuesto se efectuó considerando las siguientes Ecuaciones (3 a 5):

- Marco de resistencia-resiliencia.

$$Resistencia = (T2 - T1)$$

$$Tasa\ de\ recuperación = (T3 - T2) / \Delta T$$

► **Ecuación 3.** Resistencia.

► **Ecuación 4.** Tasa de recuperación.

Fuente: Bhaskar *et al*. (2018).

Donde:
T1 = valor máximo previo al punto de interrupción (evento perturbador).
T2 = valor mínimo posterior al punto de interrupción (evento perturbador).
T3 = máximo valor registrado previo a la ocurrencia de un nuevo punto de interrupción (nuevo evento perturbador).

Adicionalmente se calculará un índice de resiliencia con la finalidad de comparar los efectos provocados por múltiples eventos extremos en una misma área con temporalidades distintas, de acuerdo con lo propuesto por Nimmo *et al*. (2015).

- Cálculo de la Resiliencia como "porcentaje de cambio" (Índice de resiliencia).

$$Resilencia = \frac{T3/T1}{T2/T1}$$

Donde:
Cambio Neto = $T3/T1$ $T3/T1$
Cambio asociado a una perturbación= $T2/T1$ $T2/T1$

► **Ecuación 5.** Índice de resiliencia

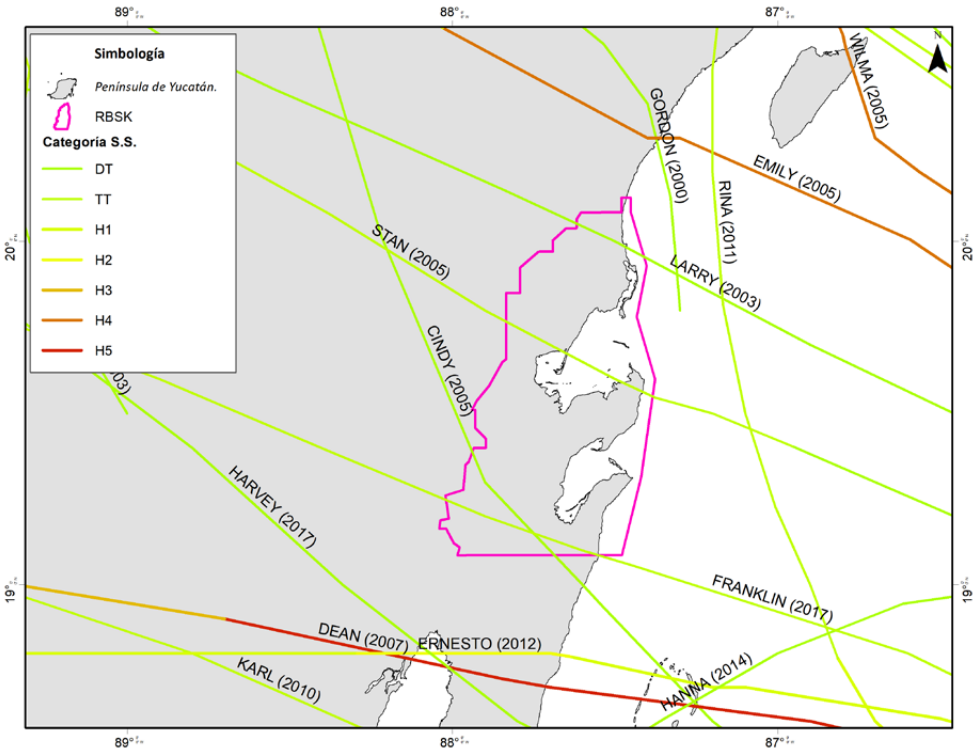
Fuente: Nimmo *et al*. (2015).

T1=valor máximo previo al punto de interrupción (evento perturbador).
T2=valor mínimo posterior al punto de interrupción (evento perturbador).
T3=máximo valor registrado previo a la ocurrencia de un nuevo punto de interrupción (nuevo evento perturbador).

Resultados

Caracterización de eventos hidrometeorológicos extremos

En el perido comprendido entre los años 2000-2020 impactaron 30 ciclones en la península de Yucatán, de los cuales Larry (2000), Cindy (2005), Stan (2005) y Franklin (2017) lo hicieron directamente a través de la RBSK. Por su parte, los ciclones en



► **Figura 3.** Trayectoria de ciclones tropicales.

Fuente: Elaboración propia con datos del IBTrACS (2019).

categoría de huracán de mayor intensidad registrados durante el periodo de estudio y que cuyos efectos incidieron directamente sobre la RBSK fueron: Emily (2005), Dean (2007) y Ernesto (2012) (Figura 3).

De acuerdo con lo reportado por Sánchez-Rivera *et al.* (2021), los ciclones en categoría de extremos han cruzado la península, en función de la rareza de su ocurrencia de acuerdo con los criterios del IPCC (2012, 2014), fueron Gilberto (1988) y Wilma (2005), en categoría de "extremadamente raros", por encontrarse en los límites de los umbrales (percentiles) máximo (99.9) y mínimo (0.1) para las variables velocidad máxima de vientos sostenidos y mínima presión atmosférica. Y en categoría de "muy raros", los huracanes Janet (1955), Mitch (1998) y Dean (2007) que superaron los rangos: máximo (99.0) y mínimo (1.0) percentiles.

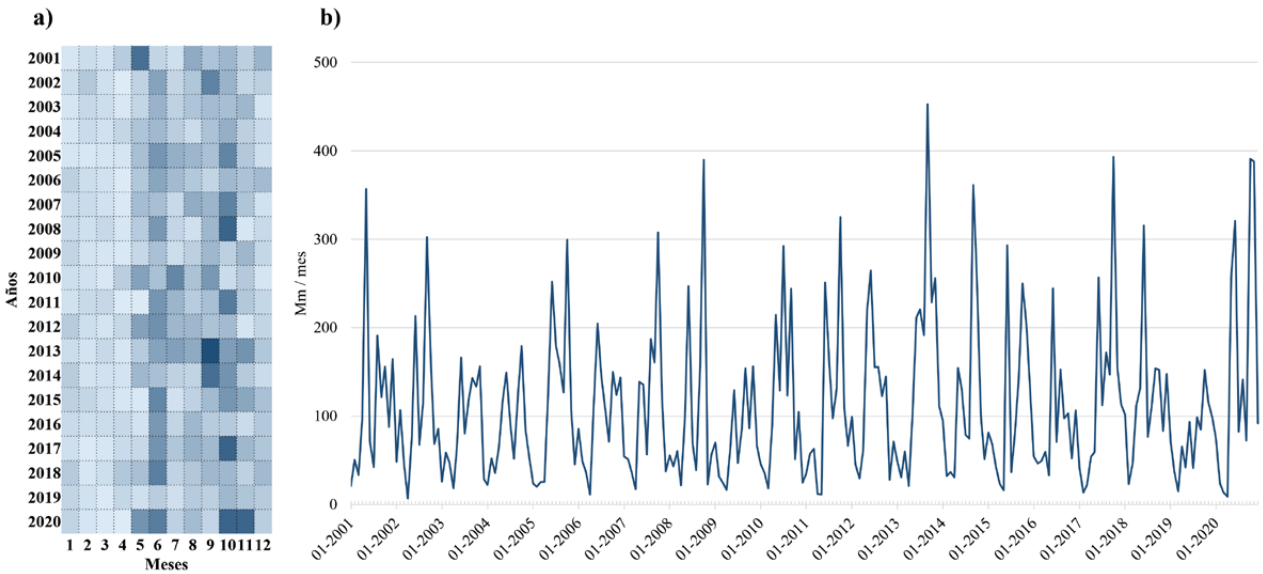
Durante el periodo 2001-2020 se registró en la zona de estudio una lluvia promedio de 110.54 ± 90.14 mm/mes. Los meses que presentaron los valores máximos de lluvia acumulada corresponden a septiembre de 2013 (452.81 mm/mes), octubre de 2017 (393.29 mm/mes), octubre 2020 (390.72 mm/d), octubre 2008 (389.80 mm/d) y noviembre 2020 (387.75 mm/mes). El mínimo de lluvia acumulada se registra en el mes de abril de 2002, con un valor de 6.75 mm/mes. En la gráfica de la Figura 4 se aprecia el comportamiento de los valores medios mensuales para el periodo reportado.

Al aplicar el modelo "excedente a un umbral relativo", para caracterizar los eventos en función de su probabilidad de ocurrencia, se identificaron los meses de septiembre de 2013, octubre de 2017 y 2020 como "extremadamente raros" al superar la marca del percentil 99, mientras que los meses de mayo de 2001, junio de 2018 y 2020, septiembre de 2013, octubre de 2008 y 2011, así como noviembre de 2020, como "muy raro" al superar la marca del percentil 90. La distribución de los valores de lluvia acumulada mensual con respecto a los umbrales de referencia seleccionados se muestra en la Figura 5.

Durante el año 2000 se registraron los valores del SPI mínimos para el periodo estudiado, los niveles más cercanos se presentaron entre 2010 y 2011. En el mismo año 2020 se presentan, de manera contrastante, las lluvias máximas registradas para la zona de estudio.

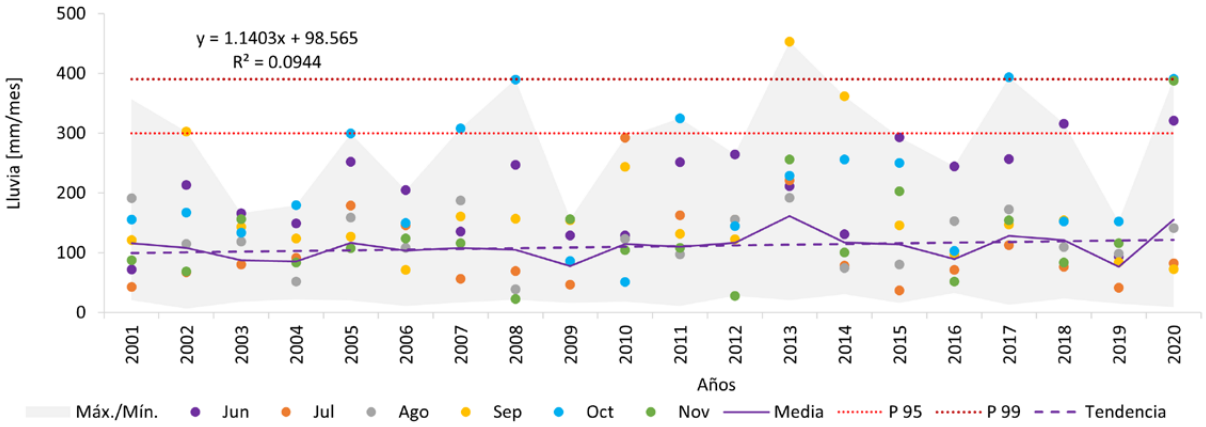
Con la finalidad de identificar patrones de correlación entre la ocurrencia e intensidad de ciclones tropicales y lluvia mensual acumulada, el índice estandarizado de precipitación (SPI-3m) y la ocurrencia del fenómeno de El niño (ONI) durante el periodo 2000–2020, se graficaron los valores como se muestra en la Figura 6.

En el periodo de estudio 2000-2020 se presentaron un total de 10 eventos de El Niño, de los cuales ocho se clasificaron entre débiles y moderados, y únicamente los ocurridos entre los años 2007-2008 y 2010-2011, correspondieron a fuertes. En cuanto a la presencia de La Niña, se registraron siete eventos, seis clasificados entre débiles y moderados, y sólo el de los años 2015-2016 como muy fuerte.



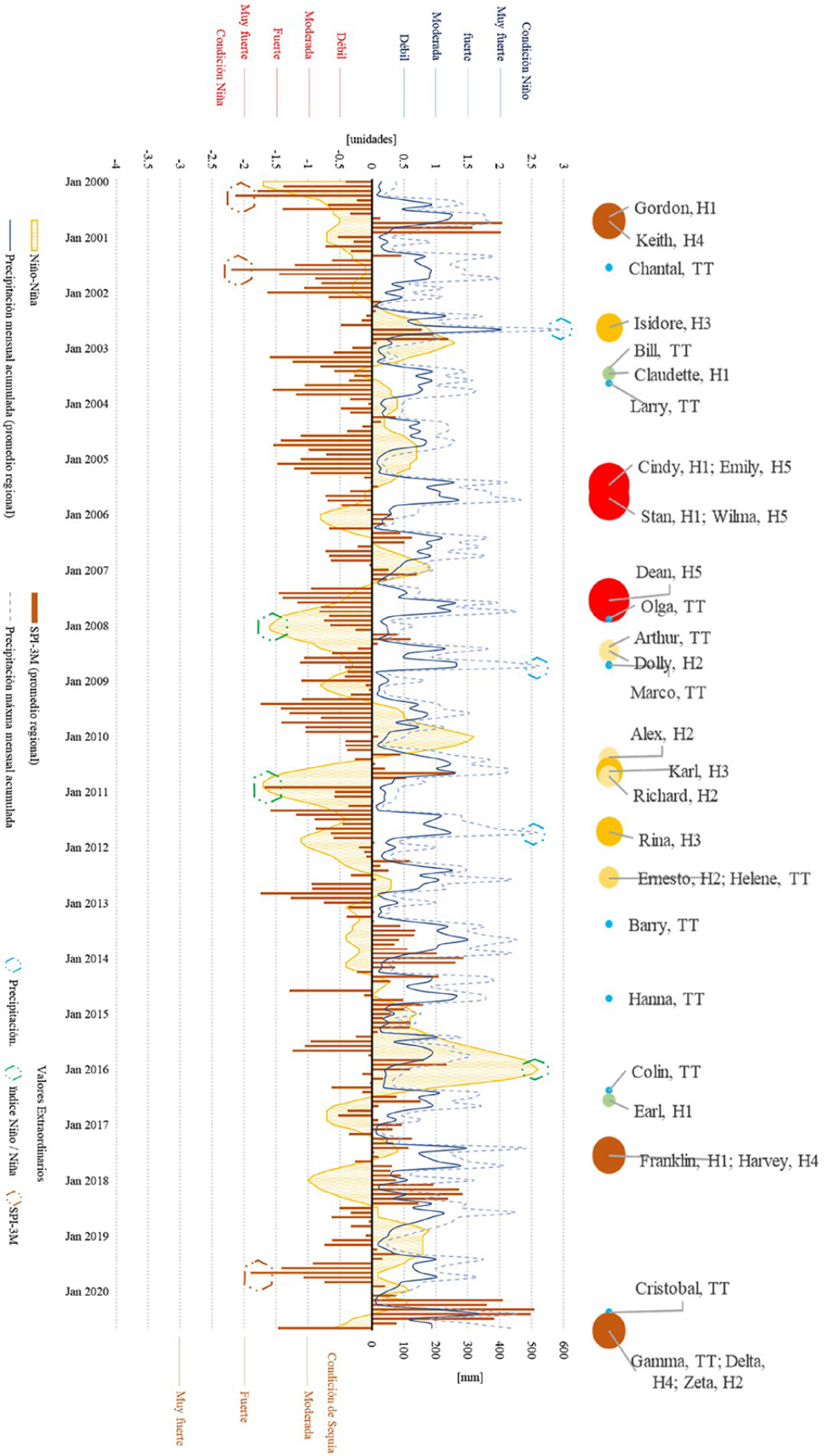
► **Figura 4:** a) Diagrama de intensidad mensual de lluvia dentro de la RBSK; b) serie de tiempo de lluvia acumulada mensual [mm/mes] para el periodo 2001-2020.

Fuente: Elaboración propia con datos del CHIRPS Pentad (Funk *et al.*, 2015).



► **Figura 5:** Distribución de los valores de lluvia acumulada mensual en el periodo 2001-2020. Los puntos de colores muestran la distribución de los meses que comprenden la temporada de ciclones en el Atlántico Norte y P 90 y P 99 representan los percentiles del umbral de referencia.

Fuente: Elaboración propia con datos del CHIRPS Pentad (Funk *et al.*, 2015).



► **Figura 6:**
Diagrama comparativo entre ciclones tropicales, lluvia mensual acumulada, SPI-3m y ONI. 2000 – 2020.

Fuente: Elaboración propia con datos del CHIRPS Pentad (Funk et al., 2015), IBTrACS (2019), IRI (2022), NOAA (2022).

Estimación de la resiliencia de la vegetación de la RBSK

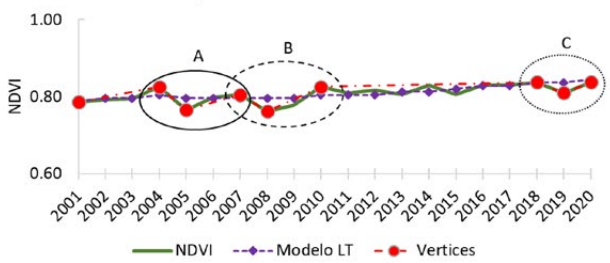
Para estimar la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva baja y mediana, vegetación secundaria, manglar y petén, se realizó el análisis de los resultados derivados de la aplicación del modelo no paramétrico Land-Trendr (LT-GEE), los cuales permitieron identificar los puntos de disrupción anual de la actividad fotosintética de la vegetación, descartando los cambios asociados a los procesos fenológicos. Con base en los puntos de disrupción identificados se estimó la resistencia medida en términos del porcentaje de cambio del NDVI, la tasa de recuperación a estadios estables similares o cercanos a los que presentaba la vegetación previa al momento de la disrupción, el cambio neto, así como la resiliencia, estimada en términos del porcentaje de recuperación.

Los resultados para cada tipo de vegetación considerada en el estudio se presentan a continuación.

Selva baja subperennifolia (SB)

La selva baja presentó tres puntos de disrupción principales, los cuales se registran en los años 2005, 2008 y 2019 (Figura 7i). La máxima disminución del NDVI fue de 7.5% en el año 2008, con una recuperación en un lapso de un año y un superávit cercano a 2.5% (Figura 7ii). En los tres escenarios, la vegetación se aproximó o alcanzó valores de recuperación total. En cuanto al análisis global, en el periodo de los 20 años analizados, los resultados reportan una ganancia neta de la actividad fotosintética del orden del 6%. Lo que indica una alta capacidad de resistencia y resiliencia ante eventos de hidrometeorológicos intensos (Figura 7iii). En la Figura 7iv se muestran los mapas con los valores del NDVI para el inicio y final del periodo analizado, así como el del año donde se registra el menor valor de actividad fotosintética.

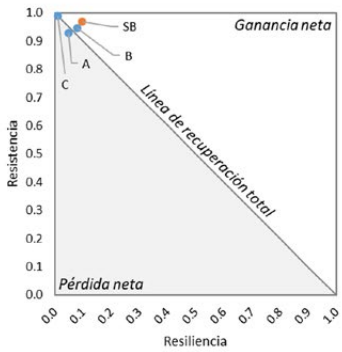
i) Modelo Land-Trendr



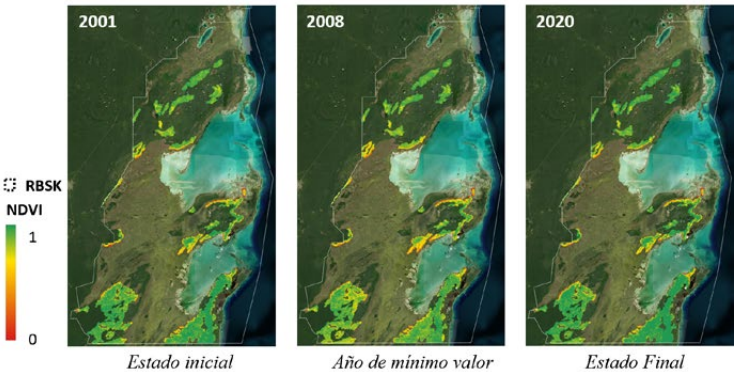
ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia

Escenario	Resistencia (Perturbación) [%]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	-7%	0.02	-2.43%	97.57%
B	-5%	0.03	2.49%	102.49%
C	-1%	0.01	0.00%	100.00%
SB	-3%	0.01	6.61%	**106.61%**

iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia



iv) NDVI promedio anual *(SB-Selva baja subperennifolia)*



► **Figura 7:** Análisis de la resiliencia de la selva baja subperennifolia. i) Modelo Land-Trendr; ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia, donde valores superiores a 100% indican un superávit en la recuperación de la vegetación en términos del NDVI; iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia, donde A, B y C corresponden a los escenarios donde se presentan los principales eventos de disrupción; iv) NDVI promedio para tres estados, inicial, mínimo valor registrado en el periodo y estado final.

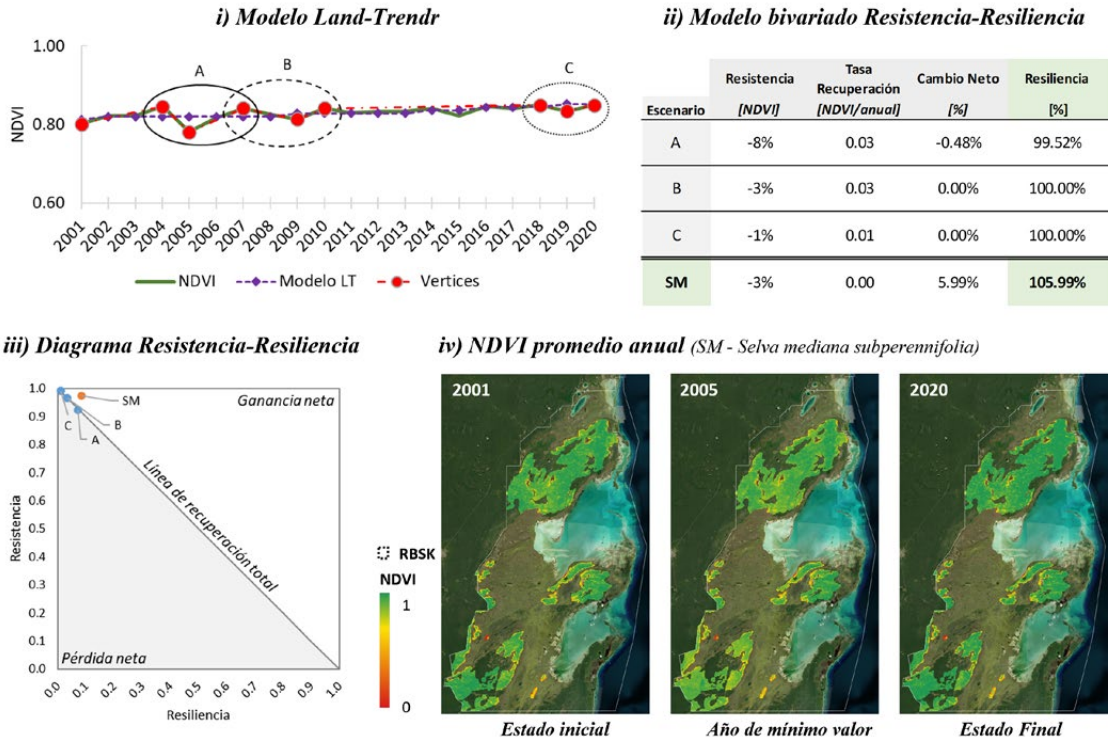
Fuente: Elaboración propia.

Selva mediana subperennifolia (SM)

En el periodo estudiado de 20 años, los resultados indican que la vegetación presentó tres episodios de disrupción 2005, 2009 y 2019 (Figura 8i).

La máxima disminución del NDVI fue de 8% en el año 2005, con una recuperación en un lapso máximo de un año, alcanzando una recuperación de más del 99% (Figura 8ii). En los escenarios "B" y "C" la disminución de los valores del NDVI fueron menores al 3%, alcanzando una recuperación total en menos de un año.

En el análisis global, los resultados del modelo LT-GEE muestran impactos poco significativos a lo largo del periodo estudiado, reportando una ganancia neta de la actividad fotosintética del orden del 6%. Similar a la de las selvas bajas (Figura 8iii). En la Figura 8iv se muestran los mapas con los valores del NDVI para el inicio y final del periodo analizado y el del año donde se registra el menor valor de actividad fotosintética.



Escenario	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	-8%	0.03	-0.48%	99.52%
B	-3%	0.03	0.00%	100.00%
C	-1%	0.01	0.00%	100.00%
SM	-3%	0.00	5.99%	**105.99%**

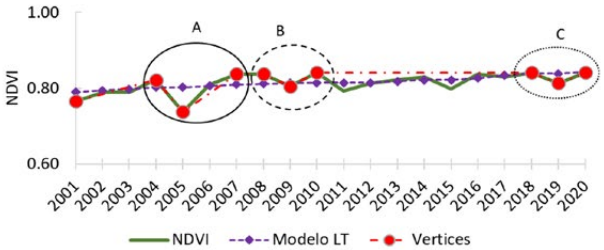
► **Figura 8:** Análisis de la resiliencia de la selva mediana subperennifolia. i) Modelo Land-Trendr; ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia, donde valores superiores a 100% indican un superávit en la recuperación de la vegetación en términos del NDVI; iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia, donde A, B y C corresponden a los escenarios donde se presentan los principales eventos de disrupción; iv) NDVI promedio para tres estados, inicial, mínimo valor registrado en el periodo y estado final.

Fuente: Elaboración propia.

Vegetación secundaria (VS)

La vegetación secundaria presenta los mismos eventos de disrupción que la vegetación baja y mediana (Figura 9i). En el año 2005 donde se tuvo la mayor disminución de la actividad fotosintética, en el orden del 10%, por su parte, las disrupciones de los años 2009 y 2019 registraron una reducción cercana al 4% (Figura 9ii). De igual forma, en todos los casos la respuesta ante los eventos perturbadores alcanzó la recuperación total en lapsos de un año o menos. En términos globales, la tendencia de la vegetación fue al alza (Figura 9iii), reportando un incremento cercano al 10% en 20 años. En la Figura 9iv se muestran los mapas con los valores del NDVI para el inicio y final del periodo analizado y el del año donde se registra el menor valor de actividad fotosintética.

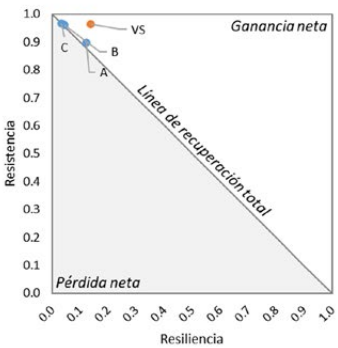
i) Modelo Land-Trendr (LT-



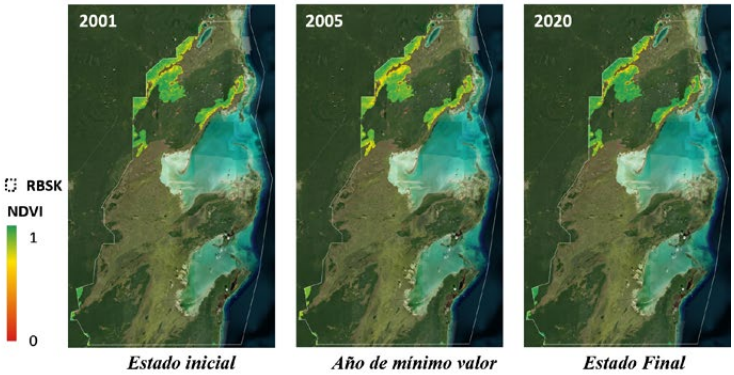
ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia

Escenario	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	-10%	0.05	1.97%	101.97%
B	-4%	0.04	0.49%	100.49%
C	-3%	0.03	0.01%	100.01%
VS	-4%	0.01	9.92%	**109.92%**

iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia



iv) NDVI promedio anual *(VS - Vegetación secundaria)*



► **Figura 9:** Análisis de la resiliencia de la vegetación secundaria. i) Modelo Land-Trendr; ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia, donde valores superiores a 100% indican un superávit en la recuperación de la vegetación en términos del NDVI; iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia, donde A, B y C corresponden a los escenarios donde se presentan los principales eventos de disrupción; y iv) NDVI promedio para tres estados, inicial, mínimo valor registrado en el periodo y estado final.

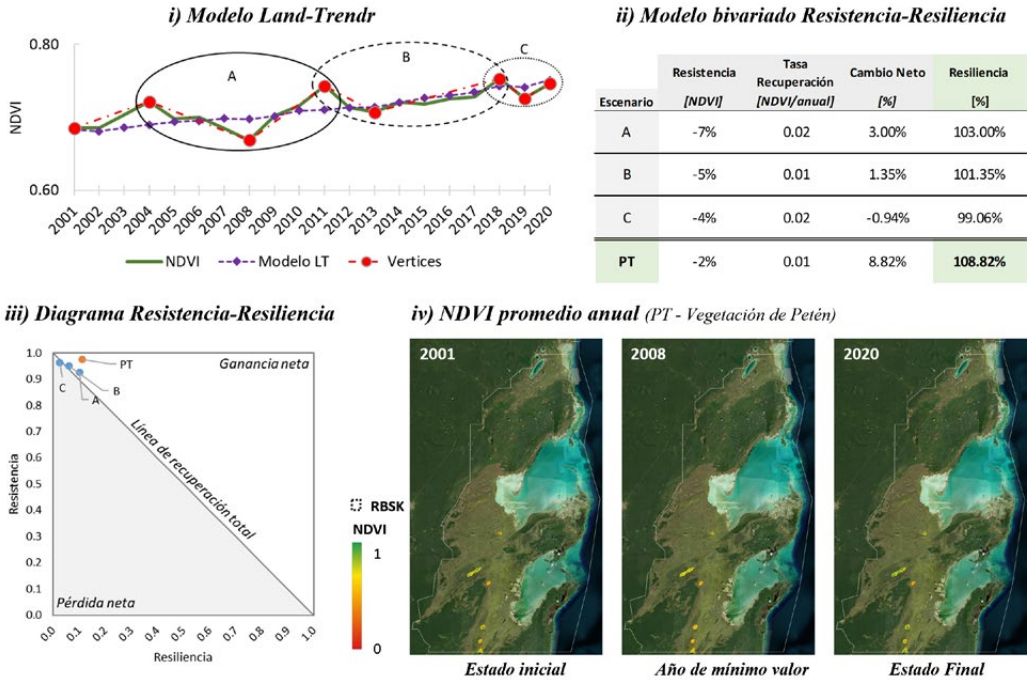
Fuente: Elaboración propia.

Vegetación de petén (PT)

La vegetación de petén es la que ocupa la menor superficie de la RBSK, con tan sólo un 0.2%. Entre los años 2004 y 2008 presentó una tendencia a la disminución de los valores del NDVI, con un máximo aproximado del 7% y con una recuperación total en el lapso de un año, así como un incremento del 3% para el 2011. Posteriormente lo resultados del modelo reportan dos escenarios de disrupción en los años 2013 y 2019 (Figura 10i). La vegetación de petén es la que registra los mayores periodos de recuperación a estados estables equivalentes a los que se tenían antes de los eventos perturbadores. Sin embargo, la diferencia en los valores del NDVI, con relación al primer año estudiado (2001) fue no mayor al 2% (Figura 10ii), por lo que en todos los escenarios la recuperación fue total (Figura 10ii). En la Figura 10iv se muestran los mapas con los valores del NDVI para el inicio y final del periodo analizado y el del año donde se registra el menor valor de actividad fotosintética. Durante el periodo estudiado la tendencia general de la vegetación fue positiva, presentando un incremento global del orden del casi 9% en 20 años.

Manglar (VM)

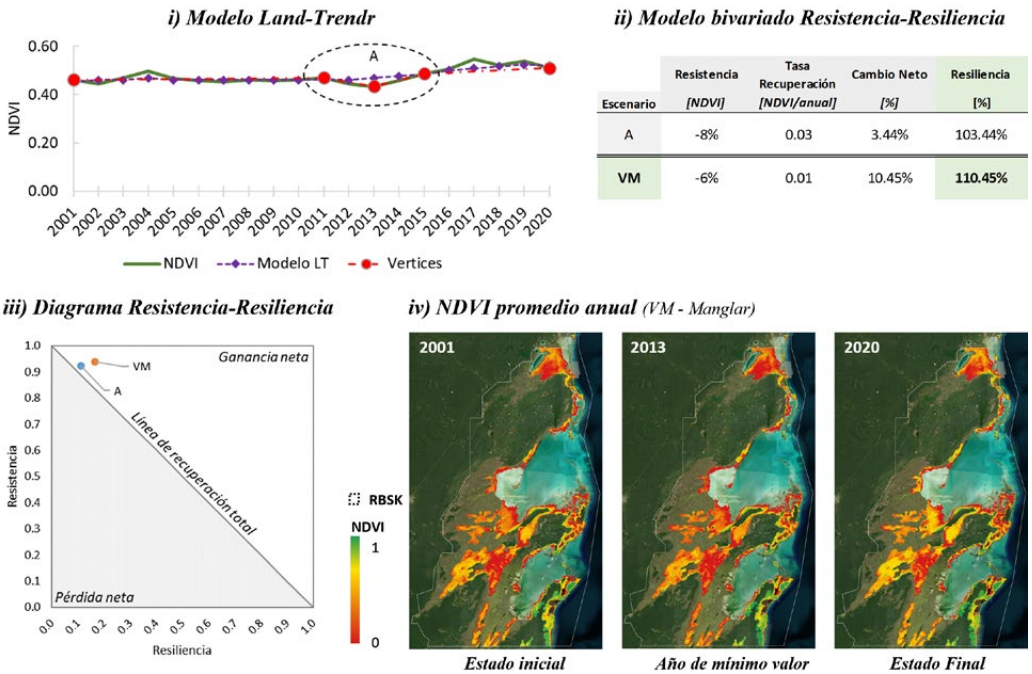
La vegetación de manglar presenta una tendencia constante y ligeramente al alza, registrando, de acuerdo con el modelo LT-GEE, sólo un evento de disrupción en el año 2013 (Figura 11i). La máxima pérdida reportada es del orden del 8%, con una recuperación total en menos de un año (Figura 11ii). En términos globales, la vegetación tuvo un incremento cercano al 10%, siendo ésta la que menores fluctuaciones registró (Figura 11iii). En la Figura 11iv se muestran los mapas con los valores del NDVI para el inicio y final del periodo analizado y el del año donde se registra el menor valor de actividad fotosintética.



Escenario	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	-7%	0.02	3.00%	103.00%
B	-5%	0.01	1.35%	101.35%
C	-4%	0.02	-0.94%	99.06%
PT	-2%	0.01	8.82%	**108.82%**

► **Figura 10:** Análisis de la resiliencia de la vegetación de petén. i) Modelo Land-Trendr; ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia, donde valores superiores a 100% indican un superávit en la recuperación de la vegetación en términos del NDVI; iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia, donde A, B y C corresponden a los escenarios donde se presentan los principales eventos de disrupción; y iv) NDVI promedio para tres estados, inicial, mínimo valor registrado en el periodo y estado final.

Fuente: Elaboración propia.



Escenario	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	-8%	0.03	3.44%	103.44%
VM	-6%	0.01	10.45%	**110.45%**

► **Figura 11:** Análisis de la resiliencia de la vegetación de manglar. i) Modelo Land-Trendr; ii) Modelo bivariado Resistencia-Resiliencia, donde valores superiores a 100% indican un superávit en la recuperación de la vegetación en términos del NDVI; iii) Diagrama Resistencia-Resiliencia, donde A, B y C corresponden a los escenarios donde se presentan los principales eventos de disrupción; y iv) NDVI promedio para tres estados, inicial, mínimo valor registrado en el periodo y estado final.

Fuente: Elaboración propia.

Entre los años 2004 y 2005, se presentó en la península de Yucatán un periodo de sequías moderadas y, hacia el periodo de otoño del 2005, el impacto de cuatro ciclones tropicales, Cindy (2005), Stan (2005), Emily (2005) y Wilma (2005), de los cuales, los dos primeros cruzaron por el territorio de la RBSK. Estos eventos en su conjunto pudieron tener incidencia directa en lo eventos de disrupción reportados por el modelo LT-GEE, particularmente para el caso de la vegetación de selva baja y mediana, vegetación secundaria y petén. En contraste, posterior al periodo de sequía y como resultado de las lluvias asociadas a los ciclones, la vegetación tendió a la recuperación, presentando tazas de recuperación que le permitieron alcanzar valores iguales o equivalentes a los registrados previamente, en periodos de un año o menos.

Entre el 2007 y el 2008 se registró la presencia del fenómeno de La Niña seguido de un periodo de sequía moderada. Estos eventos pueden estar asociados a la segunda disrupción reportada por el modelo LT-GEE, salvo en el caso de la vegetación de manglar.

El tercer punto de disrupción registrado se da hacia el año 2019, el cual coincide con un periodo de sequía fuerte, el cual se ve interrumpido por un periodo de máximas lluvias asociadas a los eventos ciclónicos ocurridos durante el año 2020.

Conclusiones

Los resultados derivados de la aplicación del modelo no paramétrico Land-Trendr (LT-GEE) permitieron identificar puntos de disrupción anual de la actividad fotosintética de la vegetación, indicando una alta capacidad de resistencia y resiliencia ante eventos hidrometeorológicos intensos, evidenciado por la ganancia neta de la actividad fotosintética.

La vegetación secundaria presentó los mismos eventos de disrupción que la vegetación baja y mediana. El año 2005 es dónde se presenta la mayor disminución de la actividad fotosintética, en el orden del 10%. Las disrupciones encontradas en los años 2009 y 2019 registraron una reducción cercana al 4%, sin embargo en todos los casos se alcanzó una recuperación total en lapsos de un año o menos.

Entre los años 2004 y 2005 se presentó, en la península de Yucatán, un periodo de sequías moderadas y, hacia el periodo de otoño del 2005, el impacto de cuatro ciclones tropicales. De los cuales los eventos hidrometeorológicos (Cindy 2005, Stan 2005, Emily 2005 y Wilma 2005, los dos primeros cruzaron por el territorio de la RBSK) pudieron tener incidencia en lo eventos de disrupción reportados por el modelo LT-GEE, particularmente para el caso de la vegetación de selva baja y mediana, vegetación secundaria y petén. Ya que, como resultado de las lluvias asociadas a los ciclones, la vegetación tendió a la recuperación, presentando tazas de recuperación que le permitieron alcanzar valores iguales o equivalentes a los registrados previamente, en periodos de un año o menos.

La segunda disrupción reportada por el modelo LT-GEE, salvo en el caso de la vegetación de manglar, probablemente estén asociados a los periodos de sequía moderada observados entre el 2007 y el 2008, años en que se registró la presencia del fenómeno de “La Niña”.

El tercer punto de disrupción registrado se da hacia el año 2019, el cual coincide con un periodo de sequía fuerte, el cual se ve interrumpido por un periodo de máximas lluvias asociadas a los eventos ciclónicos ocurridos durante el año 2020.

Si bien los resultados del modelo LT-GEE ofrecen un panorama general sobre el comportamiento de los diferentes tipos de vegetación presentes en la RBSK, ante eventos hidrometeorológicos intensos y en categoría de extremos, en una segunda etapa se plantea delimitar unidades básicas de análisis espacial, que permitan analizar el comportamiento en diversas zonas a escala local por tipo de vegetación, así como el análisis de series de tiempo del NDVI a escalas temporales de un mes o menores. Con ello se espera identificar, además de los eventos que inciden en los cambios de la actividad fotosintética, aquellos rasgos o elementos presentes en el entorno que también puedan provocar diferencias en la capacidad de respuesta de los ecosistemas ante eventos perturbadores.

» Referencias bibliográficas

Albalawi, E. K., & Kumar, L. (2013). Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: A review. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(2), 791–797. https://hdl.handle.net/1959.11/13125

Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 596–614. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007

Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x

Bhaskar, R., Arreola, F., Mora, F., Martinez-Yrizar, A., Martinez-Ramos, M., & Balvanera, P. (2018). Response diversity and resilience to extreme events in tropical dry secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 426, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.028

Brenner, L., & Vargas del Río, D. (2010). Gobernabilidad y gobernanza ambiental en México. La experiencia de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an. *Polis: Investigación y Análisis Sociopolítico y Psicosocial*, 6(2), 115–154. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72618890005

Buma, B., & Wessman, C. A. (2011). Disturbance interactions can impact resilience mechanisms of forests. *Ecosphere*, 2(5), art64. https://doi.org/10.1890/ES11-00038.1

CONANP. (2022). *Sistema de información, monitoreo y evaluación para la conservación (SIMEC). SIMEC*. https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=97

Cook, B., & Pau, S. (2013). A Global Assessment of Long-Term Greening and Browning Trends in Pasture Lands Using the GIMMS LAI3g Dataset. *Remote Sensing*, 5(5), 2492–2512. https://doi.org/10.3390/rs5052492

de Jong, R., de Bruin, S., Schaepman, M., & Dent, D. (2011). Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6823–6853. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512946

Décamps, H. (2008). Ecosystems and extreme climatic events. *Comptes Rendus*. Géoscience, 340(9–10), 553–563. https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.004

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

GEE. (2022a). *Non-Parametric Trend Analysis*. GEE. https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/nonparametric-trends

GEE. (2022b). *Temporal Segmentation*. GEE. ttps://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-algorithms-temporalsegmentation-structuralchangebreakpoints

Ghazoul, J., & Chazdon, R. (2017). Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1), 161–188. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060736

Goeking, S. A., & Menlove, J. (2017). *New Mexico's Forest Resources*, 2008–2014.

Hodgson, D., McDonald, J. L., & Hosken, D. J. (2015). What do you mean, 'resilient'?. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 503–506. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010

Holling, C. S. (1996). *Engineering Within Ecological Constraints*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/4919

Holm, J. A., Van Bloem, S. J., Larocque, G. R., & Shugart, H. H. (2017). Shifts in biomass and productivity for a subtropical dry forest in response to simulated elevated hurricane disturbances. *Environmental Research Letters*, 12(2), 025007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa583c

IBTrACS. (2019). *IBTrACS v04r00 - Online browsing. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS)*. NOAA. https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php

INEGI. (2015). *Uso del suelo y vegetación: Escala 1: 250,000: Serie V*. In Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe, Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245

IPCC. (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

IRI. (2019). USGS LandDAAC MODIS version_006 Southern North America. IRI. http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.USGS/.LandDAAC/.MODIS/.version_006/.SNA/?Set-Language=en

IRI. (2022). *IRI Analyses SPI SPI-PRECL0p5_3-Month: SPI-PRECL0p5_3-month data*. IR. *https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IRI/.Analyses/.SPI/.SPI-PRECL0p5_3-Month/Y/%2817.80N%29%2821.62N%29RANGEEDGES/X/%2892.48W%29%2886.70W%29RANGEEDGES/index.html#info*

Jimenez-Rodríguez, D. L., Alvarez-Añorve, M. Y., Pineda-Cortes, M., Flores-Puerto, J. I., Benítez-Malvido, J., Oyama, K., & Avila-Cabadilla, L. D. (2018). Structural and functional traits predict short term response of tropical dry forests to a high intensity hurricane. *Forest Ecology and Management*, 426, 101–114. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.009

Kennedy, R., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W., & Healey, S. (2018). Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(5), 691. https://doi.org/10.3390/rs10050691

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. https://doi.org/10.2307/1907187

Nimmo, D. G., Mac Nally, R., Cunningham, S. C., Haslem, A., & Bennett, A. F. (2015). Vive la résistance: reviving resistance for 21st century conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 516–523. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.07.008

NOAA. (2022). *El Niño / Southern Oscillation (ENSO)*. NOAA. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history

Oliver, T. H., Heard, M. S., Isaac, N. J. B., Roy, D. B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C. D. L., Petchey, O. L., Proença, V., Raffaelli, D., Blake Suttle, K., Mace, G. M., Martín-López, B., Woodcock, B. A., & Bullock, J. M. (2016). A Synthesis is Emerging between Biodiversity–Ecosystem Function and Ecological Resilience Research: Reply to Mori. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(2), 89–92. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.008

Parker, G., Martínez-Yrízar, A., Álvarez-Yépiz, J. C., Maass, M., & Araiza, S. (2018). Effects of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426, 39–52. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.037

Rosengaus-Moshinsky, M. (2010). Impacto de los ciclones tropicales en las cuencas de México. In H. Cotler-Ávalos, A. Garrido, V. Bunge, & M. L. Cuevas (Eds.), *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. (Primera ed, pp. 32–37). Agua.org.mx.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*. https://doi.org/https://doi.org/citeulike-article-id:12009708

Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., Gómez-Mendoza, L., Terán-Cuevas, Á. R., & Hernández, J. C. M. (2021). Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin and Yucatan Peninsula, Mexico: Identification of Extreme Events. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(2), 145–160. https://doi.org/10.18280/ijdne.160204

Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27(1), 28–41. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004

Snook, L. (1993). *Stand Dynamics of Mahogany (Swietenia macrophylla King) and Associated Species after Fire and Hurricane in the Tropical Forests of the Yucatan Peninsula, Mexico* [Thessis Doctor Degree]. Yale University. URL. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25237.35045

Solow, A. R. (2017). On detecting ecological impacts of extreme climate events and why it matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160136. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0136

Symeonakis, E., & Drake, N. (2004). Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3), 573–592. https://doi.org/10.1080/0143116031000095998

Townshend, J. R., Masek, J. G., Huang, C., Vermote, E. F., Gao, F., Channan, S., Sexton, J. O., Feng, M., Narasimhan, R., Kim, D., Song, K., Song, D., Song, X.-P., Noojipady, P., Tan, B., Hansen, M. C., Li, M., & Wolfe, R. E. (2012). Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 5(5), 373–397. https://doi.org/10.1080/17538947.2012.713190

USGS. (2022a). Landsat Missions. U.S. Department of the Interior. . https://www.usgs.gov/landsat-missions

USGS. (2022b). *Search Data Catalog*. USGS. https://lpdaac.usgs.gov/product_search/

van-de Pol, M., Jenouvrier, S., Cornelissen, J. H. C., & Visser, M. E. (2017). Behavioural, ecological and evolutionary responses to extreme climatic events: challenges and directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160134. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0134

Vink, K., & Ahsan, Md. N. (2018). The benefits of cyclones: A valuation approach considering ecosystem services. *Ecological Indicators*, 95, 260–269. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.035

WMO. (2018). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Final Version*.

Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2016). *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8

3.6 Efectos ambientales en la cuenca del río Pitillal, asociados a los riesgos de inundación en Puerto Vallarta, Jalisco

Itzallana Zestochova Valdez Pérez
Licenciatura en Ciencias Ambientales, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Julio Cesar Morales Hernández
Departamento de Ciencias Exactas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, México

Dr. Baudelio Rodríguez Gonzáles
Licenciatura en Ciencias Ambientales, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Palabras Clave: clave: fenómenos hidrometeorológicos, precipitaciones, vulnerabilidad, planeación urbana.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

Las cuencas hidrográficas se caracterizan por ser regiones geográficas delimitadas por las cumbres de montañas, conocidas como parteaguas, donde se acumulan todas las corrientes de agua, ya sean arroyos o ríos, que se unen y desembocan en un punto central denominado punto de salida de la cuenca. Este punto de salida puede ser un lago, dando origen a una cuenca endorreica, o el océano, constituyendo así una cuenca exorreica (Ávalos *et al*., 2013).

Estas cuencas son de gran relevancia debido a sus impactos positivos en la sociedad, como la regulación del clima, la preservación de los ciclos hidrológicos, la gestión de la erosión, la prevención de inundaciones, la recarga de acuíferos, el mantenimiento de la calidad y cantidad de los flujos de agua, la formación de suelos, la captura de carbono, la purificación de cuerpos de agua, así como la conservación y protección de la biodiversidad (SEMARNAT, 2018).

Hoy en día el balance ecológico de las cuencas padece de una falta de organización, debido principalmente por el crecimiento demográfico (González-Abraham *et al*., 2015; Theobald, 2013). Para sostener la población en constante crecimiento, es importante tomar en consideración las cuencas hidrológicas en la planificación urbana sin poner límites (municipales o estatales), siendo esto esencial para lograr la mitigación de los efectos de un potencial desastre en la zona, puesto que se consideran como hábitats recreacionales de la población (Díaz-Gonzáles, 2004), dan protección

a la naturaleza y biodiversidad, control climático y, sobre todo, brindan a la sociedad seguridad sobre fenómenos naturales, tales como inundaciones o desbordamientos.

Los desastres naturales deben examinarse dentro de un marco de perspectivas de riesgo donde se consideran tanto los riesgos naturales como la vulnerabilidad (Zuñiga-Tovar & Magaña-Rueda, 2018). La tendencia a las inundaciones más frecuentes en México en las últimas décadas no es sólo el resultado de precipitaciones más intensas, sino también una consecuencia de una mayor vulnerabilidad (Morán-Escamilla, 2017). Se puede describir en términos de factores físicos, sociales y económicos, pues las áreas deforestadas o urbanizadas son las que conducen al deterioro de las cuencas hidrográficas y una mayor vulnerabilidad física y social a las lluvias intensas. El aumento de la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas debido a los cambios en la cobertura del suelo es el factor principal que conduce a más inundaciones, particularmente en el centro-sur de México (Zuñiga-Tovar & Magaña-Rueda, 2018).

Debido a su ubicación geográfica, Puerto Vallarta está expuesto a diversos fenómenos naturales, cuyos impactos se agudizan y se manifiestan por ser receptores de múltiples escurrimientos, ya que en el puerto se unen varios ríos y arroyos, así como por la orografía y topografía de la ciudad, como son las montañas, las riberas de los ríos y las playas (Martínez, 2014).

Con respecto a este trabajo, se identificó cuáles son los principales efectos ambientales y las zonas vulnerables de la región, para asociarlos a las inundaciones en la cuenca del río Pitillal, además de proponer estrategias que ayuden a la mitigación o, en su caso, disminución de los problemas ambientales.

Antecedentes

El deterioro del entorno se evidencia mediante un incremento en la utilización y la escasez de petróleo, la crisis hídrica, la contaminación de los océanos y la extinción de especies animales y vegetales. A esto se agrega la deforestación, el calentamiento global y las alteraciones climáticas, constituyendo indicadores de una preocupante situación que impacta tanto a naciones desarrolladas como a aquellas en desarrollo (Díaz-Cordero, 2012; Martínez-Hernandez *et al.*, 2014).

El deterioro ambiental es una tendencia con repercusiones en la sociedad, los individuos y la educación. El cambio climático, abordado por expertos a nivel mundial, se presenta como un problema global. Estos especialistas han llegado a la conclusión de que el cambio climático es resultado de causas tanto naturales como de origen antropogénico (Díaz-Cordero, 2012).

Uno de los principales impactos ocurre en la dimensión del agua. Los cambios en los patrones de temperatura y de precipitación proyectados afectarán la dinámica hidrológica y, con ello, el aporte de agua disponible para las actividades productivas y el consumo humano, así como la mayor ocurrencia de eventos extremos como las sequías y las inundaciones (SEMARNAT, 2013).

La mayoría de los modelos científicos sobre el clima anticipan una disminución en la frecuencia global de ciclones tropicales en el futuro. No obstante, también proyectan un aumento en la intensidad de estos eventos, acompañado de un incremento en las precipitaciones asociadas. Además, indican que es probable que el aumento del nivel del mar contribuya a aumentar el riesgo de mareas de tempestad. Por lo tanto, se prevé que las regiones costeras sean más vulnerables a inundaciones por mareas de tempestad provocadas por ciclones tropicales, como resultado del calentamiento global (OMM, 2022).

Los sistemas hidrológicos están siendo impactados de diversas maneras, incluyendo el aumento de la escorrentía y el cambio en las fechas de caudal máximo primaveral en varios ríos alimentados por glaciares y nieve. Asimismo, se observa un calentamiento de lagos y ríos en varias regiones, lo que afecta la estructura térmica y la calidad del

agua. La elevación del nivel del mar y la actividad humana están contribuyendo a la pérdida de humedales costeros y manglares, así como al empeoramiento de las inundaciones costeras en diversas áreas (IPCC, 2007).

El crecimiento urbano tiene un impacto significativo en la hidrología de las cuencas donde se desarrolla. En especial, se producen alteraciones en la red de drenaje y en el proceso de conversión de lluvia a escorrentía. Debido a la actividad de urbanización, es necesario preservar y ajustar los cauces naturales que conforman la red hidrográfica original para evitar que afecten directamente su capacidad de drenaje, evitando así la posibilidad de inundaciones (SIAPA, 2017).

En México, se encuentran ejemplos de ciudades como Guadalajara, Monterrey, Ciudad de México y Chetumal, entre otras, que se establecieron en proximidad deríos o lagunas, con el propósito de obtener suministro de agua. Sin embargo, debido al aumento de la población, estos lugares experimentaron modificaciones en sus ecosistemas, llegando al punto de necesitar la construcción de canales para gestionar el desagüe de aguas pluviales y la creación de bordos para proteger a sus habitantes contra inundaciones (Llaguno-Guilberto *et al.*, 2021).

La transformación de los ríos o arroyos que solían atravesar las ciudades ha sido considerablemente intensificada por el proceso de urbanización, agravándose aún más con la migración de personas de las áreas rurales a las urbanas (Llaguno-Guilberto *et al.*, 2021).

Si no se implementan de manera más rápida las políticas que proporcionen terrenos habitacionales convenientemente ubicados para las familias de bajos ingresos en las ciudades, y si no se reconsidera la estrategia de construcción de viviendas sociales, se intensificarán los procesos de ocupación de terrenos en áreas de riesgo y de manera irregular. Del mismo modo, se observará una mayor tendencia a ubicar nuevos conjuntos de viviendas sociales en las periferias distantes de las ciudades (ONU-Habitad, 2022).

Por su ubicación geográfica, Puerto Vallarta está expuesto a diversos eventos naturales, cuyos impactos se agudizan y se manifiestan por ser receptores de múltiples escurrimientos, ya que en el puerto confluyen varios ríos y arroyos, así como por la forma de apropiación de determinados espacios, como son las montañas, las riberas de los ríos y las playas (Martínez-Hernandez *et al.*, 2014).

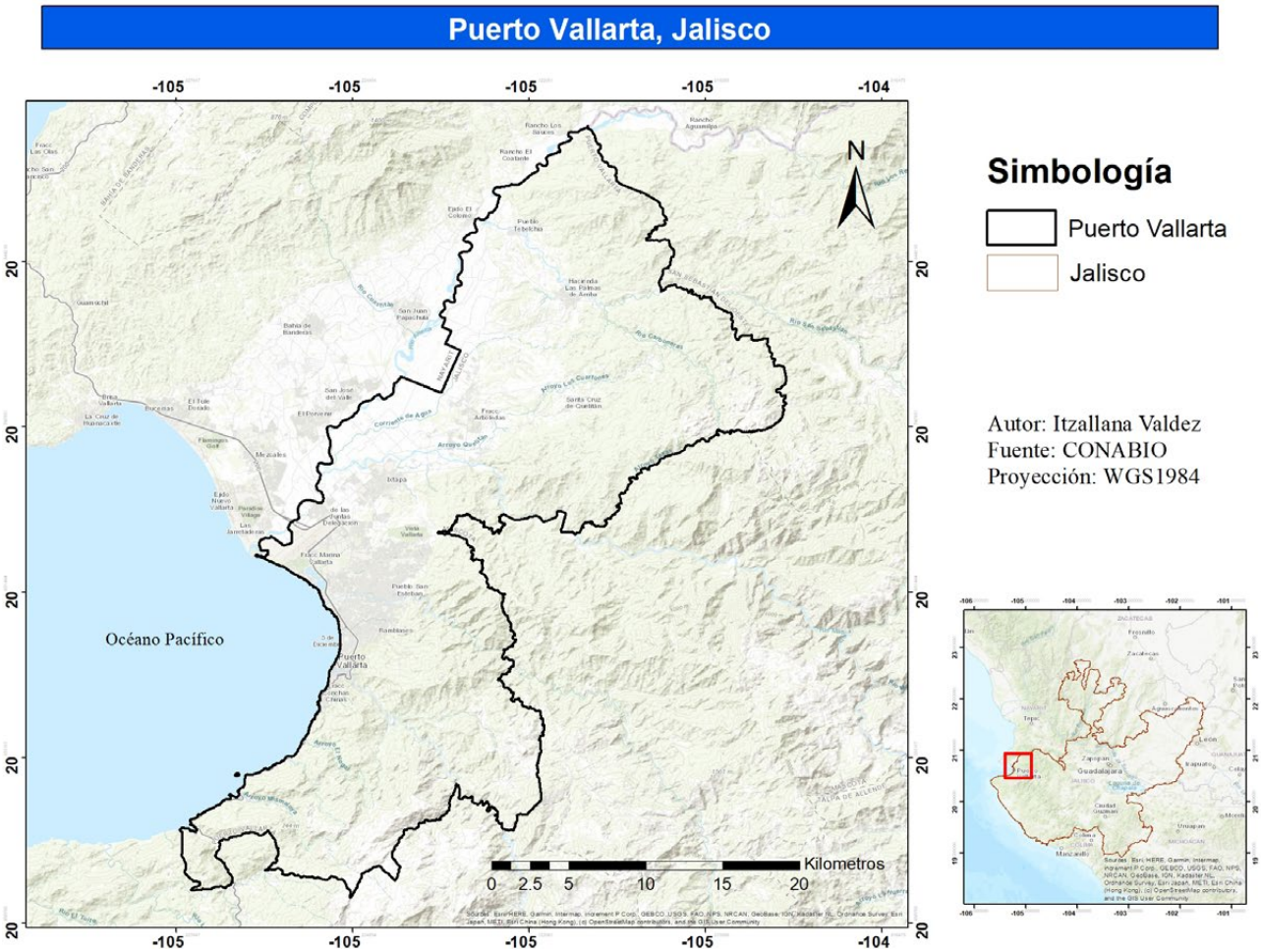
Entre 1925 y 2002, las crónicas locales registraron doce eventos meteorológicos, de los cuales seis corresponden al mes de octubre, dos a septiembre, uno a enero, otro a julio y dos no señalan mes. El impacto de los mismos se relacionó principalmente con fuertes inundaciones provocadas por el crecimiento de los ríos Ameca, Pitillal y Cuale, así como pérdida de vidas humanas, daños en infraestructura, vías de comunicación, cultivos, casas, comercios y hoteles (Martínez-Hernandez *et al.*, 2014).

Área de estudio

El municipio de Puerto Vallarta está situado al poniente del estado, en las coordenadas 20°40´N -105°16´O / 20.667, -105.267, a una altura de 2 m s. n. m. Limita al norte con el estado de Nayarit; al sur, con el municipio de Cabo Corriente y Talpa de Allende; al este, con San Sebastián y Mascota; y al oeste, con el océano Pacífico. Su extensión territorial es de 1,367 km² (Ayuntamiento de Puerto Vallarta, 2019). El municipio cuenta con muy pocas zonas planas, mismas que se localizan principalmente en la margen derecha del río Ameca y por la costa desde su desembocadura hasta la del río Cuale hacia el sur (Ayuntamiento de Puerto Vallarta, 2019). El clima es semitropical y húmedo, la temperatura máxima es de 31 °C en verano y la mínima de 19 °C en el invierno, la media anual es de 25 °C. La temporada de lluvias abarca desde mediados del mes de junio hasta finales del mes de agosto, con lluvias aisladas hasta mediados de octubre; tiene una precipitación media anual de 1,417 mm. Los vientos dominantes son en dirección suroeste y no presentan heladas (Morales-Hernández *et al.*, 2021).

Los suelos son vulcano sedimentarios, existen fallas y planos estructurales que pueden disparar movimientos de ladera en forma de deslizamiento de roca y callamiento en bloques. La principal vegetación de la zona es muy variada, abarca desde el bosque de encino-pino, bosque mesófilo de montaña, manglares y pastizales, además de la selva mediana caducifolia y subcaducifolia y, por supuesto, vegetación secundaria (arbustiva y arbórea). La ciudad se encuentra ubicada en una zona de fuerte descarga fluvial, las cuales tienen lugar en periodos muy cortos de tiempo, trayendo consigo serios problemas, principalmente en las zonas urbanas tanto de laderas como en partes bajas (Alcántara-Ayala, 2000).

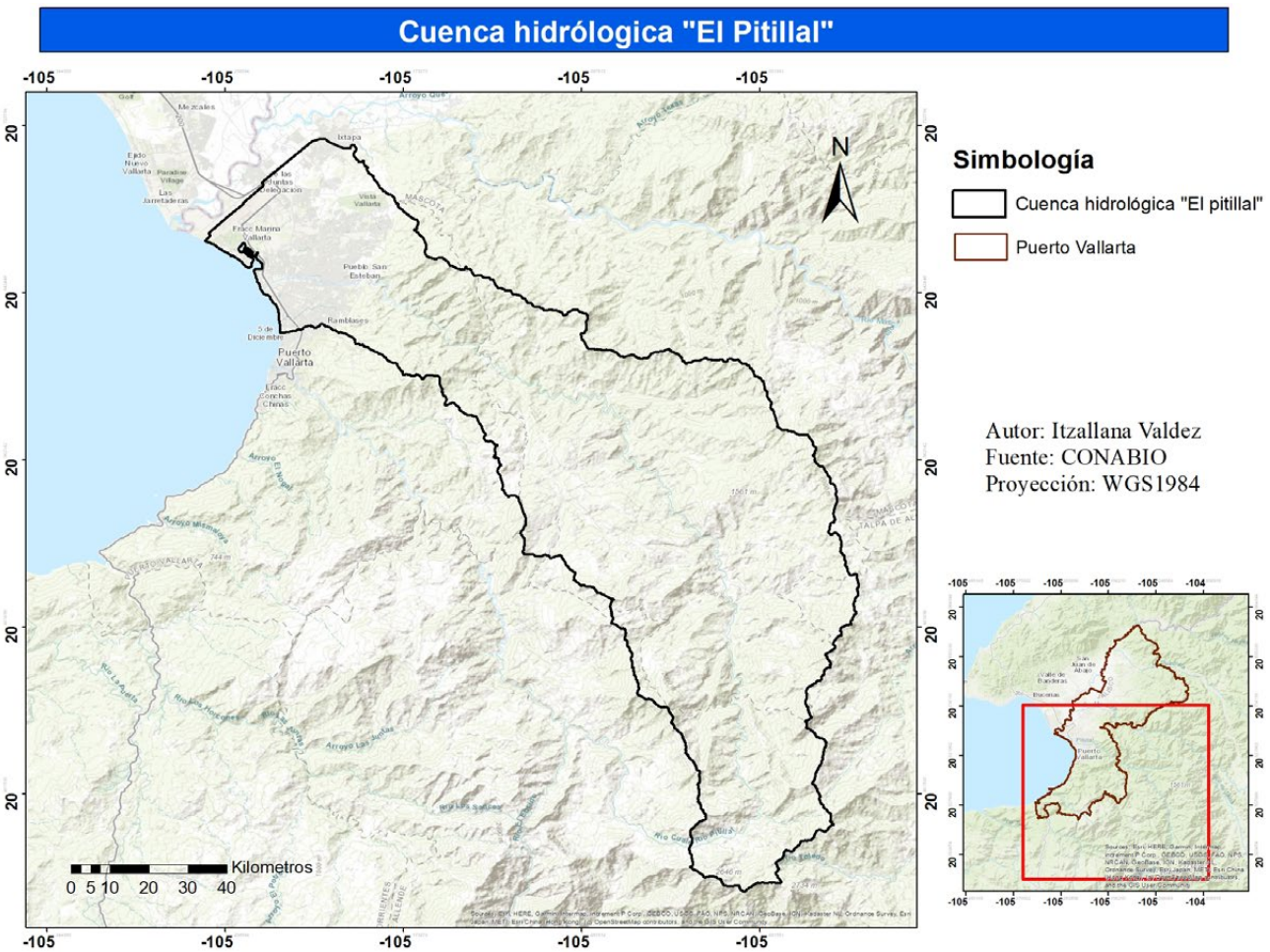
La región hidrológica 13, Huicicila, de la vertiente del Pacífico, se localiza entre los estados de Jalisco y Nayarit, con una extensión dentro del estado de Jalisco de 1 442.46 km². Sus colectores principales son los ríos: Tecomala, Cuale, Pitillal y el Tuito, los cuales desembocan en el océano Pacífico. Esta región presenta dos cuencas llamadas: R. Cuale-Pitillal (A) y R. Huicicila-San Blas (B). La primera está dentro del territorio de Jalisco y se describe a continuación (INEGI, 2001).



► **Figura 1:** Zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2019.)

La cuenca río Cuale-Pitillal se localiza al occidente de la entidad, presenta una superficie de 1 442.46 km², que equivale al 1.8% de la superficie estatal. Sus principales afluentes son los ríos Tecomala, Cuale y Pitillal. Todos estos descargan sus aguas al océano Pacífico. (INEGI, 2001).

La cuenca hidrológica Pitillal (Figura 2), de acuerdo con la publicación del Diario Oficial de la Federación (DOF, 2013) tiene una superficie de aportación de 419.59 kilómetros cuadrados y se ubica en la parte oeste del país, delimitada al norte y al este por la región hidrológica número 14 río Ameca, al sur por la región hidrológica número 15 costa de Jalisco y al oeste por la cuenca hidrológica Cuale y por el océano Pacífico (Jalisco, 2015).



► **Figura 2:** Cuenca hidrológica "El Pitillal".
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2019).

Metodología

La investigación fue de tipo adaptativa, donde se tomaron una serie de materiales y métodos ya preestablecidos para aplicarlos en un lugar en específico (Jalisco), o sea, adaptaron la tecnología ya existente a las condiciones locales del territorio. Por su parte, se empleó un método no experimental debido a que las variables independientes (la precipitación y la población) no son manipuladas ni controladas (Guevara-Alban *et al.*, 2020).

Entre las subcategorías de este método se abordaron los siguientes análisis: exploratorio (se indagó en las variables que intervienen en el riesgo potencial), descriptivo (se aplicaron una serie de estadísticas descriptivas a la muestra de datos), correlacional (se realizó un análisis de funciones empíricas ortogonales donde se arrojan valores de

correlación), causal (se indagó en la posible influencia de oscilaciones atmosféricas, "causa", en la génesis de lluvias extremas, "efecto") y de tendencia (se buscaron los periodos de retorno de lluvias máximas, así como un análisis de espectros de frecuencia) (Guevara-Alban *et al*., 2020).

Para realizar este trabajo se recopiló toda la información disponible de meteorología, reportes de daños y desastres históricos, etc.

Además, se realizó una revisión bibliográfica especializada de temas afines a la investigación, con datos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) para el análisis de riesgos. El TRMM es una misión conjunta entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por si siglas en inglés) y Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA, por sus siglas en inglés), el propósito principal de TRMM es medir la lluvia tanto en la tierra como en los océanos, desde 30° sur hasta 30° latitud norte (NASA, 1999).

Obtención de datos

Se elaboró una base de datos mediante la información del TRMM, en el periodo de 2010-2019 (ver Tabla 1) (NASA, 2018).

Análisis de datos

Posteriormente se generó una base de datos tomando sólo la precipitación considerada como severa, se estima que una TLS tiene una acumulación de lluvia máxima de 20 a 70 milímetros (mm) en 24 horas (CENAPRED, 2010).

A partir de esta base se generó la distribución espacio-temporal de la precipitación. Para cumplir el primer objetivo específico (identificar las zonas vulnerables a inundación en la zona de estudio), se calculó el promedio por año de precipitación de los puntos seleccionados. Con los datos anteriores, se llevó a cabo el método de interpolación empleado en el desarrollo de esta investigación: IDW, por su siglas en inglés, o Interpolación de Distancia Inversa Ponderada, en español (Díaz-Padilla et al., 2008).

Análisis de vulnerabilidad

Adicionalmente, se realizó un análisis hidrográfico de la zona de estudio utilizando el sistema SIATL del INEGI (INEGI, 2022). Este canal sirve como plataforma para compartir información sobre conocimientos geográficos, en particular, enfocándose en la hidrografía superficial. Este conocimiento es fundamental al crear contextos para diversos proyectos, incluyendo la planificación para contingencias frente a eventos hidrometeorológicos. Esta aplicación, que cuenta con las principales funcionalidades de un visualizador, ofrece herramientas muy sencillas para la búsqueda tanto de localidades como de rasgos hidrográficos, simular flujos "aguas arriba" y "aguas abajo", además de señalar asentamientos ubicados a los márgenes de los cauces. Su objetivo es proveer, de forma ágil y gratuita, un medio para difundir el conocimiento geográfico, específicamente de hidrografía superficial, que sirva como sustento para la construcción de escenarios que coadyuven en la planeación de estrategias ante contingencias de eventos hidrometeorológicos y en la creación de rutas de evacuación, así como en la toma de decisiones para la construcción de infraestructura y ordenamiento territorial, entre otros.

Para la generación del Modelo Digital de Elevación (MDE) se utilizó Global Mapper 18 y Arcgis 10.4, a una resolución horizontal de 5 m, con el propósito de reconocer el gradiente del relieve entre la cabecera de la cuenca y la zona deltaica de Puerto Vallarta, con información obtenida del periodo 2015 a 2020. A partir del MDE se generó el mapa de pendientes y se reclasificó de acuerdo con los elementos de las unidades de relieve. Asimismo, se utilizaron insumos de uso de suelo

y vegetación (INEGI, 2019). Posteriormente, se generó un mapa geomorfológico utilizando el método TPI e I&P (Topographic Position Index) (Iwahashi & Pike, 2007). Para este proceso se utilizó el sistema de Arcgis 10.4.

Por último, se vectorizó y aplicó una generalización y suavizado, así como la superposición de mapas. Se delimitaron las cuencas, subcuencas y microcuencas, también las áreas de urbanización, para tener una visión de las consecuencias que se derivarían en diferentes escenarios, especialmente los relacionados con eventos meteorológicos extremos.

Finalmente, con los análisis de lluvias realizados con la base de datos TRMM durante el periodo 2010-2019, se realizaron los mapas de vulnerabilidad a las inundaciones con base en un análisis multicriterio utilizando el modelo digital de elevación de la FAO, el modelo y clasificación de pendientes, el mapa geomorfológico es decir el mapa de uso de suelo y vegetación para las zonas propensas a inundaciones en la zona urbana.

Cartografía

Se realizó la cartografía de la zona de estudio que incluye la localización del municipio de Puerto Vallarta, así como la cuenca hidrológica el Pitillal; también el mapa de distribución de la vegetación y uso de suelo, pertenecientes a los años 2010 y 2020, para realizar una comparación acerca del cambio de ésta, además de uno del crecimiento urbano en el periodo de 2000 a 2020, usando datos del INEGI en el periodo antes mencionado.

Tabla 1. Datos TRMM, promedio de la precipitación anual periodo 2010-2019.

Coordenadas UTM			Años									
Punto	**Latitud**	**Longitud**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
1	472627.77	2285593.2	110.64	113.19	111.77	117.32	121.55	99.74	108.72	109.14	124.84	110.80
2	475574.7	2287850.2	55.64	101.10	109.10	105.94	100.44	95.60	104.92	103.34	117.11	100.20
3	478653.96	2290827.9	80.72	101.10	109.10	105.94	100.44	95.60	104.92	103.34	117.11	100.20
4	476028.09	2281637.1	105.80	101.10	109.10	105.94	100.44	95.60	104.92	103.34	117.11	100.20
5	484270.65	2283641.6	105.80	101.10	109.10	105.94	100.44	95.60	104.92	103.34	117.11	100.20
6	495102.83	2279208.3	105.80	101.10	109.10	105.94	100.44	95.60	104.92	103.34	117.11	100.20
7	489386.61	2268300.9	88.84	70.91	76.13	106.02	84.75	93.66	96.22	84.87	105.07	90.33
8	498779.34	2268036.3	81.51	78.20	72.27	91.42	86.58	95.54	86.58	83.11	96.93	88.04
9	504274.94	2267477.4	98.55	89.31	83.77	101.95	95.94	100.76	102.83	94.15	111.59	94.44
10	500896.01	2255071.7	86.54	80.14	75.47	95.35	87.09	101.40	91.36	87.14	102.96	91.75
11	500417.45	2251651.7	84.0	79.17	73.87	93.39	86.84	98.47	88.97	85.13	99.96	89.90

Fuente: Elaboración propia con datos de GIOVANNI (NASA, 2018).

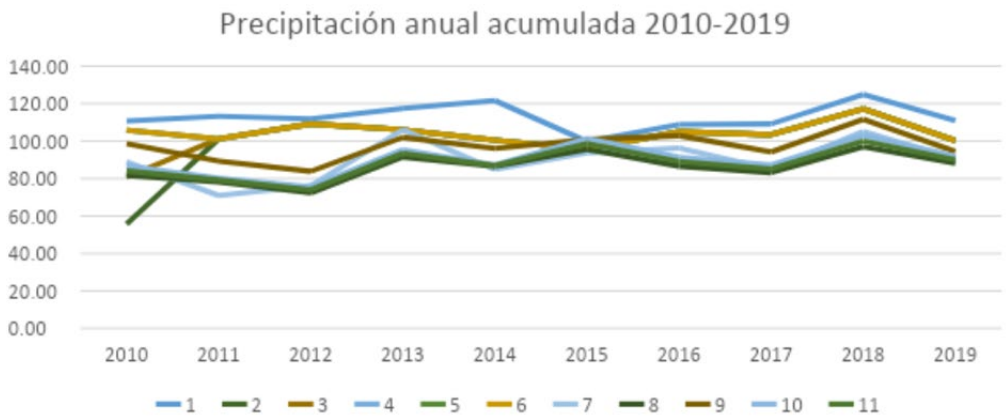
Resultados

Según los resultados obtenidos del promedio de las precipitaciones anuales, las lluvias ya no se presentan con tanta frecuencia, sino con más intensidad, razón por la cual se tiene la presencia de fenómenos naturales extremos, asociándola a los riesgos de inundación, convirtiendo la zona en vulnerable ante deslizamientos de laderas y la remoción de masas.

La Gráfica 1 muestra la variación de precipitación para cada uno de los puntos de muestreo seleccionados. En el periodo de estudio 2010-2029, se identifican años secos (menor registro de lluvias) y húmedos (altas precipitaciones). Para el año 2018 se muestra un alza en el promedio de precipitaciones en todos los puntos de muestreo,

lo que lo cataloga como un año húmedo; y, por el contrario, en el año 2017 se observa que hay una disminución considerable en comparación con los demás años, lo que indica un año seco.

En términos generales, se puede observar que el punto 1, es el que tiene la tendencia a tener mayores registros de lluvia a lo largo del periodo de estudio, el punto 4, 5 y 6 se mantienen con el mismo promedio y finalmente, los puntos 8 y 11 muestran los menores acumulados anuales, lo que las colocaría en regiones más secas en comparación con el resto de la zona de estudio (Gráfica 2).

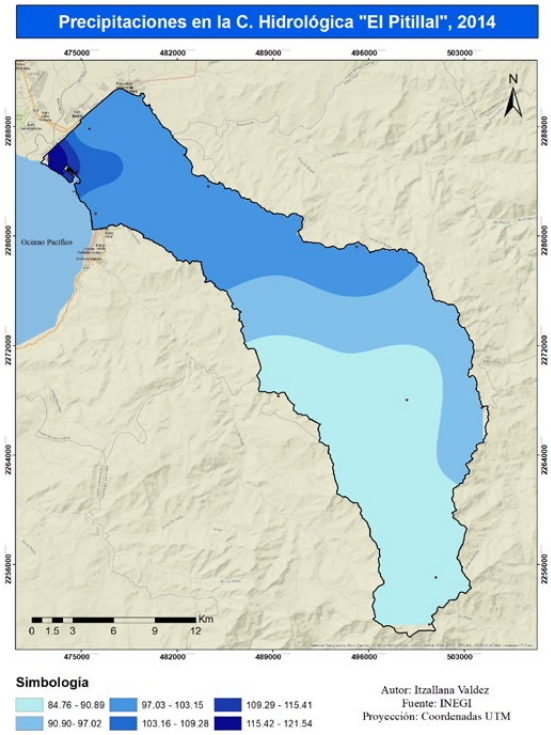


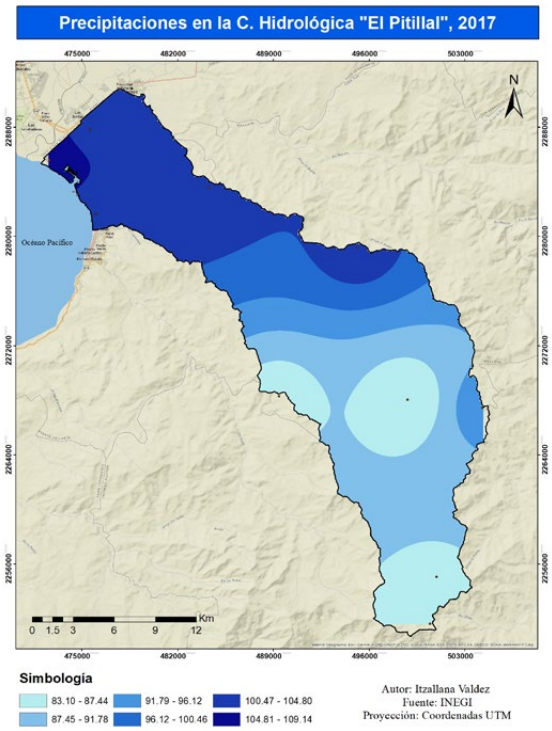
► **Gráfica 1:** Precipitación acumulada anual para los puntos de muestreo seleccionados.
Fuente: Elaboración propia.

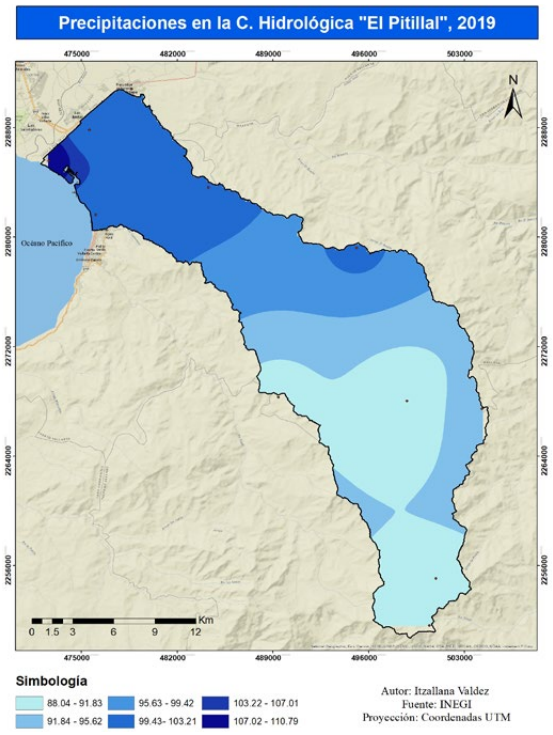
► **Gráfica 2:** Precipitación anual acumulada promediada para cada punto de muestreo.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos de precipitación obtenidos en el periodo de estudio en la cuenca hidrológica "El Pitillal" y utilizando el método IDW, se realizaron los mapas de la distribución espacial de las precipitaciones anuales, en donde se hace una comparación de los años secos (con menor registro de lluvias), y de los años más húmedos (con mayor registro de precipitaciones).

La Figura 3 muestra los años con menor distribución de lluvias, que corresponden a los años 2014, 2017 y 2019, en donde se pueden identificar una serie de núcleos, los cuales muestran si la precipitación fue más o menos intensa. Además, tienen una repartición de registros similar en la zona urbana, en donde el punto 1 (situado justo frente a la costa), se registraron los mayores índices, y en las zonas altas de la cuenca fueron los menores.



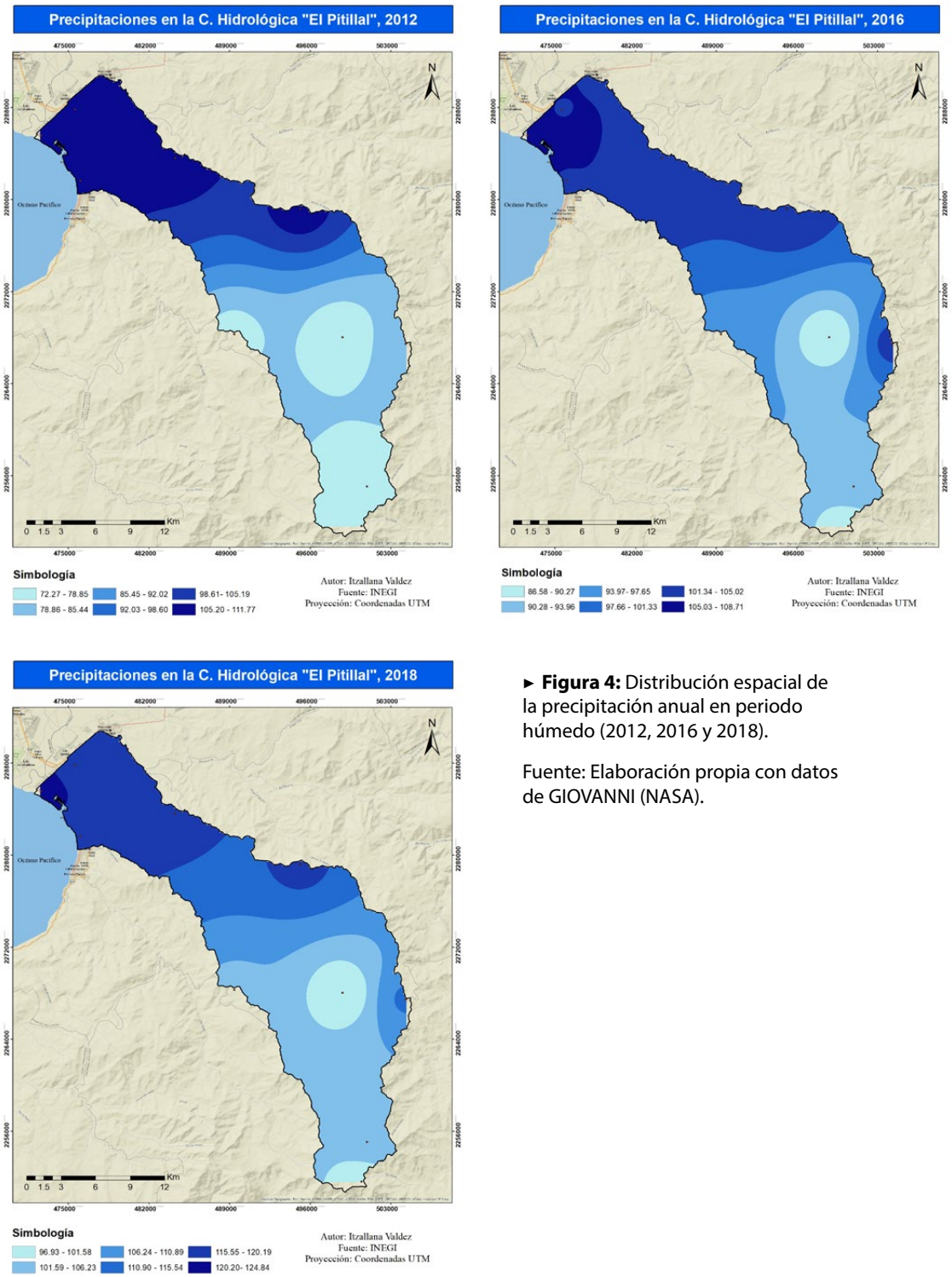




► **Figura 3:** Distribución espacial de la precipitación anual en periodo seco (2014, 2017 y 2019).

Fuente: Elaboración propia con datos de GIOVANNI (NASA).

Por otro lado, en la Figura 4 se muestran los años donde la acumulación de lluvias fue alta (2012, 2016 y 2018). Como en el caso anterior, se identifican una serie de núcleos donde la precipitación es mayor o menor. En los 3 años, se observa que las lluvias son más abundantes en la zona urbana y en la zona que conecta a ésta con las zonas altas de la cuenca, lo cual se asocia a mayores riesgos de inundación debido a diversos factores, provocando deslizamientos, remoción de masas y el arrastre de material orgánico (ramas, troncos, rocas).



► **Figura 4:** Distribución espacial de la precipitación anual en periodo húmedo (2012, 2016 y 2018).

Fuente: Elaboración propia con datos de GIOVANNI (NASA).

La ciudad de Puerto Vallarta ha experimentado un acelerado proceso de crecimiento urbano, debido a su principal actividad económica, el turismo. Esto ha traído consigo una alta demanda laboral, por lo tanto, se ha visto la necesidad de satisfacer los servicios básicos como lo son vivienda, infraestructura, electricidad y drenaje. La zona urbana de "El Pitillal" no ha sido la excepción, ya que importantes vialidades y colonias se localizan aquí.

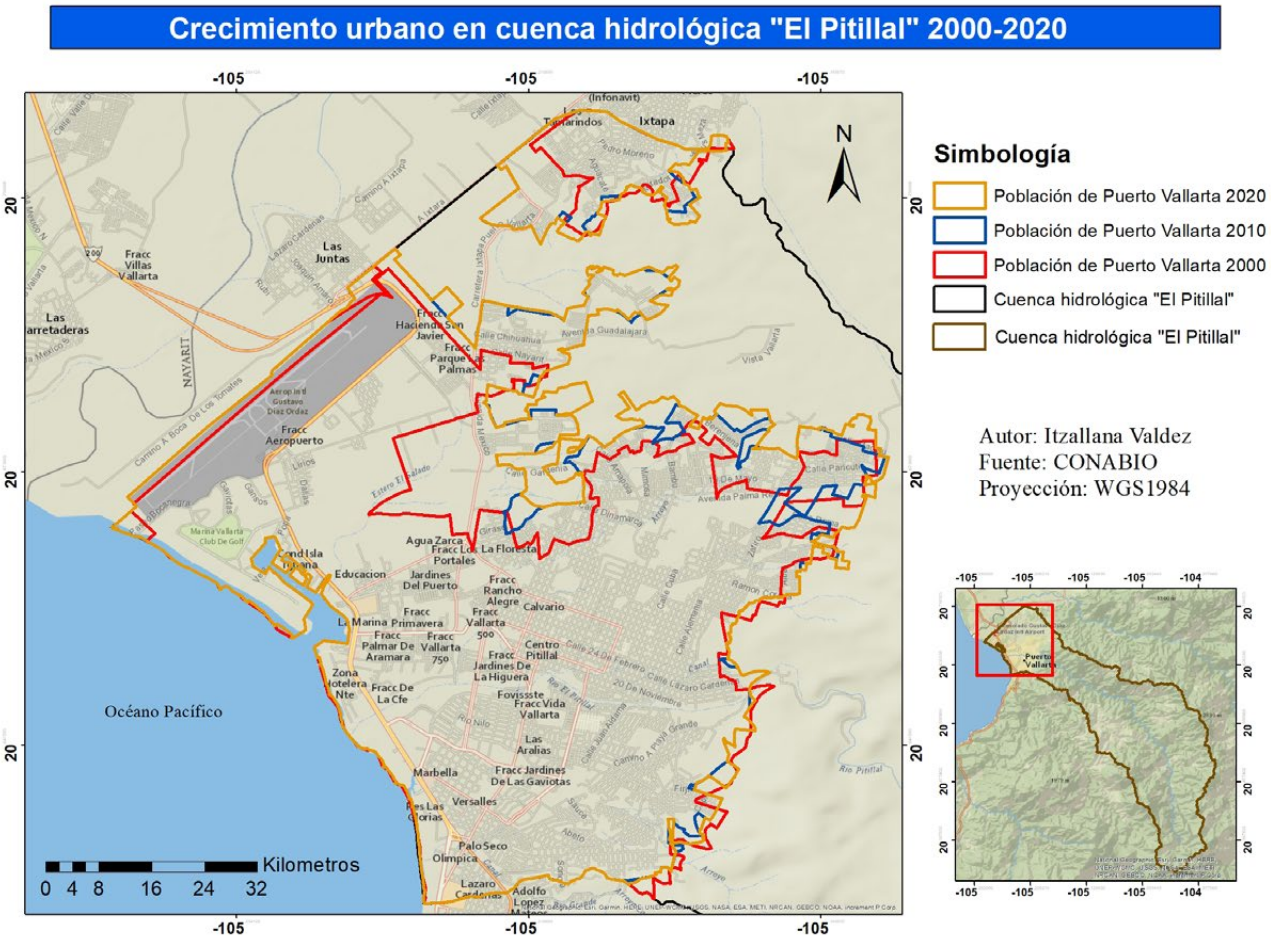
Este crecimiento ha sido muy notorio, ya que, de acuerdo al periodo de estudio (2000 al 2020), existe una diferencia de 836.66 hectáreas que representa el 19.48% del total de la zona urbana, ocasionando un sinfín de cambios, siendo estos los problemas de afectación al medio ambiente. En la Tabla 2 se puede apreciar el cambio en Km^2.

Coordenadas UTM		
Año	**Hectáreas**	**KM^2**
2000	3457.524384	34.57524384
2010	4094.7803	40.947803
2020	4294.179061	42.94179061

Tabla 2. Crecimiento de la zona urbana en la cuenca hidrológica "El Pitillal".

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

De acuerdo al análisis de los resultados, podemos notar que del año 2000 al 2010 hubo un mayor crecimiento demográfico que corresponde a 637.25 ha., que representa el 14.83% de la zona de estudio; mientras que del 2010 al 2020 fue de 199.39 ha, que representan el 4.64% (Figura 5).



► **Figura 5:** Crecimiento en la zona urbana de la cuenca hidrológica "El Pitillal".
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

Por otro lado, la mayor transformación en el periodo de 2010 a 2020 en la cuenca hidrológica "El Pitillal" ha sido en el uso de suelo y vegetación en la zona conurbada de la misma, todo esto generado por el acelerado crecimiento urbano, teniendo como

consecuencia la sustitución de la vegetación. Las zonas altas donde se encuentran las selvas medianas y bosques han sido afectadas esporádicamente por incendios o talas forestales, sin causar mayores cambios en su composición.

En la Tabla 3, se puede apreciar la disminución de hectáreas del año 2010 al 2020, en donde tenemos como resultado que en la agricultura hubo un elevado porcentaje perdido que corresponde al 68.49% y le sigue pastizal con una pérdida de territorio que corresponde al 64.68%. Por otro lado, la selva baja caducifolia no tuvo ningún cambio en su composición. Además, el bosque de pino ganó un 0.17% de terreno, sin embargo, los asentamientos humanos crecieron, dejando como consecuencia una ganancia de 249.52 ha que corresponden al 6.05%.

Tabla 3. Porcentaje de cambio de vegetación.

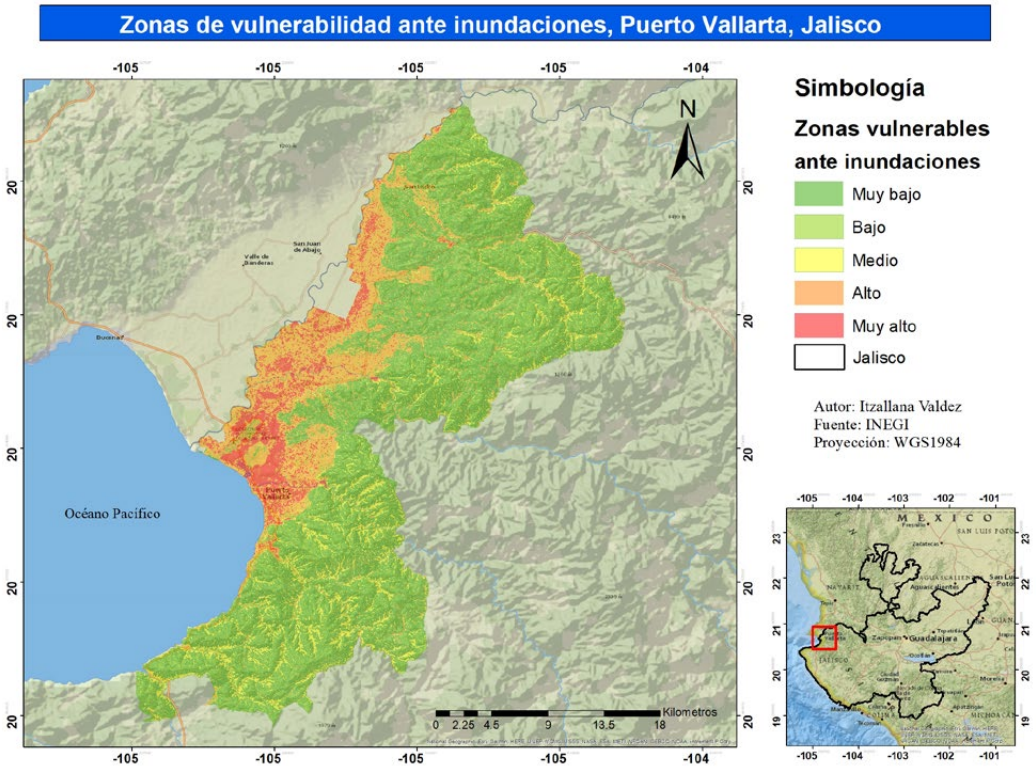
Tipo de vegetación	2010	2020	Diferencia de ha	Porcentaje perdido
Agricultura	771.72 ha	243.16 ha	-528.56 ha	68.49%
Asentamientos humanos	3870.48 ha	4,120 ha	+249.52 ha	+6.05%
Bosque encino	3,163.84 ha	3,151 ha	-12.84 ha	0.40%
Bosque pino	15,662.30 ha	15,689 ha	+26.7 ha	+0.17%
Bosque pino-encino	4,624.44 ha	4,375.1 ha	-249.34 ha	5.39%
Manglar	136.33 ha	131.28 ha	-5.05 ha	3.70%
Pastizal	1,124.26 ha	3,183.2 ha	+2,058.94 ha	64.68%
Selva baja caducifolia	364.36 ha	364.36 ha	0 ha	0%
Selva mediana subcaducifolia	4,010.07 ha	4,007.9 ha	-2.17 ha	0.05%
Vegetación secundaria	8,621.77 ha	7,075.4 ha	-1,546.37	17.93%

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

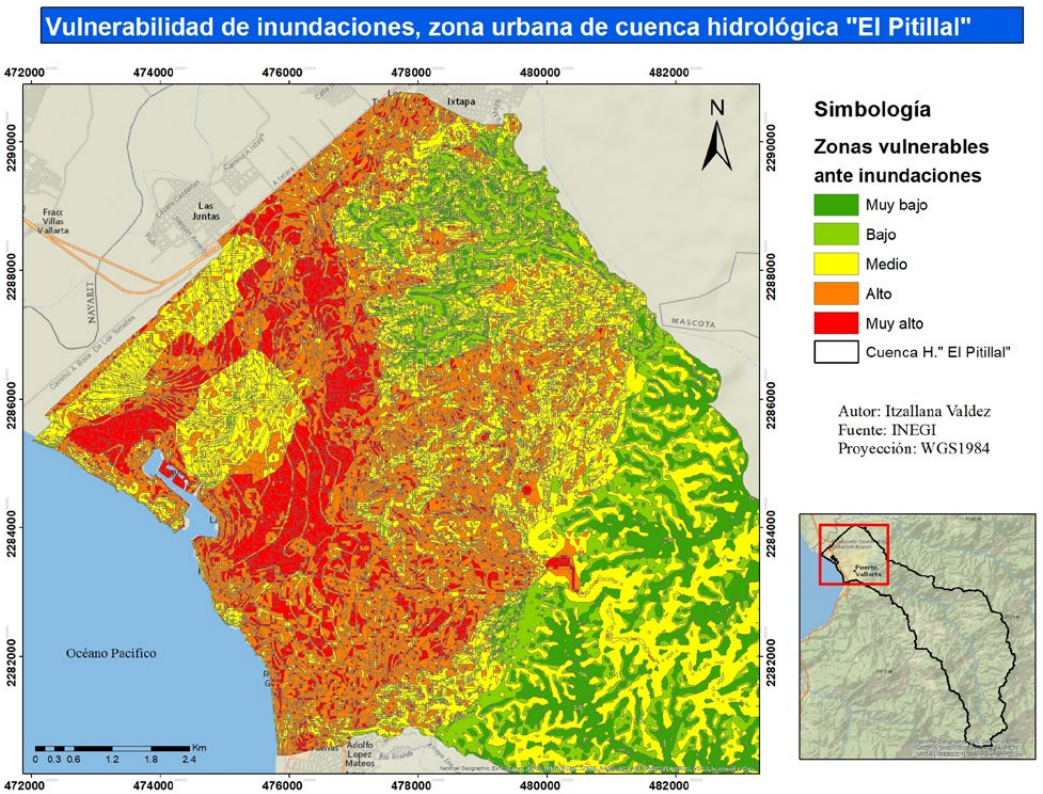
La construcción de nuevos fraccionamientos está causando deforestación y desmonte, incluso a las orillas del río, aumentando la vulnerabilidad de la zona al no tener una barrera vegetal, causando también deslizamientos de laderas o hundimientos. Esto da origen al arrastre de material orgánico, como rocas, troncos o ramas; también se da lugar a los residuos sólidos urbanos que son arrojados al río por los habitantes. Estas circunstancias afectan nuestra relación con el medio ambiente, ya que provocan la pérdida de la biodiversidad, la alteración del régimen hidrológico, la disminución de los niveles de agua subterránea y el decremento de recursos naturales.

Además, debido a este cambio en la cobertura vegetal, se generan zonas de riesgo. Utilizando la vectorización, generalización y suavizado, así como la superposición de mapas, se obtuvieron las áreas propensas a inundaciones en la zona urbana de Puerto Vallarta (Figura 6). En donde se observa que sobre todo la zona urbana del municipio se encuentra altamente vulnerable, esto se debe principalmente a la topografía del mismo, ya que existen muy pocas zonas planas y éstas se encuentran a los bordes de los ríos (Ameca, Pitillal, Cuale), por lo tanto hay muy pocas barreras naturales que impidan el paso del agua en el caso de un desbordamiento. La infraestructura de la ciudad también es un factor importante puesto que, en realidad, no está preparada para contener situaciones de este tipo.

Los resultados recabados en el en análisis se basaron en una escala que consiste en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. De esta manera, se obtuvo que Puerto Vallarta registra valores muy altos de vulnerabilidad en cuanto a las zonas urbanas. En cuanto a las zonas altas, se puede apreciar que la vulnerabilidad es baja gracias a la topografía y orografía del mismo.



► **Figura 6:** Zonas de vulnerabilidad ante riesgo de inundaciones en Puerto Vallarta, Jalisco.
Fuente: Elaboración propia.



► **Figura 7:** Vulnerabilidad ante riesgos de inundación en la zona urbana de la cuenca hidrológica "El Pitillal".
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se pueden estimar los riesgos ante inundaciones en la zona urbana de la cuenca del Pitillal, que, al igual que el caso anterior, está ponderada por una escala de cinco categorías, en donde es posible observar que la mayor vulnerabilidad se encuentra en las zonas cercanas a la costa, así como las que tienen una cercanía con la ribera del río que lleva el mismo nombre. También podemos notar que, justo donde termina la mancha urbana, disminuyen bastante estos riesgos, tal como en el caso anterior, gracias a la orografía y topografía de la cuenca.

Discusión

El principal efecto del cambio climático a nivel global recae en el agua, pues al realizar un análisis de riesgos se obtuvo como resultado que la distribución de lluvias ya no se presenta con tanta frecuencia, sino con más intensidad. Esto es reiterado por la SEMARNAT (2013), pues menciona que los cambios en los patrones de temperatura y precipitación afectan la dinámica hidrológica y causan una mayor ocurrencia de eventos extremos como las sequías e inundaciones.

Uno de los causantes del cambio climático es el rápido desarrollo urbano, pues se modifica el paisaje y con esto su capacidad de resiliencia ante eventos extremos El Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA, 2017) asegura que los causes naturales que conforman la red hídrica original deben ser adecuados a las nuevas condiciones, pues de otra manera afectarían de forma directa su capacidad de desagüe e incrementarían las inundaciones.

Igualmente, los resultados del proyecto coinciden con CONAGUA (2009), pues afirman que las anegaciones son manifestaciones de la dinámica de la naturaleza, entonces no se pueden evitar ni pronosticar con certeza. Con estos estudios el hombre ha buscado medidas para protegerse de los efectos dañinos de las inundaciones. Dicho esto, las actividades para la disminución de los daños causados por la presencia de fenómenos hidrometeorológicos son relevantes dentro de la planeación urbana, por lo tanto, se considera como fundamental la puesta en marcha de un OET que coadyuve en la mitigación de los daños causados por los mismos.

En México existen ciudades que se asentaron cerca de un río o laguna para lograr abastecerse de agua, pero por el crecimiento poblacional se fueron modificando sus ecosistemas. Lo anterior tiene relación con lo que mencionan Llaguno-Guilberto *et al.* (2021), pues al registrarse un incremento poblacional cerca de cuerpos de agua, se ha llegado al punto de requerir la construcción de canales para el desalojo del agua pluvial y bordos para la protección de los habitantes contra inundaciones.

El acelerado crecimiento urbano en la ciudad de Puerto Vallarta ha hecho que la población busque un lugar donde vivir, es así que se buscan lotes o terrenos baratos y a menudo son asentamientos ubicados en zonas irregulares, ilegales y peligrosas. Tal como lo mencionan Díaz-Moreno & Cornejo-López (2016), en el caso de Puerto Vallarta, la mala práctica de rellenar lechos o causes de arroyos propicia asentamientos vulnerables en materia de Protección Civil.

Además, la falta de información sobre las cuencas hidrológicas en la creación de nuevas colonias causa mayores riesgos a la población, ya que no se tiene en consideración la afectación al equilibrio ambiental de las mismas, teniendo como consecuencia deslaves, derrumbes, hundimientos e inundaciones. Esto coincide con lo que reporta Llaguno-Guilberto *et al.* (2021), pues el crecimiento de la zona urbana ha rebasado la capacidad de las autoridades para integrar en el plan de desarrollo su planeación urbana, modificándose y adaptándose el entorno para satisfacer sus necesidades.

La ONU-Habitad (2022) confirma este hecho pues asegura que de no acelerarse las políticas de oferta de suelo habitacional bien localizado para las familias más pobres en las ciudades y no replantearse la política de construcción de vivienda social, se acelerarán procesos de ocupación de suelo en zonas de riesgo y de manera irregular, tal

y como está sucediendo en las colonias ubicadas en las riberas del río Pitillal, como es el caso de Playa Grande, ya que la mayoría de sus habitantes son de escasos recursos y mencionan que no se reciben apoyos del gobierno para resolver dichas situaciones de vulnerabilidad.

Finalmente, los resultados arrojados por este proyecto coinciden con Velasco *et al*. (2020), quienes mencionan que el uso de los SIG permite realizar análisis complejos, integrando a su vez información geográfica con datos específicos de las zonas de estudio y analizar de manera interactiva, permitiendo una constante actualización, logrando resultados con un mayor índice de eficiencia en comparación con la que se obtiene manualmente.

Conclusiones

En el presente proyecto se lograron identificar los principales efectos ambientales asociados a las inundaciones en la cuenca hidrológica del río Pitillal. Además, el crecimiento urbano sobre esta cuenca genera una afectación a tal grado de transformar la vulnerabilidad ante riesgos de inundación por eventos meteorológicos extraordinarios, tales como las avenidas o TLS. También, con la información obtenida es posible concretar que las lluvias que se registran en los puntos de estudio tienen un incremento en las que se encuentran más cerca de la costa. Por otro lado, la tendencia a disminuir se da mientras se encuentren a mayor altura, tal como lo es en las zonas altas de la cuenca.

Debido a la mala planeación urbana es que la ciudad se encuentra en un constante peligro, y es que, dicho desde un punto de vista enfocado en las ciencias ambientales, esta planeación no se llevó a cabo en función de los ecosistemas naturales de la región, pues no se tomaron en cuenta los efectos de las actividades humanas en la estructura (flora, fauna, suelo y, por supuesto, agua), así como las complicaciones que tendrían al no realizar un OET.

Se ha construido en zonas que no deberían, además, hubo un cambio antropogénico al cauce natural del río a conveniencia de las empresas encargadas de construcciones de viviendas y el gobierno del estado, todo esto con la finalidad de ofrecer lotes más baratos sin tomar en cuenta la exposición al peligro, puesto que el río, al tener una dirección en línea recta, sólo avanza con mayor velocidad, causando mayores afectaciones. Es necesario que Protección Civil cuente con estudios más detallados acerca de cada una de las cuencas que representan riesgo para ciertas colonias, a fin de propiciar y gestionar las acciones preventivas para minimizar dicho riesgo.

No hay forma de evitar que sucedan fenómenos naturales extremos, que con el calentamiento global se han ido tornando más intensos, sin embargo, se pueden tomar medidas para que, en caso de ocurrir, no se vuelvan letales.

El crecimiento ordenado de las ciudades es primordial para evitar daños colaterales producidos por fenómenos naturales, así como el de los producidos por el hombre. La planeación urbana es la herramienta que nos permite disponer de un desarrollo urbano integral, que responda a las exigencias futuras de la sociedad y atienda con agilidad los cambios permanentes del crecimiento territorial, demográfico y vial de la ciudad, así como evitar crear zonas con vulnerabilidad ante cualquier situación.

Se espera que el punto de vista ambiental ayude a trazar un nuevo rumbo en la planeación urbana y traiga consigo un modelo sostenible en la ciudad, permitiendo mitigar estos riesgos y poner sobre la mesa estrategias para que, en conjunto con la población, se logren evitar futuros desastres.

» Referencias bibliográficas

Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas* (Mx), 41, 7–25. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56904102

Ávalos Cotler H., Galindo Alcántar A., González Mora I. D., Pineda López R. F. & Ríos Patrón E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Ayuntamiento de Puerto Vallarta. (2019). Medio físico. Portal Electrónico. https://www.puertovallarta. gob.mx/2018-2021/Ciudad/localizacion.php

CENAPRED. (2010). *Tormentas Severas* (V. Ramos-Padilla, Ed.; 1a ed.). Serie Fascículos.

Díaz-Cordero, G. (2012). EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(2), 227–240. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004

Díaz-Gonzáles, A. O. (2004). *Manejo de cuencas y gestión del riesgo a desastres naturales, en el área de la mancomunidad de los municipios del centro de Atlántida, Honduras* [Tesis de maestría] Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2940

Díaz-Moreno, F., & Cornejo-López, V. M. (2016). Visualización de las cuencas hidrológicas que representan un riesgo potencial para la zona urbana de Vallarta. *Revista Tlamati Sabiduría*, 7(2).

Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payán, J., Watts-Thorp, C., & Cruz-Medina, I. R. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de Barlovento y Sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 279–287. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60811116002

Diario Oficial de la Federación (2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Ixtapa, Pitillal, Cuale, San Blas, Huicicila y Tecomala, mismas que forman parte de la Región Hidrológica número 13 Huicicila. Recuperado el 12 de julio de 2013, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5306513&fecha=12/07/2013#gsc.tab=0

González-Abraham, C., Ezcurra, E., Garcillán, P. P., Ortega-Rubio, A., Kolb, M., & Creel, J. E. B. (2015). Correction: The Human Footprint in Mexico: Physical Geography and Historical Legacies. *PLOS ONE*, 10(5), e0128055. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128055

Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 4(3), 163–173. https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173

INEGI. (2001). *Estudio Hidrológico Del Estado de Jalisco: INEGI. INEGI-Gob. del edo. de Jalisco.* https://books.google.com.mx/books?id=XY0jAQAAIAAJ

INEGI. (2019). *Uso de suelo y vegetación. Geografía y Medio Ambiente*. https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/

INEGI. (2022). *Portal de Geoinformación 2022. Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad (SNIB)*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* R.K. Pachauri & A. Reisinger (Eds.). Grupo Intergubernamental de Experto Sobre el Cambio Climático.

Iwahashi, J., & Pike, R. J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86(3–4), 409–440. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012

Llaguno-Guilberto, O. J., Maldonado-Silvestre, J., & Rodríguez-Varela, J. M. (2021). Retos ante la problemática de inundaciones en las ciudades. *Perspectivas IMTA*, 2. https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-33

Martínez-Hernandez, V., González-Ruelas, M. E., Carrillo-Gonzales, F. M., & Cornejo-López, V. M. (2014). Desastres por eventos meteorológicos y su percepción social en Puerto Vallarta, Jalisco. *Acta Republicana, Política y Sociedad*, 61–70.

Morales-Hernández, J. C., Montes-López, A. L., Frausto-Martínez, O., Cruz-Romero, B., González-Mercado, C. L., & Carrillo-González, F. M. (2021). Contaminación del aire en Puerto Vallarta, México. *Bitácora Urbano Territorial*, 31(2), 27–43. https://doi.org/10.15446/bitacora.v31n2.87800

Morán-Escamilla, J. (2017). *Escenarios de riesgos y desastres por sismos e inundaciones en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Colegio de San Luis y Codirección con la Universidad Autonoma de Aguascalientes.

NASA. (1999). Misiones de la NASA y la NOAA para monitorear incendios globales. In NASA Earth Observatory. ARSET.

NASA. (2018). *GIOVANNI*. EarthData The Brigde Between Aata and Science. https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/

OMM. (2022). *Ciclones Tropicales*. WMO. https://public.wmo.int/es/ciclones-tropicales#:~:text=Los%20ciclones%20tropicales%20generan%20vientos,reloj%20en%20el%20hemisferio%20sur.

ONU-Habitad. (2022). *Tendencias del Desarrollo Urbano en México*. El Programa de Las Naciones Unidas Para Los Asentamientos Humanos. https://onuhabitat.org.mx/index.php/tendencias-del-desarrollo-urbano-en-mexico

SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión* (H. Cotler-Ávalos, A. Galindo-Alcántar, D. Gonzáles-Mora, R. F. Pineda-López, & E. Ríos-Patrón, Eds.; Primera edición). Cuadernos de divulgación ambiental.

SEMARNAT. (2018). *¿Qué son las cuencas hidrológicas y las reservas de agua?*. Blog. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-son-las-cuencas-hidrologicas-y-las-reservas-de-agua#:~:text=Los%20diez%20decretos%20de%20Reservas,una%20proyecci%C3%B3n%20a%2050%20a%C3%B1os.&text=La%20cuenca%20hidrol%C3%B3gica%20es%20una,un%20punto%20com%C3%BAn%20de%20salida.

SIAPA. (2017). Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Gobierno de Jalisco.

Theobald, D. M. (2013). A general model to quantify ecological integrity for landscape assessments and US application. *Landscape Ecology*, 28(10), 1859–1874. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9941-6

Zuñiga-Tovar, A. E., & Magaña-Rueda, V. O. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect to land use cover change. *Investigaciones Geográficas*, 95. https://doi.org/10.14350/rig.59465

4

4.1 Factores de resiliencia ante huracanes en sistemas de infraestructura de agua potable en una ciudad costera

Anita Martínez Méndez
Investigadora posdoctoral del SECIHTI, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chetumal

Oscar Frausto Martínez
Investigador titular, División de desarrollo sustentable, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Ricardo Enrique Vega Azamar
Profesor titular docente, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chetumal

Herlinda del Socorro Silva Poot
Profesora titular docente, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chetumal

Palabras Clave: servidores públicos, análisis de riesgo, flujos de información, redundancia y normativas.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Shukla *et al*., 2020) planteó que los impactos serán especialmente en las zonas costeras bajas, donde se encuentran varias de las ciudades más grandes del mundo, que, aunque representan sólo el 2% del área terrestre total, aproximadamente el 13% de la población urbana mundial habita en ellas. Mientras que, a nivel nacional, de 32 entidades federativas que conforman la República Mexicana, 17 tienen apertura al mar y representan aproximadamente el 56 % del territorio nacional (CENAPRED, 2014).

De acuerdo con Adger (2000), dos tercios de los desastres costeros registrados cada año se asocian a fenómenos hidrometeorológicos como tormentas tropicales, huracanes e inundaciones, los cuales han puesto a prueba la resiliencia de los sistemas que conforman las ciudades y, por ende, los de infraestructura urbana, incluso se ha evidenciado la falta de capacidad de respuesta ante los desastres que han sucedido a lo largo de la historia.

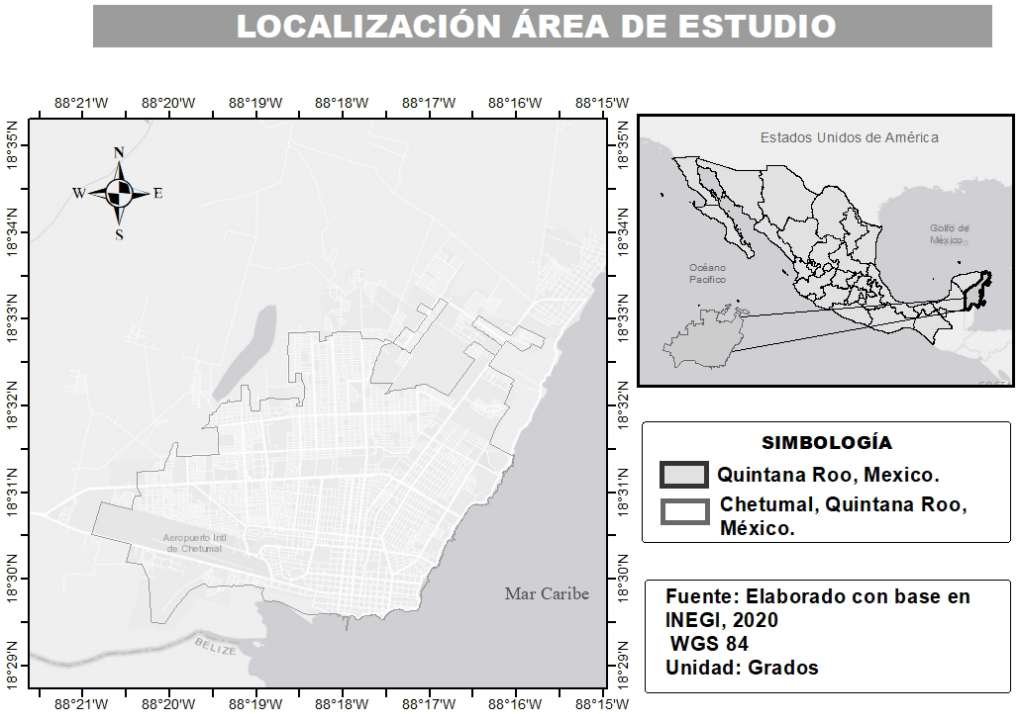
Los sistemas y redes de infraestructura urbana son considerados el eje central de las sociedades así como un componente clave de la vida económica, social y cultural de las comunidades y países; por ser un mecanismo de generación, almacenamiento y distribución de materia y energía. Su objetivo es satisfacer las necesidades básicas y complementarias del ser humano, haciendo posible las transacciones dentro de un espacio geográfico y económico determinado (Gay-Alanís, 2016; Giordano, 2012; Steele & Legacy, 2017; Tamvakis & Xenidis, 2013; USAID, 2013).

En el contexto de desastres asociados a huracanes, los sistemas de infraestructura urbana son un elemento fundamental en los espacios urbanos, dada su interdependencia entre ellos y con otros componentes de la estructura urbana. Además, se han convertido en esenciales en los momentos de crisis (Giordano, 2012; Peña *et al*., 2015; ProDUS & UCR, 2014; Steele & Legacy, 2017; Tyler& Moench, 2012).

El paradigma de resiliencia se reconoce como una alternativa que puede contribuir a mejorar y fortalecer la capacidad de respuesta de los sistemas de infraestructura ante diversas afectaciones (Metzger & Robert, 2013). Sin embrago, los avances en la evolución del concepto, cuantificación y evaluación con enfoque en infraestructura se han dado en el sector de la ingeniería (por ingenieros estructurales); el cual ha adoptado la orientación sistémica que se planteó en las ciencias naturales y sociales. Por tanto, están en proceso de adaptarlo para una adecuada planificación, diseño y fortalecimiento de las capacidades de respuesta de sus sistemas ante diversos eventos, como son los huracanes. Además, se continúa trabajando en buscar la integración socio-física de los sistemas, con el objetivo de integrar los factores sociales y físicos que inciden en la resiliencia de los sistemas, donde los involucrados de manera directa con los sistemas representan un papel fundamental para la identificación de dichos factores. Por ello, el presente trabajo tuvo la finalidad de identificar, a través de los servidores públicos, los factores que inciden en la resiliencia de los sistema de infraestructura de agua potable ante huracanes en una ciudad costera.

Área de estudio

La localidad urbana de Chetumal es un asentamiento costero y capital del estado de Quintana Roo, con 1,857,985 habitantes que se dedican al desarrollo de actividades terciarias, principalmente a la administración pública y el comercio (INEGI, 2020). Se ubica en el extremo suroriental de México, en el Caribe, entre los paralelos 18° 33’ 46” y 18° 29’ 40”, y en los meridianos 88° 21’ 57” y 88° 16’ 45”, en el municipio de Othón P. Blanco (Figura 1). Tiene una superficie de 18 158 hectáreas (IMTA-CAPA, 2015). El relieve es plano con elevaciones suaves y una altitud promedio de 10 m s.n.m. Su clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 26.7 °C, las mínimas y máximas promedio oscilan entre 22.2 y 32.6°C. La precipitación media anual es de 1,258 mm. Predomina el suelo de tipo gleysol, caracterizado por un drenaje deficiente, con cobertura vegetal de selva alta y mediana subperennifolia (INEGI, 2020).



► **Figura 1.** Ubicación geográfica de la localidad urbana de Chetumal, Quintana Roo.
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

Metodología

El diseño de investigación fue cualitativo de carácter exploratorio. Se utilizó como instrumento una guía de entrevista semi-estructurada, la cual tuvo como objetivo determinar los factores que inciden en la resiliencia ante huracanes en los sistemas de infraestructura de agua potable en la localidad urbana de Chetumal.

El guion de dicha entrevista fue organizado en cinco apartados de acuerdo con los principios de resiliencia propuesto por Bruneau *et al.* (2003), al cual se le incorporó una sección de datos generales. Por tanto, se conformó por cinco secciones: 1) datos generales; 2) robustez; 3) redundancia; 4) recursos y 5) rapidez. Cada una de ellas se integró por una cantidad variable de preguntas relacionadas con factores que influyen en la resiliencia del sistema de infraestructura de agua potable al paso de huracanes. La guía de entrevista semi-estructurada se aplicó por medio de la técnica entrevista directa, a ocho servidores públicos de la Comisión Nacional del Agua y Comisión de Agua potable y Alcantarillado, dado que en la zona de estudio la construcción, operación y mantenimiento del sistema está a cargo de estas.

Los participantes fueron seleccionados a partir del criterio "experiencia de huracanes durante su gestión laboral", y dado que no existe un registro sobre los servidores que cumplieran con ese criterio, se optó por implementar el muestreo no probabilístico de bola de nieve, el cual nos permitió identificar a los servidores públicos clave que cumplieran con dicha característica.

La información de las entrevistas se analizó con base en cuatro categorías discursivas: robustez, recursos, redundancia y rapidez. El análisis de cada una se realizó de acuerdo con el número variable de preguntas, de tal manera que se conoció la particularidad de cada una y se comparó con la teoría.

Resultados y discusión

Características generales de los actores clave

El 90% de los servidores públicos entrevistados son hombres, tienen formación profesional de ingenieros civiles y técnicos en construcción. Actualmente ocupan cargos de director de normatividad, director de obras de la zona sur, subgerente técnico, encargado de la subdirección de agua potable, subdirectora administrativa, jefe del centro meteorológico, supervisor de obras y auxiliares de obras. Sus edades se encuentra entre 26 y 55 años y cuentan con experiencia laboral entre 10 y 25 años. El 90% de ellos ha vivido la experiencia de un huracán o, en su caso, participado en las obras de recuperación.

Factores de resiliencia del sistema de infraestructura de agua potable ante el impacto de los huracanes en una ciudad costera

Robustez

La robustez se refiere a la capacidad de un sistema de no colapsar totalmente ante una falla, sino conservar el mínimo necesario de funcionamiento ante choques provocados por un fenómeno perturbador (Bruneau *et al.*, 2003). En este componente, se identificó que a pesar de asociarse a cuestiones estructurales y tipo de materiales; los servidores públicos señalaron los siguientes factores como los de mayor incidencia en la resiliencia del sistema de agua potable (Tabla 1).

En relación con los factores "Normativas y códigos de construcción", fueron considerados relevantes dado que rigen las especificaciones de diseño y ejecución de las obras de infraestructura de agua potable. Entonces, son elementos que inciden de manera directa en la calidad de éstas. Dentro de las situaciones que han evidenciado su importancia está en la incongruencia entre el diseño de los sistemas y su construcción. Al respecto, O'Rourke *et al.* (2001) y Rinaldi (2004) sostienen que la robustez

en los sistemas de infraestructura se logra por medio de una planificación adecuada de los proyectos e integrando la resiliencia en todas sus fases, así como mediante la implementación de los códigos de construcción como un indicador prioritario.

En ese mismo sentido, Bruneau *et al*. (2003) argumentan que la implementación y el éxito de la planificación técnica así como del diseño de los sistemas de infraestructura, están determinadas por medidas institucionales, que van desde nuevas operaciones y procesos, a nuevas regulaciones y estándares, hasta cambios importantes en las políticas e instituciones; como pueden ser la actualización e implementación de manuales y reglamentos que guían la construcción de los sistemas de infraestructura. Esto coincide con lo planteado por Gallego-Lopez & Essex (2016), quienes señalan que la buena gobernanza es aquella que define roles y responsabilidades de las organizaciones con la finalidad de no duplicar funciones, recursos financieros y humanos; así como tener una responsabilidad pública, trasparencia, medidas anticorrupción y comprender e involucrarse con las perspectivas de resiliencia.

Tabla 1. Factores de robustez que inciden en la resiliencia del sistema de agua potable.

Factores identificados	Descripción	Tipo devariable	Categoría/Unidad
Instrumentos normativos	Instrumentos jurídicos que tienen por objeto reglamentar la aplicación del artículo 134 de la Constitución Política en materia de contrataciones de obras públicas y servicios relacionados con las mismas. Asimismo, son una referencia sobre criterios, procedimientos, normas, índices y parámetros para la construcción de obras. La existencia y actualización contribuye a la implementación de los más recientes avances tecnológicos con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe actualizado. 2: Existe desactualizado.
Códigos de construcción	Los códigos de construcción son aquellos encargados del control del ejercicio de la ingeniería civil, sobre todo en el diseño, construcción y supervisión de estructuras de las obras que corresponden a cada uno de ellos. Se consideran un factor incidente en la resiliencia de los sistemas de infraestructura, dado que depende de su adecuada implementación pueden llevar al éxito o al fracaso un sistema de infraestructura.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe actualizado. 2: Existe desactualizado.
Años de vida útil	Se refiera a la escala de tiempo óptima de años que tiene un sistema de infraestructura para funcionar adecuadamente; de este factor depende directamente la funcionalidad del sistema ante un impacto.	Cuantitativa	Número de años
Planes de mantenimiento	La finalidad de un plan de mantenimiento es proporcionar atención oportuna a los componentes que conforman los sistemas de infraestructura para mantenerlos en condiciones físicas y funcionales óptimas en caso de un evento perturbador, para que estos puedan funcionar de manera adecuada y con ello contribuir a la resiliencia de estos y a mejorar la calidad de vida en caso de desastre.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe actualizado. 2: Existe desactualizado.
Análisis de riesgo	Este factor permite conocer y estudiar los peligros y amenazas a los que se está expuesto e identificar dónde, cuándo y cómo afectan, lo cual permite a las sociedades prepararse ante un impacto.	Cuantitativa nominal	0: No se realiza 1: Si, se realiza

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas a los funcionarios de CONAGUA.

En relación con los "años de vida", es un factor clave dado que su funcionamiento optimo depende de dicho factor, ningún elemento que haya cumplido su vida útil podrá funcionar en condiciones adecuadas. Hallegatte, Shalizi y Lecocq (2009; citados

por Giordano (2012)) sostienen que las infraestructuras de agua potable (como son: presas, embalse, redes de distribución, entre otras) tienen una escala de tiempo que va de 20 a 300 años. Mientras que en los manuales de las instancias normativas los años de vida varían de acuerdo con las características de cada elemento del sistema, es decir, para establecer los años de vida de un elemento, se consideran factores como el tipo de material, capacidad, utilidad, entre otros (CONAGUA, 2016). En contraste, desde la perspectiva de Gallego-Lopez & Essex (2016), los años de vida de los sistemas de infraestructura se asocian a la inversión que se realiza en los mismos, por lo tanto, su vida útil la determina la cantidad de recursos económicos destinados para cada componente de los sistemas de infraestructura.

El factor "planes de mantenimiento" es relevante dado que contribuye a mantener a los sistemas en condiciones óptimas de funcionamiento y contribuye a cumplir con la vida útil establecida. Para Cox & Hamlen (2015), un sistema de infraestructura no puede ser resiliente si no se mantiene adecuadamente, puesto que el clima y el riesgo de desastres aumentan los recursos, la experiencia y las habilidades necesarias para mantener la infraestructura en óptimas condiciones. Además, que el mantenimiento preserva el valor económico de la inversión en infraestructura, extendiendo su vida útil hacia el futuro.

Por último, en relación con el "análisis de riesgo" fue considerado clave dado que el conocimiento sobre los riesgos y las amenazas a las cuales están expuestos los sistemas de infraestructura permitiría establecer estrategias y planes de acción para responder ante los diversos fenómenos. En tal sentido, Baker (2012) afirma que los daños ocasionados por eventos inesperados en los sistemas de infraestructura están asociados directamente con la falta de análisis de riesgos a los cuales están expuestos. En ese mismo sentido, Bruneau *et al.* (2003) y Gallego-Lopez & Essex (2016) mencionan que los daños en los sistemas de infraestructura pueden minimizarse en diferentes contextos y tiempos, con una adecuada planificación en la que se integre los riesgos asociados al cambio climático.

Recursos

Se entiende por recursos la capacidad social, física y financiera con la que cuenta un sistema de infraestructura para responder ante diversas perturbaciones (O'Rourke *et al.*, 2001). En este componente se encontraron tres factores considerados relevantes: monitoreo de la trayectoria de huracanes, planos del sistema de infraestructura y zonas de captación (Tabla 2).

Tabla 2. Factores de recursos que inciden en la resiliencia del sistema de agua potable.

Factores identificados	Descripción	Tipo de variable	Categoría/Unidad
Monitoreo de la trayectoria de huracanes	El monitoreo se refiere al seguimiento y supervisión de manera constantes durante la temporada de huracanes, de junio a noviembre de cada año, por las instancias correspondientes, con la finalidad de mantener informados a las instituciones gubernamentales correspondientes y a la población para que se encuentren preparados ante cualquier impacto. Y con ello contribuir a disminuir las vulnerabilidades e incrementar la resiliencia.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe
Planos del sistema de infraestructura	Los planos son un elemento guía para la supervisión, mantenimiento y seguimiento del funcionamiento de un sistema de agua potable antes, durante y posterior al desastre. La existencia de estos contribuye a dar atención de manera oportuna a cada elemento.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe actualizado. 2: Existe desactualizado.

Factores identificados	Descripción	Tipo de variable	Categoría/Unidad
Zonas de captación	Se refiere a las diversas zonas donde se capta el agua por medio de pozos de captación. El contar con éstas permite abastecer de manera oportuna en caso de un impacto o desastre.	Cuantitativa	Número de zonas de captación

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas.

En relación con el monitoreo de la trayectoria de huracanes, se reconoce como factor clave puesto que está asociado con el conocimiento en el tiempo oportuno sobre los posibles impactos, lo cual permite la preparación de las instituciones gubernamentales involucradas y de la sociedad. Al respecto, O'Rourke *et al.* (2001) consideran que además del monitoreo de los huracanes, uno de los factores relevantes para la comunicación efectiva de riesgos es el nombramiento de huracanes, que identifica y personaliza el peligro; señalan que de esa manera se hace tangible y transparente para las personas que podrían estar en el camino a un desastre.

Por otro lado, en lo referente al factor "plano del sistema de infraestructura de agua potable", los servidores públicos señalaron que contar con planos es prioritario, puesto que, una vez que las empresas constructoras entregan la obra y finaliza la fianza de vicios ocultos, no están obligadas a realizar ningún tipo de reparación o mantenimiento en caso de que un sistema falle. Por lo tanto, la dependencia ejecutora (CAPA) y, en algunos casos, la normativa CONAGUA son las encargadas de dar atención ante desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos.

Baker (2012) enfatiza en que contar con planos de localización de los sistemas de infraestructura permitirá dar atención de manera oportuna a las fallas que se presenten durante un desastre y a su vez evitará afectaciones con efecto cascada en los elementos que componen el sistema o incluso a otros sistemas.

Finalmente, el factor "zonas de captación" fue considerado estratégico porque su ubicación y planificación del funcionamiento permite el abastecimiento antes, durante y posterior a un impacto. Para Gallego-Lopez & Essex (2016), la planificación adecuada de todos los elementos que conforman un sistema de infraestructura por especialistas evitará la construcción de sistemas de infraestructura con falta de recursos y redundancia para responder ante desastres. Escenario que hace evidente la interrelación que existe entre los componentes de resiliencia, dado que la ausencia de recursos se relacionada directamente con la falta de redundancia.

Redundancia

La redundancia la definen como aquellas propiedades del sistema que permiten opciones, elecciones y sustituciones bajo estrés. Es decir, la capacidad de adaptarse (Gallego-Lopez & Essex, 2016), de tal manera que el sistema pueda ajustarse, modificar o cambiar sus características y acciones con la finalidad de responder mejor a las perturbaciones y estrés del clima (Béné *et al.*, 2018; ONU/EIRD, 2015). En esta sección se identificó: el porcentaje de servicio, sitios alternativos de funcionamiento, flujos de información y conocimiento del concepto de resiliencia (Tabla 3).

El "porcentaje de servicio" es un factor clave ante un impacto, puesto que determina la dotación de un servicio básico e indispensable para la salud. Sin embargo, en opinión de O'Rourke *et al.* (2001), el uso de energía eléctrica en las estaciones de bombeo de agua potable es indispensable en caso de desastre, ya que permite la operación de éstas, y su falta de operatividad puede ocasionar daños en efecto cascada tanto en el sistema como en otros sistemas. Es decir, que la afectación en el porcentaje de servicio puede no relacionarse directamente con alguna falla del sis-

tema, sino con el de la energía eléctrica. En ese sentido, Labaka *et al.* (2016) afirman que la electricidad y el agua son recursos críticos de los que depende la sociedad, además que son identificados como derechos humanos, sin embargo, a pesar de ello, ambos tienen desafíos para realizar su entrega en condiciones normales y en caso de desastre.

El factor "sitios alternativos de abastecimiento de agua potable" es considerado estratégico, dado que permite el abastecimiento del vital líquido en caso de que las zonas de captación se vean afectadas ante un impacto, lo cual contribuye en la construcción de un sistema redundante ante un evento. En opinión de Gallego-Lopez & Essex (2016) y O'Rourke *et al.* (2001), la redundancia de los sistemas de infraestructura se consigue creando infraestructuras con diversas alternativas de solución en caso de una falla, es decir, que tengan opciones para resolver las contrariedades que se presenten ante una afectación, de tal manera que puedan seguir operando en caso de desastre.

Tabla 3. Factores de recursos que inciden en la resiliencia del sistema de agua potable.

Factores identificados	Descripción	Tipo de variable	Categoría/Unidad
Porcentaje de servicio	Se refiere al porcentaje de servicio que logra proporcionarse con el sistema de infraestructura de agua potable ante un impacto. Este es un factor relevante dado que representa el abastecimiento de un servicio primordial y básico ante un impacto, pues es indispensable para la salud.	Cuantitativa	Porcentaje
Sitios alternativos de funcionamiento	Este factor se refiere a los sitios que puedan sustituir, en caso de un impacto, a aquellos de los cuales se abastece el sistema. La existencia de estos da la oportunidad al sistema de continuar funcionando ante una afectación en el mismo.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe actualizado. 2: Existe desactualizado
Flujos de información	Este factor permite el intercambio de información entre los administradores, el personal y los usuarios. Lo cual contribuye a la eficiencia de tal intercambio y esto a su vez da la pauta para transmitir lecciones posteriores a desastres y emergencias.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe
Conocimiento del concepto de "resiliencia"	Este factor se refiere al conocimiento sobre el paradigma de resiliencia, para concientizar y enfocar las acciones de construcción y respuesta de los sistemas de infraestructura de agua potable desde un enfoque resiliente ante cualquier impacto.	Cuantitativa nominal	0: No existe. 1: Existe

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas.

Por otro lado, en relación con los "flujos de información", cabe señalar que el intercambio oportuno de información entre las dependencias con injerencia en el funcionamiento del sistema permite tener conocimiento sobre las responsabilidades, instrumentos, planes y responsabilidades que les compete; lo cual sirve para no realizar trabajos duplicados al paso de los diversos fenómenos. Esto concuerda con las recomendaciones de Paz *et al.*, (2017) y Labaka *et al.* (2016), quienes señalan que el intercambio de información es importante y primordial con la finalidad de transmitir rápidamente la información entre los administradores de sistemas de infraestructura, el personal y los usuarios, previo y durante un desastre.

Para O'Rourke *et al.* (2001) el liderazgo es, quizás, el factor más crítico para promover la resiliencia, y también el menos predecible. Sin embargo, menciona que los líderes efectivos requieren buenos consejos. Por lo tanto, agregan que la comu-

nidad científica y de ingeniería debe estar preparada para comunicar información precisa y oportuna a los funcionarios gubernamentales. En ese sentido, Labaka *et al*. (2016) consideran que en caso de desastre se debe establecer un único punto de autoridad para coordinar los trabajos en los diversos sistemas de las urbes, para con ello poder examinar de manera oportuna los riesgos y las posibles fallas en cascada de los sistemas.

Otro factor importante fue el conocimiento sobre el concepto de "resiliencia", puesto que lo que se desconoce no se puede trabajar ni mejorar. En ese sentido, Paz *et al*. (2017) plantean que la falta de conocimiento de contextos y enfoques constructivos puede llevar a la construcción de infraestructuras que no sean aptas para las características particulares de cada espacio. Además, Paz *et al*. (2017) y Labaka *et al*. (2016) sugieren que se debe mejorar la base de habilidades de desarrollo entre los consultores de ingeniería, así como las de supervisión de gestión, para poder construir infraestructuras con bases resilientes de acuerdo con cada contexto.

Rapidez

El tiempo de recuperación de un sistema de infraestructura ante una perturbación es parte de la resiliencia (Tabla 4).

Tabla 4. Factores de recursos que inciden en la resiliencia del sistema de agua potable.

Factores identificados	Descripción	Tipo de variable	Categoría/Unidad
Tiempo de recuperación	Factor relacionado con el nivel de resiliencia, se refiere al tiempo de recuperación de un sistema de infraestructura. Desde el enfoque de resiliencia, mientras menos tiempo lleve en recuperarse indica que el sistema tiene mayor resiliencia.	Cuantitativa	Horas Días Meses

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas.

El factor "tiempo de recuperación" es determinante en la resiliencia del sistema, pues de éste depende la reactivación de un servicio básico para la salud en caso de desastre. En ese sentido, Bruneau *et al*. (2003) y Gay (2016) revelan que el tiempo de recuperación de un sistema de infraestructura ante un desastre está relacionado con el nivel de resiliencia de estos, es decir, mientras menos tiempo lleve en recuperarse indica que el sistema tiene mayor resiliencia.

Para Labaka *et al*. (2016), el tiempo de recuperación de un sistema de infraestructura ante una perturbación es determinante en su resiliencia, puesto que es una propiedad que surge de las interacciones entre los elementos del sistema a lo largo del tiempo, y no de elementos individuales. Es decir, la construcción de sistemas de infraestructura resilientes inicia antes de la afectación de un fenómeno, continúa durante y posterior al impacto Al considerar que, previo al impacto, el sistema debió ser construido con capacidades para poder dar respuesta a los fenómenos que se presentan en su contexto, durante el impacto se reconocen las capacidades que tiene para adaptarse ante las contrariedades generadas y, finalmente, posterior al impacto revela su rapidez para recuperarse, su capacidad de adaptación y la flexibilidad de transformación en caso de ser necesario.

Lo anterior concuerda con Paz *et al*. (2017), quienes argumentan que la resiliencia en un sistema es la combinación de las capacidades de absorción, adaptación y trasformación. Es decir, la construcción de resiliencia no se da en un sólo paso, como tampoco es única ni fragmentada.

Conclusión

El reconocimiento y la experiencia de eventos (huracanes), a lo largo de un periodo laboral, es clave para fortalecer la resiliencia en sistemas de infraestructura. Esto permitió a los servidores públicos identificar y delimitar los factores que han tenido y continúan incidiendo en la resiliencia del sistema de infraestructura de agua potable.

Los servidores públicos identificaron 13 factores claves que inciden en la resiliencia de sistemas de infraestructura ante huracanes: normativas, años de vida, planes de mantenimiento, análisis de riesgo, monitoreo de huracanes, planos, zonas de captación, porcentaje de servicio durante el impacto, sitios alternativos de abastecimiento, flujos de información, conocimiento sobre resiliencia y tiempo de recuperación ante un desastre. Coincidieron en que estos mismos fortalecerán la resiliencia de dicho sistema y permitirá responder ante situaciones de crisis. Cabe señalar que estos no son limitativos debido a que son acordes para el caso de estudio. Por tanto, para su aplicación en otras urbes deberán ser adaptados a las particularidades de cada una de ellas.

Por otra parte, la identificación de factores no estructurales contribuye a los avances en la investigación de resiliencia en sistemas de infraestructura, dado que las investigaciones se han enfocado a la parte estructural estos.

De igual manera, el reconocimiento de dichos factores mostró la necesidad de monitorear y plantear estrategias de solución para la implementación de factores no estructurales como es la aplicación de normativas y el diseño con base en planos de proyecto ejecutivo.

Finalmente, el trabajo evidenció la necesidad de seguir trabajando en la identificación, análisis y delimitación de factores, puesto que no todos aquellos que ya han sido identificados aplican o inciden para todos los contextos y eventos. Sin embargo, la construcción de la resiliencia en sistemas de infraestructura debe darse de manera continua, al considerar que los escenarios de los eventos van cambiando al transcurrir el tiempo.

Agradecimientos

Se expresa agradecimiento la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por otorgar financiamiento posdoctoral a la primera autora, por medio de la convocatoria 2022 (2), para realizar el proyecto.

» Referencias

Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: are they related?. *Progress in Human Geography*, 24(3), 347–364. https://doi.org/10.1191/030913200701540465

Baker, J. L. (2012). Climate change, disaster risk, and the urban poor: Cities building resilience for a changing world (Vol. 1 of 2). *World Bank*. http://documents.worldbank.org/curated/en/644301468338976600

Béné, C., Mehta, L., McGranahan, G., Cannon, T., Gupte, J., & Tanner, T. (2018). Resilience as a policy narrative: potentials and limits in the context of urban planning. *Climate and Development*, 10(2), 116–133. https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1301868

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752. https://doi.org/10.1193/1.1623497

CAPA-IMTA. (2013). *Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo* (V. J. Bourguett-Ortiz, Ed.). Congreso IMTA 2013.

CENAPRED. (2014). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2012*. Secretaría de Gobernación.

CONAGUA. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* (Vol. 6). Comisión Nacional del Agua.

Cox, R. S., & Hamlen, M. (2015). Community Disaster Resilience and the Rural Resilience Index. American Behavioral Scientist, 59(2), 220–237. https://doi.org/10.1177/0002764214550297

Dupar, M. (2020). *Informe especial del IPCC sobre el cambio climático y la tierra: ¿qué significa para América Latina?*.

Gallego-Lopez, C., & Essex, J. (2016). *Designing for infrastructure resilience*. https://doi.org/10.12774/eod_tg.july2016.gallegolopezessex2

Gay-Alanís, L. F. (2016). Infraestructura resiliente. *Entretextos*, 8(24), 1–10. https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.201624347

Giordano, T. (2012). Adaptive planning for climate resilient long-lived infrastructures. *Utilities Policy*, 23, 80–89. https://doi.org/10.1016/j.jup.2012.07.001

INEGI. (2020). *Censo de población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#:~:text=El%20Censo%20de%20Poblaci%C3%B3n%20y,viviendas%20para%20obtener%20informaci%C3%B3n%20sobre

IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014. Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.; Final). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Labaka, L., Hernantes, J., & Sarriegi, J. M. (2016). A holistic framework for building critical infrastructure resilience. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.005

Metzger, P., & Robert, J. (2013). Elementos de reflexión sobre la resiliencia urbana: usos criticables y aportes potenciales. *Territorios*, 28, 21–40. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35728173002

ONU/EIRD. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Conferencia Mundial de las Naciones Unidas.

O'Rourke, T. D., Jeon, S. S., Eguchi, R. T., & Huyck, C. K. (2001). Advanced GIS for loss estimation and rapid post-earthquake assessment of building damage. *Research Progress and Accomplishment*, 157–164.

Paz, O., Méndez, R., & Mukerji, R. (2017). *Infraestructura resiliente bajo un enfoque de reducción del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático, Marco conceptual*. HELVETAS Swiss.

Peña, L. C., Miranda-Velázquez, A., & Gómez-Torres, M. (2015). *IDEAL 2014. La infraestructura en el desarrollo de América Latina. Infraestructura y cambio climático*. CAF.

ProDUS, & UCR. (2014). *Evaluación de la vulnerabilidad y adaptación de infraestructura ante el cambio climático* (R. P. Mesalles, Ed.; Final). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Rinaldi, S. M. (2004). Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. Proceedings of The*, (pp. 8). https://doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265180

Steele, W., & Legacy, C. (2017). Critical Urban Infrastructure. *Urban Policy and Research*, 35(1), 1–6. https://doi.org/10.1080/08111146.2017.1283751

Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., Van Diemen, R., McCollum, D., ... & Malley, J. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Tamvakis, P., & Xenidis, Y. (2013). Comparative Evaluation of Resilience Quantification Methods for Infrastructure Systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 74, 339–348. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.030

Tyler, S., & Moench, M. (2012). A framework for urban climate resilience. *Climate and Development*, 4(4), 311–326. https://doi.org/10.1080/17565529.2012.745389

USAID. (2013). *Medidas para abordar el impacto del cambio climático en la infraestructura: preparándose para el cambio*. Engility Corporation.

4.2 Resiliencia comunitaria ante riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo

José Manuel Camacho Sanabria
Cátedra SECIHTI, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Rosalía Chávez Alvarado
Cátedra SECIHTI, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Alicia Guadalupe Robertos Pinto
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Palabras Clave: GOAL, Resiliencia, Inundaciones.
ODS: 11 y 13 Ciudades y Comunidades Sostenibles y Acción por el Clima.

Introducción

El concepto de resiliencia continúa creciendo en influencia y prominencia en los programas nacionales e internacionales que buscan mejorar la capacidad individual y colectiva para prepararse y responder a los desastres (Mayer, 2019). La resiliencia comunitaria, por su parte, es un concepto más reciente que la resiliencia individual, se refiere a los comportamientos resilientes colectivos de los individuos, que requieren de la participación de los miembros de la comunidad para que asuman una mayor responsabilidad en la mejora de su propia resiliencia, dentro de un contexto social local que implica complejas interrelaciones (De Dios & Arciniega, 2013; Soetanto *et al.*, 2017).

Entender la resiliencia ante inundaciones es discernir el contexto del cambio climático, ya que se prevé un aumento considerable en la frecuencia y magnitud de eventos climáticos y meteorológicos extremos, entre ellos inundaciones potencialmente catastróficas. A partir del 2005 existen acuerdos internacionales, como el de Hyogo y Sendai, para reducir el riesgo de desastre (RRD). Según cifras de la International Disaster Database, durante los años 2000 a 2019 las inundaciones afectaron a un total de 1,650 millones de personas, causaron alrededor de 122,000 muertes y produjeron daños en todo el mundo calculados en 563,000 millones de dólares estadounidenses. En este mismo periodo, se registraron un total de 3,254 eventos de inundaciones en todo el planeta, en comparación con los 1,389 durante el periodo 1980-1999 (Aznar-Crespo *et al.*, 2021).

En América Latina, de acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas, en las últimas dos décadas se presenciaron cerca de 550 eventos de inundación que afectaron a 53 millones de personas, con pérdidas económicas de más de mil millones de dólares, lo que convierte a las inundaciones en las catástrofes naturales más costosas por el tipo de pérdidas, no sólo por viviendas e infraestructura, sino por

modificar o desaparecer entornos naturales y provocar migraciones internacionales forzadas (ONU México, 2023; Sarmiento *et al*., 2020). Justamente en México, durante el periodo 1900-2018, se registraron 69 desastres asociados a las inundaciones que afectaron 4,117,678 habitantes y ocasionaron la muerte de 4,346 personas (Alcántara-Ayala, 2019).

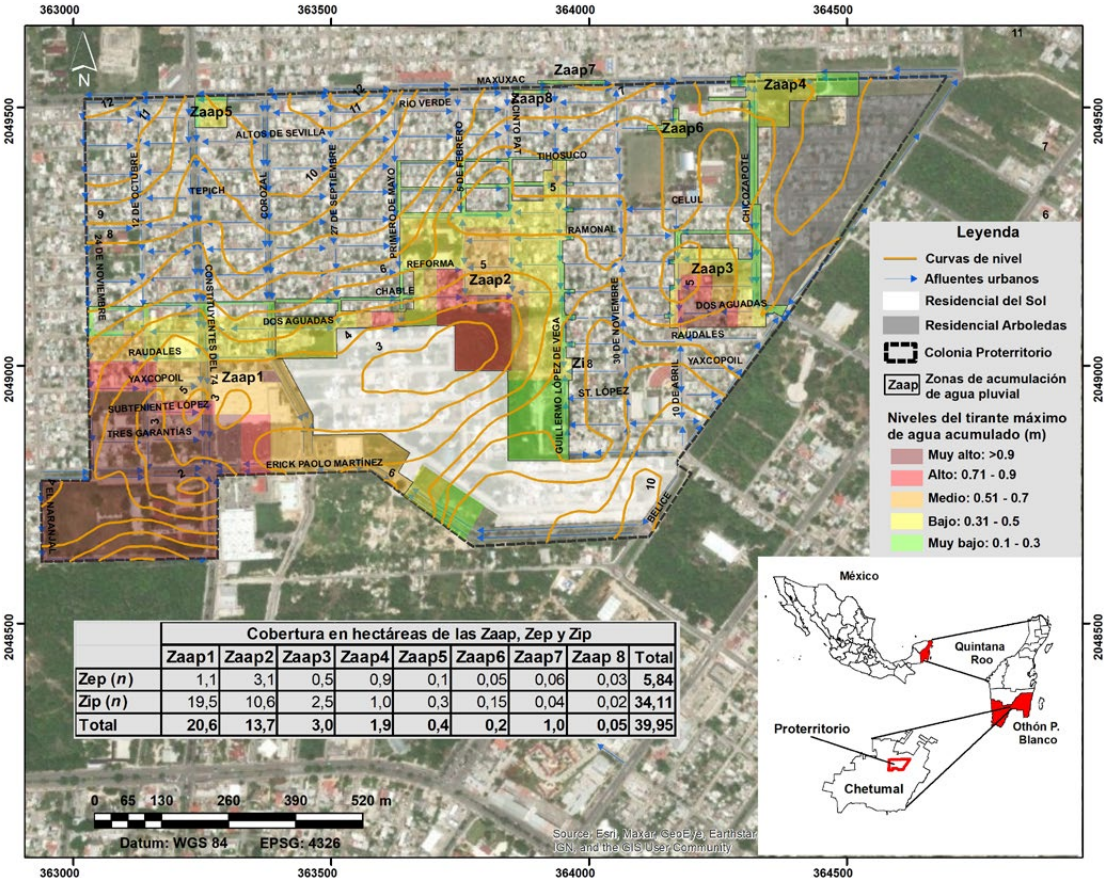
En la literatura la evaluación de la resiliencia comunitaria está ganando popularidad como un medio para ayudar a prepararse mejor para responder y recuperarse de eventos potencialmente perturbadores (Allen *et al*., 2020), como las inundaciones pluviales que han impactado intensamente zonas urbanas de todo el mundo (Deng *et al*., 2016; Dillenardt *et al*., 2022; Elboshy *et al*., 2019; Mobini *et al*., 2021; Padilla-Agamez & Gónima, 2015; Pagliacci *et al*., 2020; Palla *et al*., 2018; Rajapakse & Premalal, 2021; Santos-Cerquera & Caamaño, 2020; Talledos & Velázquez, 2022; Zambrano *et al*., 2018; Zimmermann y Bracalenti, 2017).

Los estudios subrayan la existencia de instrumentos y herramientas que han sido elaborados e implementados para la evaluación de la resiliencia comunitaria ante desastres (Cutter *et al*., 2014; FICR, 2017; GOAL, 2015; Keating *et al*., 2017; McCaul *et al*., 2019; McCaul & Mitsidou, 2016; Pfefferbaum *et al*., 2013; UNISDR, 2017; Zurich, 2017). En Quintana Roo se han desarrollado investigaciones previas acerca de la resiliencia urbana costera (Camacho-Sanabria *et al*., 2019, 2020; Chávez-Alvarado *et al*., 2019; Chávez-Alvarado & Camacho-Sanabria, 2018; Martínez-Méndez, Frausto-Martínez, *et al*., 2018; Martínez-Méndez, Travieso-Bello, *et al*., 2018; Velázquez-Torres *et al*., 2019). Sin embargo, existen vacíos en el conocimiento respecto a la resiliencia ante el riesgo por inundaciones a nivel comunitario. Por tanto, esta investigación tiene como objetivo evaluar la resiliencia comunitaria ante el riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo. Esto con el propósito de identificar aspectos prioritarios por atender que coadyuven al diseño y aplicación de estrategias, así como acciones orientadas a la promoción y fortalecimiento de la resiliencia comunitaria ante inundaciones pluviales, a escala de barrio o colonia.

Metodología

Proterritorio es una colonia (o barrio) de la ciudad de Chetumal, se localiza al sureste de la República Mexicana, particularmente al sur del estado de Quintana Roo, en el municipio de Othón P. Blanco, entre las coordenadas 18°31’24” y 18°31’55” latitud norte, y 89°41’57” y 89°42’52” longitud oeste (Figura 1). Tiene una superficie de 155.89 ha y una población de aproximadamente 14 745 habitantes (INEGI, 2020a). Su elección obedece a que históricamente ha sido una de las colonias más afectadas por las inundaciones pluviales que ocasionan los eventos extremos de precipitación asociados a diversos fenómenos hidrometeorológicos. Incluso, tras el paso de los huracanes Roxana y Mitch en octubre de 1995 y octubre de 1998, respectivamente, permaneció inundada por dos meses, impidiendo que la población habitara sus viviendas. Aún cuando se ha implementado, en algunos sitios de esta colonia, infraestructura pluvial como medida de control y protección ante las inundaciones pluviales, continúa la necesidad de disminuir su riesgo.

Considerando lo anterior, en el presente estudio se aplicó la metodología GOAL que se caracteriza por su enfoque cualitativo. Utiliza datos primarios recopilados mediante un instrumento (https://resiliencenexus.org/arc_d_toolkit/what-it-is/) que comprende 30 componentes clave que abarcan cuatro áreas temáticas correspondientes a las cuatro prioridades de acción del Marco de Sendai para la Reducción de Riesgos de Desastres 2015-2030: A) Comprender el riesgo de desastres, B) Fortalecer la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres, C) Reducir la vulnerabilidad a desastres para mejorar la resiliencia, y D) Mejorar la preparación ante desastres para respuestas efectivas y para reconstruir mejor



	Cobertura en hectáreas de las Zaap, Zep y Zip								
	Zaap1	Zaap2	Zaap3	Zaap4	Zaap5	Zaap6	Zaap7	Zaap 8	Total
Zep (*n*)	1,1	3,1	0,5	0,9	0,1	0,05	0,06	0,03	5,84
Zip (*n*)	19,5	10,6	2,5	1,0	0,3	0,15	0,04	0,02	34,11
Total	20,6	13,7	3,0	1,9	0,4	0,2	1,0	0,05	39,95

► **Figura 1.** Ubicación del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020b).

después de la recuperación. Esta metodología ha sido aplicada en distintos países en desarrollo, como Colombia, Honduras, Malawi, Haití, Sierra Leona, México y Nigeria (GOAL, 2015; McCaul & Mitsidou, 2016).

Cabe señalar que la metodología GOAL aplica, principalmente, la técnica de grupos focales para la recolección de datos. Sin embargo, debido a la limitación en cuanto a la participación conjunta de las personas (falta de coincidencia en un mismo horario y lugar), se optó por aplicar el cuestionario a través de una entrevista a profundidad de manera individual a los distintos actores clave de la comunidad. En total se aplicaron 20 entrevistas, de las cuales tres se realizaron a jefes de manzana, diez a habitantes de la colonia que continuamente son afectados por las inundaciones pluviales y siete a distintos actores clave de instituciones gubernamentales involucrados con la Gestión del Riesgo de Desastres (Protección Civil del H. Ayuntamiento de Othón P. Blanco, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, Secretaría de Obras Públicas, Colegio de Bachilleres del Estado de Quintana Roo, Secretaría de Servicios Públicos, Instituto Geográfico y Catastral del Estado de Quintana Roo y Servicios Estatales de Salud). El punto de saturación con los actores de la sociedad se halló a las ocho personas y para el caso de los actores institucionales fue a las cinco personas.

La evaluación de la resiliencia ante el riesgo por inundaciones pluviales se realizó de manera independiente para cada uno de los 30 componentes, considerando una escala ordinal (Tabla 1), y el nivel o grado de resiliencia de cada uno de estos se representó de manera general a través de un diagrama radial, con el propósito de identificar tanto los puntos prioritarios como las áreas temáticas por atender.

Tabla 1. Nivel de resiliencia ante desastres por inundaciones pluviales.

Porcentaje	Nivel	Categoría	Descripción
0-20	1	Mínima resiliencia	Poca conciencia del problema o poca motivación para abordarlo. Acciones limitadas a respuestas durante crisis.
21-40	2	Baja resiliencia	Conciencia del problema y anuencia de abordarlo. Capacidad para actuar (conocimiento, habilidades, recursos humanos, materiales y otros) permanece limitada. Intervenciones tienden a ser únicas, fragmentadas y a corto plazo.
41-60	3	Mediana resiliencia	Desarrollo e implementación de soluciones. Capacidad de actuar está mejorada y es substancial. Las intervenciones son más numerosas y de largo plazo.
61-80	4	Resiliencia	Coherencia e integración. Las integraciones son amplias, cubriendo los mayores aspectos del problema y están ligadas a una estrategia coherente de largo plazo.
81-100	5	Alta resiliencia	Existe una cultura de seguridad entre los accionistas, donde la RRD está incluida en toda política importante, planeación, prácticas, actitudes y comportamientos.

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas.

Resultados

A) Comprender el riesgo de desastres

Se cuenta con documentos para la toma de decisiones que permiten la identificación de peligros, vulnerabilidades y riesgos ante fenómenos naturales, como el *Atlas de riesgo de la Ciudad de Chetumal* (UQROO & CIG, 2011), el "Programa para el manejo de agua pluvial de la ciudad de Chetumal" (CAPA & IMTA, 2013), y el "Estudio geohidrológico del acuífero de Chetumal" (CAPA & IMTA, 2016); sin embargo, es notoria la falta de actualización de datos, dado el crecimiento de la mancha urbana. Estos documentos no tienen evidencia de participación ciudadana y la población desconoce la información contenida en los mismos.

Por otra parte, la comunidad se basa en sus conocimientos y percepciones locales adquiridos a través de las experiencias viviendas durante los eventos de inundación ocurridos. No obstante, estos son insuficientes para asegurar la reducción del riesgo y recuperación ante desastres por inundaciones pluviales. Tanto la comunidad como algunos tomadores de decisiones relacionados con la gestión del riesgo de desastres tienen acceso limitado a conocimientos y análisis científicos acerca del riesgo, se tiene escasa comunicación entre la academia y la población en general, al menos en el tema de inundaciones.

Conviene resaltar que algunos miembros de la comunidad fueron funcionarios públicos y lograron participar en eventos de sensibilización acerca de RRD y recuperación, lo que transmiten ahora a sus familias y vecinos. Incluso son líderes comunitarios que se organizan y comunican a través de la red social Whatsapp, con el propósito de realizar las primeras actividades de prevención y preparación, como limpiar la infraestructura pluvial, movilizar sus vehículos a sitios de menor o nula exposición ante las inundaciones, apoyar a vecinos a trasladarse a otras viviendas o colonias para salvaguardar su integridad física.

Respecto a los centros educativos (de nivel básico y medio superior) ubicados en la comunidad, se identificó que estos sólo cuentan con información (carteles o posters) relacionada con la ocurrencia de huracanes y no con la incidencia de las inundaciones pluviales.

B) Fortalecer la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres

Se observó que tanto la comunidad como las instituciones involucradas en la gestión del riesgo de desastres tienen una conciencia limitada o inexistente de los vínculos entre la RRD y la planificación del desarrollo local. Las autoridades lograron publicar

los documentos de planificación territorial, como el "Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay Pix y Xul Há. Municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo" (SEDATU, 2018) y el "Programa de Ordenamiento Ecológico Local del municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo" (SEMA, 2015). Ambos instrumentos están desarticulados con el "Atlas de riesgo de la ciudad de Chetumal", por tanto, su consideración es limitada para los riesgos ante desastres por inundaciones pluviales.

En el periodo de enero a mayo las autoridades realizan acciones escasamente favorables para la prevención de inundaciones pluviales, que son la limpieza y mantenimiento de la infraestructura pluvial (pozos de absorción, canales de agua pluvial y colectores pluviales) y drenaje sanitario. La construcción de pozos de absorción, en distintas zonas de la comunidad, resulta desalentador para la población por ser acciones puntuales que no coadyuvan al control y mitigación de este tipo de amenaza. Escasamente se ha visualizado la inversión en un sistema de drenaje pluvial efectivo que contribuya a la reducción del riesgo de desastres por inundaciones pluviales. Es de resaltar que, en algunas áreas de anegación de la colonia Proterritorio, se han realizado algunas obras para disminuir el riesgo de inundación, sin embargo, no han sido suficientes ni eficientes.

A nivel de comunidad se observó la presencia de un sólo comité vecinal (Arboledas 2), cuyo líder muestra compromiso limitado debido a la poca participación y confianza de algunos miembros de la colonia. A pesar de ello, se realizan acciones esporádicas, fragmentadas y de corto plazo, son mínimas las ocasiones que se rinden cuentas. La identificación de grupos vulnerables (personas mayores, discapacitados, mujeres cabezas de familia, niños) en los documentos oficiales es nula y su participación es mínima en relación con la toma de decisiones y gestión en la RRD y recuperación de la comunidad. Al igual que la inclusión de sus necesidades y prioridades ante el riesgo de inundaciones pluviales. A esto se suma la falta de información espacial que contribuya a la identificación de estos grupos. No existe una representatividad femenina sólida, es un grupo con mínima participación. Sus necesidades y prioridades pocas veces son consideradas. Los líderes inciden por su cumplimiento regularmente a través de la interacción con actores gubernamentales y estos esfuerzos a veces son exitosos. Lo anterior se debe a que algunos miembros de la comunidad han sido o continúan laborando como funcionarios públicos en distintas instituciones y, por ende, conocen la forma en que pueden incidir para resolver un problema.

Las alianzas entre la comunidad y otros actores que provean recursos para la RRD y recuperación son limitadas. Los miembros de la comunidad están conscientes que los apoyos por parte del gobierno son insuficientes, intermitentes y a corto plazo, por tanto, se traducen en acciones que no solucionan el problema. Aún cuando faltan apoyos para la RRD y la recuperación, se observaron iniciativas particulares de algunos miembros de la comunidad que coadyuvan a controlar y mitigar el riesgo por inundaciones pluviales, por ejemplo, modificaciones a la infraestructura de sus viviendas.

C) Reducción de riesgo ante desastres para la resiliencia

La consideración es mínima en relación con las prácticas de gestión ambiental sostenible en la comunidad. Cabe resaltar que la cobertura vegetal natural, principalmente la selva mediana subperennifolia, ha disminuido a causa de la construcción de nuevos asentamientos humanos (sobre todo conjuntos habitacionales urbanos y centros comerciales), algunos de ellos ubicados en áreas susceptibles a inundarse. Estos cambios o transformaciones en el paisaje han contribuido a la intensificación de las inundaciones, modificando con ello el volumen y dirección de escorrentía que favorece el aumento del tirante de agua acumulado en las zonas de anegación existentes y, en ciertos casos, provoca nuevas áreas de inundación. Por tanto, el ambiente está altamente degradado y/o afectado por la comunidad, así como los efectos del cambio climático,

que se evidencian a través del incremento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de precipitación asociados a fenómenos meteorológicos sinópticos y de mesoescala que desencadenan inundaciones severas.

Basados en Martínez-Méndez *et al.* (2018a) y los documentos oficiales ya mencionados, la comunidad se abastece de agua potable por medio de pozos profundos de agua subterránea, distribuidos espacialmente en tres zonas de captación ubicadas en el entorno adyacente a la ciudad (en las localidades de Xul-Há y Jesús González Ortega). El acceso al agua potable generalmente es adecuado y este servicio pocas veces se ve interrumpido por la ocurrencia de las inundaciones pluviales.

Por otra parte, la mayoría de las viviendas en la comunidad se ubican en zonas altamente vulnerables a desastres por inundación, pocas de ellas están adecuadamente protegidas ante amenazas (sea por el acceso a seguros de vivienda, calidad de construcción resistente a amenazas y servicios de reparación, medidas de mitigación estructural y/o ubicación en áreas de bajo riesgo). Algunas miembros de la comunidad han modificado sus viviendas, por ejemplo, han construido muros que impiden el ingreso del agua e incrementaron la altura del piso considerando el nivel de la acera, o bien, por encima de éste. El factor económico es lo que aumenta la segregación socioterritorial por el desastre, combinado con la mayor frecuencia y magnitud de las lluvias intensas; en algunas zonas es notoria la presencia de viviendas abandonadas o en renta por esta situación. Además, la llegada de nuevos vecinos disminuye la oportunidad de cohesión social para lograr mecanismos sociales y elaborar un plan local de contingencia y recuperación.

La cohesión social y solidaridad dentro de la comunidad permiten acuerdos de protección social formales, como el apoyo institucional Fondo para Desastres Nacionales (FONDEN). Estos apoyos se brindan dependiendo de la política pública estatal y de la voluntad de acuerdos a nivel municipal, por ello, se convierten en inconsistentes, fragmentados y de corto plazo. También, la comunidad se organiza de manera informal para actividades como la limpieza de residuos sólidos en las vías de comunicación, limpieza de alcantarillas y evacuación de personas en caso de emergencia por inundaciones pluviales. Es de considerar la falta de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos. También, existen problemas que deben atenderse de forma paralela durante una emergencia o desastre por inundación, como el robo de bienes a las propiedades particulares, esto obliga a que algunos miembros de la comunidad no abandonen sus viviendas cuando el flujo de agua pluvial ingresar a éstas y, por ende, su integridad física se pone en riesgo.

El acceso al servicio de salud es una necesidad relevante al presentarse fenómenos perturbadores que generan inundaciones severas, ya que se ha mencionado que post-desastre por lluvia, al mezclarse aguas negras con el agua de lluvia, las personas sufren de infecciones en la piel, uñas y afectaciones gastrointestinales, además de epidemias por vectores (dengue, zika, chingunguya).

Es de considerar que, debido a las características socioeconómicas de la colonia Proterritorio, pocos hogares tienen o pueden acceder a un suministro de alimentos seguro y suficiente ante desastres por inundaciones pluviales, esto debido al bajo poder adquisitivo que caracteriza a los miembros de la comunidad.

Por otra parte, existen comercios y servicios en la comunidad que son la fuente principal de ingreso de algunas familias, como las pequeñas y medianas empresas (PYMES), mismas que se han visto afectadas por las inundaciones. También se ubican empresas transnacionales comerciales y de abarrotes que ofertan sus productos a nivel local y de los que depende la comunidad, éstas son suficientemente capaces de absorber los impactos (directos e indirectos) que ocasionan las inundaciones pluviales y recuperarse rápidamente de ellos. En general, los miembros de la comunidad adquieren sus productos de consumo y para la vivienda en tiendas

de autoservicio y mercados locales. Estos establecimientos tienen formas de abastecimiento protegidas ante huracanes e inundaciones, por tanto, es posible lograr su recuperación.

Hasta ahora la economía local impide la contratación de seguros de vida y seguros contra fenómenos perturbadores a fin de contar con un apoyo extra para la recuperación. A veces son las mismas empresas las que se niegan a permitir ese tipo de seguros. Las instituciones bancarias no representan apoyos certeros para la comunidad, se cuenta con acceso a créditos y pocas veces han sido utilizados para recuperarse de los daños o pérdidas ocasionados por los eventos de inundación pluvial. Se tiene conocimiento que, al adquirir una vivienda por crédito institucional, se tiene el derecho a un seguro de casa-habitación por fenómenos naturales, sin embargo, hubo quienes lo intentaron cobrar y, entre las inconsistencias institucionales y la falta de apoyo de los funcionarios públicos, fue imposible cobrarlo.

Existen infraestructura crítica y servicios básicos en la comunidad que están ubicados en zonas de peligrosidad alta ante eventos de inundación pluvial, como dos escuelas de nivel básico y una de nivel medio superior, un centro de salud, un centro deportivo, algunas avenidas principales y un cárcamo de tratamiento de aguas residuales. Cabe resaltar que, en algunas zonas de inundación de la comunidad, se han realizado obras (estructurales) de control y mitigación, aunque no han sido del todo eficientes y suficientes.

D) Mejorar la preparación ante desastres para respuestas efectivas y para reconstruir mejor después de la recuperación

La comunidad tiene herramientas efectivas y confiables (boletines informativos disponibles en la página de Protección Civil municipal y estatal, teléfonos móviles y transmisión de radio) para dar seguimiento a las amenazas (especialmente por huracanes), diseminación de alertas y personal capacitado. Se tiene amplia confianza en los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) estatales para tomar medidas preventivas, como evacuaciones, respuestas de emergencia, así como limpieza del drenaje pluvial y alcantarillado, principalmente. Sin embargo, se desconoce la existencia de un documento referente al SAT para inundaciones pluviales.

Existe una organización comunitaria responsable de la preparación, respuesta y recuperación temprana pero su capacidad operativa es débil, sus miembros no han sido capacitados formalmente en preparación respuesta y recuperación temprana; sin embargo, la cohesión social apoya en la respuesta ante la amenaza. Algunos vecinos que son personas mayores han expresado que para ellos es mejor recibir el apoyo de sus vecinos, pues son personas conocidas. Además, son mínimas las evidencias relacionadas con la organización colectiva antes, durante y después de un evento de inundación.

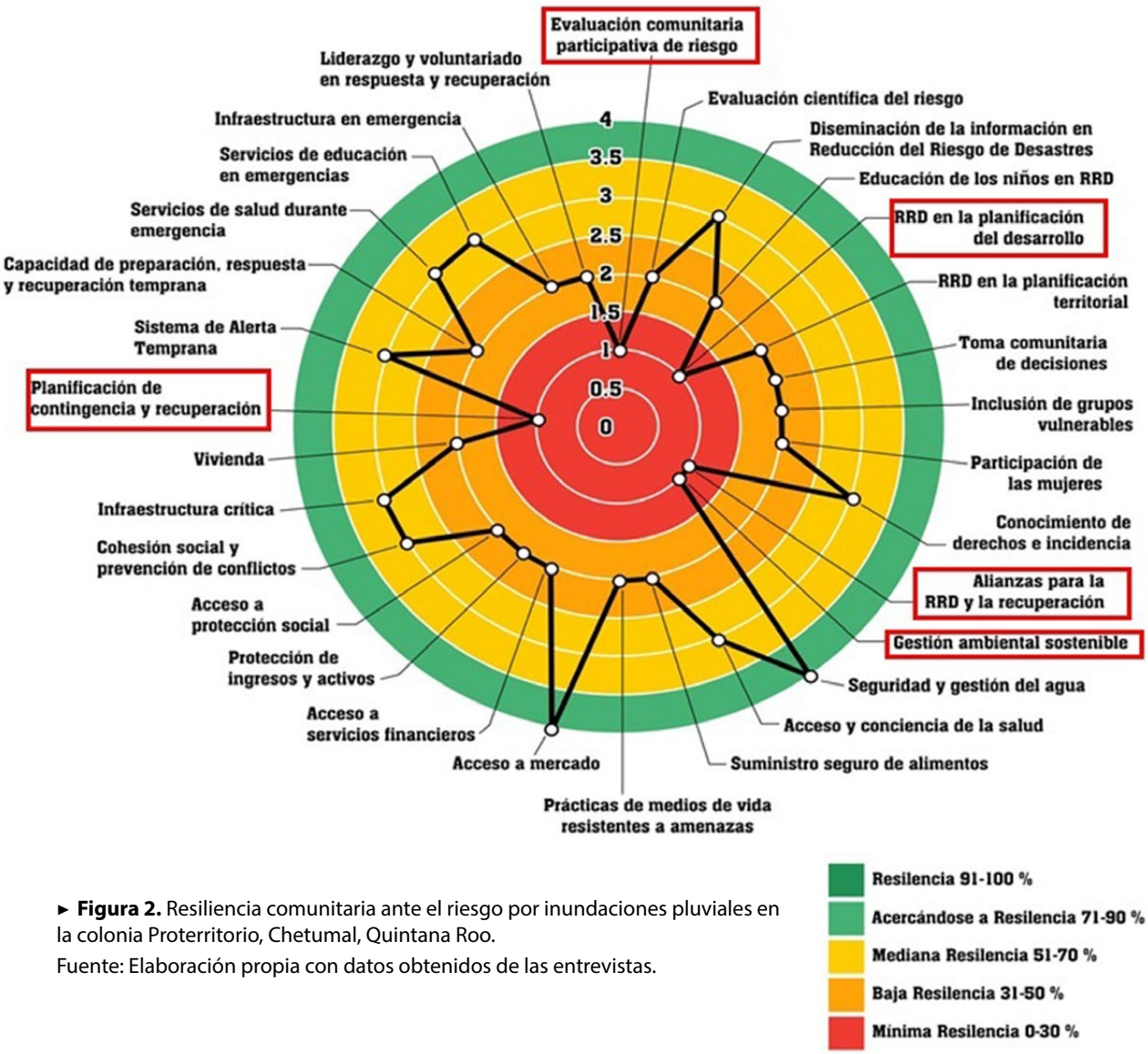
Se cuenta con un centro de salud accesible dotado con personal de salud, medicinas y equipos básicos, sin embargo, es insuficiente para todos los problemas de salud durante emergencias y son parcialmente coherentes con la estrategia nacional relevante para emergencias. Ante situaciones normales o cotidianas, los centros de salud tienen suministros adecuados; sin embargo, ante escenarios de emergencia, se han visto excedidos. Además, en caso de necesitar servicios en campamentos o albergues por evacuación, los servicios son extremadamente limitados.

Es inexistente un plan de seguridad o continuidad escolar ante la ocurrencia de este tipo de amenaza. Sólo cuentan con un plan de emergencia ante huracanes. El Colegio de Bachilleres plantel 2 es el centro educativo que frecuentemente se inunda y, ante esta situación, evacuan a los estudiantes y docentes. Se ha visto rebasado en momentos de lluvias intensas continuas, generando problemas a los jóvenes por falta de una evacuación pertinente, a los profesores por la pérdida o afectación a sus vehículos y los daños a la infraestructura y equipamiento de este plantel educativo.

Algunas escuelas de la comunidad fungen como refugios temporales o albergues, disponen de condiciones adecuadas para atender las necesidades básicas de la mayor parte de la población afectada, incluyendo a los grupos vulnerables.

La comunidad juega un papel poco activo en la preparación, respuesta y recuperación; pero pocas o algunas de las personas afectadas y de grupos vulnerables son atendidas. Los cuerpos voluntarios de la comunidad son mínimos y de pocos miembros, además se caracterizan por ser desorganizados y carecen de capacitación.

La siguiente figura muestra el nivel o grado de resiliencia comunitaria ante el riesgo por inundaciones pluviales de la colonia Proterritorio.



► **Figura 2.** Resiliencia comunitaria ante el riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de las entrevistas.

Discusión

Respecto a los resultados de este estudio, destaca la evaluación comunitaria participativa de riesgo como uno de los principales componentes (con mínima resiliencia) por atender del área temática ***A) Comprensión del riesgo de desastres***, debido a la

nula participación de los miembros de la comunidad en la evaluación del riesgo por inundaciones pluviales. Al respecto, Paul *et al*. (2019) mencionan que las partes interesadas locales no científicas siempre han desempeñado un papel importante en la gestión del riesgo del conocimiento y la creación de la resiliencia como respuesta a las inundaciones. Por el contrario, la diseminación de la información en reducción del riesgo de desastres es uno de los componentes con mediana resiliencia de esta área temática, que se evidencia a través de la organización y comunicación de los habitantes de la colonia para implementar medidas de prevención y mitigación ante las inundaciones pluviales, como la limpieza de la infraestructura pluvial y la movilización de los vehículos a sitios de mayor altura. Así lo confirman estudios previos (Talledos & Velázquez, 2022).

La reducción del riesgo de desastres en la planificación del desarrollo, como uno de los componentes prioritarios por atender del área temática ***B) Fortalecimiento de la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres***, registró un nivel mínimo de resiliencia debido a que las obras de infraestructura pluvial, que se han implementado en las zonas de inundación de la colonia Proterritorio, han resultado insuficientes y deficientes. Estos resultados coinciden con los hallazgos reportados por Padilla-Agamez & Gónima (2015), quienes documentan que la falta de un sistema de alcantarillado de aguas de lluvia y la insuficiente red de drenajes inciden en la ocurrencia de eventos inundación.

En relación al área temática ***C) Reducción de riesgo ante desastres para la resiliencia***, específicamente al componente gestión ambiental sostenible, los resultados confirman que son nulas o mínimas las estrategias y/o acciones que se han propuesto e implementado a favor de la protección y conservación de las áreas verdes naturales que se encuentran inmersas en la colonia y en espacios adyacentes a ésta. Su cubertura ha disminuido a causa del crecimiento urbano y por la escasa planificación urbana que, en conjunto, han favorecido la capacidad de infiltración y aumentado la velocidad de escorrentía. Al respecto, Elboshy *et al*. (2019) afirman que la expansión de las áreas urbanas y la falta de áreas de vegetación aumentan la acumulación de agua pluvial. Por su parte, Feng *et al*. (2021) documentan que la urbanización crea mayores tasas de escurrimiento superficial. Otro componente a considerar de esta área temática son las modificaciones realizadas a las viviendas de los habitantes que residen en zonas de inundación, esto con el fin de impedir el ingreso del flujo o escorrentía del agua pluvial, así lo establecen algunos estudios (Talledos & Velázquez, 2022).

Con respecto al área temática ***D) Mejorar la preparación ante desastres para respuestas efectivas y para reconstruir mejor después de la recuperación***, destaca la planificación de contingencia y recuperación como el componente que registró la mínima resiliencia, debido a que la comunidad desconoce la existencia de este tipo de instrumentos de planificación para responder a eventos de inundación severos ocasionados por precipitaciones intensas. Es de considerar que estos planes contribuyen de forma clara y rápida a mantener informada a la población, evitando así reacciones sociales adversas (Piatyszek & Karagiannis, 2012).

En los resultados que muestra la metodología GOAL, aplicada a otros países de América Latina, el Caribe y África, es indiscutible la dinámica de la ciudad y cómo surge la desarticulación con los instrumentos para la RRD (GOAL, 2015). Además, la construcción de la resiliencia comunitaria es ambigua por las deficiencias y limitaciones estructurales en la legislación municipal, el trabajo de las instituciones, que convendría fuera más colaborativo y estructurado, y la falta de capacitación a la población como apoyo en la preparación, respuesta y recuperación temprana. Esto significa cimentar complejas relaciones para asumir responsabilidad ante el riesgo por inundación. También, GOAL muestra en sus resultados que, en países como Colombia, Honduras y Malawi, la participación de la mujer y la existencia de

voluntariados comunitarios son indicadores que favorecen su resiliencia, mientras que, en Etiopía, Haití y Sierra Leona, se participa en menor medida, al igual que en este estudio.

Al aplicar la metodología GOAL se identificaron diversos factores de análisis y el diagnóstico de la resiliencia, por ejemplo, se manifiesta que existe desconfianza de la población hacia las instancias de gobierno que atienden en casos de inundación. En otros países, GOAL mostró estadísticas similares, además, algunos autores enfatizan en la necesidad de implementar urgentemente planes y normativas para gestionar la tenencia de la tierra (Sarmiento *et al*., 2020). El Marco de Sendai (UNISDR, 2017) relaciona sus resultados con acciones de los Objetivos del Milenio para comprender el riesgo a que se está expuesto y fortalecer la gobernanza. Esto último merece mayor atención en tiempos presentes.

Asimismo, los datos registrados en la página de GOAL muestran cifras mínimas acerca de la infraestructura para la emergencia en países como Colombia, Honduras, Malawi y Haití, como se observa en este caso mexicano, que evidencia la insuficiente atención a escuelas, hospitales, albergues y a la seguridad ciudadana. Estos temas muestran la falta de gobernanza y el desconocimiento de la gestión del riesgo de desastre por parte de las autoridades.

Es necesario generar información acerca de diversas áreas de riesgos, sobre cómo se construye el riesgo socialmente y transmitirlo a la población en general por diversos medios de comunicación. Esta acción no es exclusiva de las agencias institucionales, pueden participar otros agentes, como organizaciones no gubernamentales, empresarios locales, la academia y los investigadores independientes. Con base en los registros de GOAL, Honduras, Haití y Malawi son los países donde se ha tenido menor participación de investigadores acerca de la generación de información. Mientras que los instrumentos de planificación territorial relacionados con la RRD en Colombia, Honduras y Haití son escasos, desarticulados o no actualizados.

La calidad de la información generada y la forma en que se transmita, principalmente a la comunidad en general, fortalecerá la construcción de resiliencia a nivel de cada comunidad, frente a las contingencias ambientales, podrá fomentar una consciencia social para evitar la continuidad en la construcción del riesgo, generar grupos de apoyo voluntario en cada barrio; además, esto apoyará a las autoridades a establecer una capacidad eficiente y eficaz de gestión del riesgo ante inundaciones pluviales.

También se debe considerar la generación de mapas de grupos vulnerables en cada ciudad y definir su tipo de vulnerabilidad. Hay que recordar que existen grupos vulnerables por situación económica, patrimonial, edad, género, entre otros, y algunos aumentan su vulnerabilidad ante el riesgo por inundaciones pluviales. Así como dejar que ellos participen en la elaboración de diversos documentos que incidan en su vida cotidiana. La atención a grupos vulnerables es una variable que requiere de mayor trabajo para lograr que sean parte de la generación del conocimiento, así como de inclusión en los documentos y acciones generadas, según la metodología de GOAL y los resultados de este trabajo.

Aún cuando metodológicamente no fue posible aplicar la técnica de grupos focales para la recopilación de información, las entrevistas a profundidad coadyuvaron a la amplitud y transparencia de los datos obtenidos en este estudio, lo que a veces es complicado observar a través de los grupos focales. Se debe considerar que el análisis e interpretación de los resultados obtenidos se limitan a un diseño metodológico transversal, que sugiere el desarrollo de estudios futuros longitudinales (con datos primarios) para comparar la evolución de la resiliencia comunitaria ante el riesgo por inundaciones pluviales, que puede ser afectada por los efectos del cambio climático.

Conclusiones [o Reflexiones finales]

La comprensión del riesgo de desastres en la comunidad debe ser una prioridad a corto plazo para fortalecer la resiliencia mediante información actualizada y confiable sobre las amenazas. Esto requiere documentos que respalden la toma de decisiones y eviten vacíos de información, así como una mayor participación ciudadana en la elaboración de planes, programas y atlas de riesgo. Utilizar las redes sociales con una estrategia planificada para comunicar las alertas tempranas, así como la información actualizada y todo aquello que pueda construirse como base de datos desde la sociedad. Se requiere de una mayor participación de las mujeres en los problemas de la comunidad, de informarlas y capacitarlas como líderes locales, ya que son entes sociales que manejan más información de la vida cotidiana y ante situaciones estresantes. Culturalmente, a nivel local se requiere de trabajo con la comunidad, ya que las personas tienden a ser poco participativas y renuentes a ejercer sus derechos ante las autoridades, lo que ha significado baja participación y acción ante situaciones posdesastre.

Es importante fortalecer la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres a través de aumentar la conciencia social e institucional de la construcción del riesgo por la expansión urbana, por las acciones que se omiten por falta de presupuesto y por la inadvertencia de relacionar la planificación con la gestión del riesgo. Incentivar las acciones institucionales dirigidas a la prevención y atención, en lugar de sólo a la reacción, como se hace actualmente. Se requiere que los gobiernos, en sus tres niveles, comprendan la prioridad de la gestión del riesgo que los acuerdos firmados imponen a fin de lograr también el desarrollo económico. Este trabajo requiere apoyo de la academia, parece insuficiente la forma en que se comunica a las instancias de gobierno la información y las consecuencias ambientales, sociales y económicas por el cambio climático. Limpiar y mantener la infraestructura pluvial no es la única labor para gestionar el riesgo y para la RRD, se requiere de mayor voluntad de instancias gubernamentales y económicas a fin de otorgar e invertir montos económicos en recursos humanos y materiales que favorezcan la resiliencia. Es importante también que la capacitación sobre la gestión del riesgo se incremente a fin de reconocer las etapas del proceso, los grupos vulnerables, la información requerida para generar documentos en la toma de decisiones y que los montos económicos otorgados al tema realmente logren los objetivos para la RRD. Lograr que se entienda que la resiliencia es resultado también de alianzas entre entes sociales.

La reducción de riesgo ante desastres para la resiliencia es mínima y escasamente relacionada con prácticas de gestión ambiental sostenible, ya que se ha eliminado la selva y se construye a pesar de observar que se amplía la ciudad en zonas no aptas para el desarrollo urbano, esto ha modificado las escorrentías generando áreas de inundación que, en algunos casos, han durado hasta tres meses en bajar el volumen de agua. Es importante emprender acciones o estrategias que permitan mejorar las condiciones ambientales de la ciudad, como un sistema de tratamiento de residuos sólidos, y mejorar la infraestructura de agua potable, drenaje y alcantarillado pluvial. Visualizar en las leyes y planes de ordenamiento territorial acciones tendientes a la adaptación al cambio climático. En 2023 se comenzó a sentir en la ciudad un aumento en la temperatura de primavera y verano, lo que trajo consigo cifras elevadas de personas con enfermedades gastrointestinales y dengue, evidenciando la falta de servicios médicos para atender a la población afectada.

De los servicios más importantes, resalta el servicio de agua potable, que es necesario mejorar, así como incentivar inversiones elevadas pero necesarias a fin de permitir que la población cuente con el servicio de forma cotidiana y ante la presencia de un desastre. Además de priorizar inversiones para mejorar y ampliar la red de drenaje sanitario y pluvial, considerando la metropolización de la ciudad y los requerimientos futuros.

La vivienda es uno de los activos económicos que presentó mayor afectación ante las inundaciones, simbolizando un factor primordial de la vulnerabilidad social y de la segregación socioespacial posdesastre de inundación, junto con la economía familiar. Para algunas familias dejó de representar un patrimonio por ser escenario continuo de inundaciones. Hay presencia de viviendas abandonadas y en renta debido a la migración forzada de la población. Es preponderante generar esquemas de mejora y de obtención de seguros o mecanismos económicos que permitan la reconstrucción por parte de los pobladores, a fin de ser ellos quienes se responsabilicen de sus acciones cuando se construye o modifica la vivienda.

La construcción de cohesión social requiere de liderazgos sociales e institucionales que inciten a la reunión continua, trabajo en equipo y apoyos entre vecinos. Hasta ahora, hay pequeños trazos de estos lazos sociales, sin embargo, merece mayor atención, enfatizando el apoyo antes, durante y después de cada evento de inundación, en este rubro las instancias gubernamentales deberán ser promotoras y líderes locales, ya que estarán creando consciencia social y generando información al mismo tiempo.

Al elaborar los planes de desarrollo urbano y ordenamiento territorial, se podrá plasmar la construcción o adaptación de edificaciones que sean albergues temporales ante inundaciones o huracanes, que se construyan en sitios de fácil identificación y acceso para la población, contando con las necesidades para las personas de todas la edades y enfermedades, que seguramente harán uso de ellas. Niños y niñas, personas mayores, discapacitados, personas con problemas mentales, con necesidades especiales, como diabéticos, hipertensos, enfermedades cardiovasculares y problemas del riñón que, hasta ahora, y de acuerdo con los datos recabados después de la pandemia por COVID-19, son los padecimientos locales más recurrentes.

Mejorar la preparación ante desastres para respuestas efectivas y para reconstruir mejor después de la recuperación. La percepción de la comunidad, ante la forma de atender las alertas tempranas, es que se tiene un elevado nivel de confiabilidad y respuesta, aunque esto es sólo ante huracanes. En fechas recientes se ha documentado que las inundaciones más severas están siendo provocadas por otro tipo de fenómenos hidrometeorológicos, por lo que es necesario que las instancias de gobierno realicen una nueva estrategia de seguimiento de estos fenómenos, sobre todo, realizar las acciones de monitoreo y alerta temprana a fin de evitar o disminuir las afectaciones por inundación. La respuesta de la comunidad, aunque débil, logra construir resiliencia en sus fases iniciales, se reconocen entre ellos quienes requieren apoyo, quienes son vulnerables, quienes deberán ser llevados a servicios médicos, así que es imprescindible aumentar esta organización colectiva.

A pesar de que en algunos lugares se ha invertido fuertemente en infraestructura pluvial y drenaje sanitario, aún presentan fuertes consecuencias como las inundaciones, estas situaciones requerirán de planes específicos para lograr metas puntuales en la ciudad, para ello, es necesario lo mencionado anteriormente: fortalecer la generación de información actualizada y certera que incentive la atracción de inversión a fin de contribuir a la RRD.

» Referencias bibliográficas

Alcántara-Ayala, I. (2019). Desastres en México: mapas y apuntes sobre una historia inconclusa. *Investigaciones Geográficas*, 100. https://doi.org/10.14350/rig.60025

Allen, M., Gillespie-Marthaler, L., Abkowitz, M., & Camp, J. (2020). Evaluating flood resilience in rural communities: a case-based assessment of Dyer County, Tennessee. *Natural Hazards*, 101(1), 173–194. https://doi.org/10.1007/s11069-020-03868-2

Aznar-Crespo, P., Aledo, A., Melgarejo-Moreno, J., & Vallejos-Romero, A. (2021). Adapting Social Impact Assessment to Flood Risk Management. *Sustainability*, 13(6), 3410. https://doi.org/10.3390/su13063410

Camacho-Sanabria, J.M., Chávez-Alvarado, R., Álvarez-Trinidad, J.A., & Velázquez-Torres, D. (2020). *Index of Coastal Urban Resilience (ICURHF) When Coping with Hurricanes and Floods in the City of Chetumal, in the South East of Mexico*. In M.F. Mata-Rivera, R. Zagal-Flores, J. Arellano Verdejo, & H.E. Lazcano Hernandez (Eds.), GIS LATAM. GIS LATAM 2020. Communications in Computer and Information Science, Vol. 1276 (pp. [número de páginas]). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59872-3_10

Camacho-Sanabria, J. M., Chávez-Alvarado, R., & Velázquez-Torres, D. (2019). Propuesta Metodológica para medir la Resiliencia Urbana ante Huracanes e Inundaciones en el Caribe Mexicano. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 3(2), 28. https://doi.org/10.55467/reder.v3i2.30

CAPA, & IMTA. (2013). *Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo*.

CAPA, & IMTA. (2016). Estudio Geohidrológico en el Acuífero de Chetumal, Quintana Roo.

Chávez-Alvarado, R., & Camacho-Sanabria, J. M. (2018). Gestión del riesgo de desastres: Interés de la poblaciónen la construcción de una ciudad resiliente, el caso de Playa del Carmen. In E. Sousa-González, C. Leal-Iga, & E. Cadena-Vargas (Eds.), *Espacio Metropolitano Contemporáneo. Posiciones, Desafíos y Propuestas de Acción* (Primera Edición, pp. 105–122). Río Subterraneo, Universidad Autónoma de Nuevo Leó, Universidad Autónoma del Estado de México.

Chávez-Alvarado, R., Camacho-Sanabria, J. M., & Velázquez-Torres, D. (2019). El camino hacia un modelo metodológico para realizar un índice de resiliencia en ciudades costeras (IRCC) del Caribe mexicano ante huracanes e inundaciones. *Contexto*, 13(18). https://doi.org/10.29105/contexto13.18-2

Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 29, 65–77. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005

De Dios, J., & Arciniega, U. (2013). La perspectiva comunitaria de la resiliencia. *Psicología Política*, 47, 7–18.

Deng, J. L., Shen, S. L., & Xu, Y. S. (2016). Investigation into pluvial flooding hazards caused by heavy rain and protection measures in Shanghai, China. *Natural Hazards*, 83(2), 1301-1320. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2369-y

Dillenardt, L., Hudson, P., & Thieken, A. H. (2022). Urban pluvial flood adaptation: Results of a household survey across four German municipalities. *Journal of Flood Risk Management*, 15(3), 1-15. https://doi.org/10.1111/jfr3.12748

Elboshy, B., Kanae, S., Gamaleldin, M., Ayad, H., Osaragi, T., & Elbarki, W. (2019). A framework for pluvial flood risk assessment in Alexandria considering the coping capacity. *Environment Systems and Decisions*, 39(1), 77–94. https://doi.org/10.1007/s10669-018-9684-7

Feng, Y., Liu, W., Sun, F., & Wang, H. (2021). Changes of compound hot and dry extremes on different land surface conditions in China during 1957–2018. *International Journal of Climatology*, 41(S1), 1085-1099. https://doi.org/10.1002/joc.6755

FICR. (2017). *Hoja de ruta hacia la resiliencia comunitaria. implementación del Marco sobre Resiliencia Comunitaria*.

GOAL. (2015). *Herramienta para medir la resiliencia comunitaria ante desastres. Guía metodológica*.

INEGI. (2020a). *Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por AGEB y manzana urbana*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Microdatos

INEGI. (2020b). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Keating, A., Campbell, K., Szoenyi, M., McQuistan, C., Nash, D., & Burer, M. (2017). Development and testing of a community flood resilience measurement tool. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(1), 77–101. https://doi.org/10.5194/nhess-17-77-2017

Martínez-Méndez, A., Frausto-Martínez, O., Castillo-Villanueva, L., & Camacho-Sanabria, J. M. (2018). Índice de resiliencia de infraestructura de agua potable ante huracanes en ciudades costeras. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), 339–365. https://doi.org/10.15359/rgac.61-3.17

Martínez-Méndez, A., Travieso-Bello, A. C., & Frausto-Martínez, O. (2018). Resiliencia del sistema de drenaje pluvial ante inundaciones: caso de estudio Chetumal, Quintana Roo, México. Antrópica. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(8), 273–300. https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/189

Mayer, B. (2019). A Review of the Literature on Community Resilience and Disaster Recovery. *Current Environmental Health Reports*, 6(3), 167–173. https://doi.org/10.1007/s40572-019-00239-3

McCaul, B., Cáceres, G., & Mencia, S. (2019). *Resiliencia para Sistemas Sociales. Enfoque R4S. Manual de orientación al usuario*. (1era Preliminar). GOAL.

McCaul, B., & Mitsidou, A. (2016). *Análisis de la resiliencia de las comunidades ante desastres. Caja de herramientas ARC-D, Manual de guía al usuario*.

Mobini, S., Nilsson, E., Persson, A., Becker, P., & Larsson, R. (2021). Analysis of pluvial flood damage costs in residential buildings – A case study in Malmö. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 102407. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102407

ONU México. (2023). *Presentan iniciativas municipales para construir resiliencia al cambio climático en Yucatán y Quintana Roo*. Organización de Las Naciones Unidas En México. https://mexico.un.org/es/234196-presentan-iniciativas-municipales-para-construir-resiliencia-al-cambio-clim%C3%A1tico-en-yucat%C3%A1n

Padilla-Agamez, M., & Gónima, L. (2015). Desarrollo de una metodología para el estudio de las inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en zonas urbanas relativamente planas. Area de estudio: Montería (Colombia). *Estudios Geográficos*, 76(278), 265–284. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201509

Pagliacci, F., Defrancesco, E., Bettella, F., & D'Agostino, V. (2020). Mitigation of Urban Pluvial Flooding: What Drives Residents' Willingness to Implement Green or Grey Stormwater Infrastructures on Their Property?. *Water*, 12(11), 3069. https://doi.org/10.3390/w12113069

Palla, A., Colli, M., Candela, A., Aronica, G. T., & Lanza, L. G. (2018). Pluvial flooding in urban areas: the role of surface drainage efficiency. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2). https://doi.org/10.1111/jfr3.12246

Paul, H., Bamel, U., Ashta, A. and Stokes, P. (2019). Examining an integrative model of resilience, subjective well-being and commitment as predictors of organizational citizenship behaviours. *International Journal of Organizational Analysis*, 27(5), 1274-1297. https://doi.org/10.1108/IJOA-08-2018-1514

Pfefferbaum, R. L., Pfefferbaum, B., Van Horn, R. L., Klomp, R. W., Norris, F. H., & Reissman, D. B. (2013). The Communities Advancing Resilience Toolkit (CART). *Journal of Public Health Management and Practice*, 19(3), 250–258. https://doi.org/10.1097/PHH.0b013e318268aed8

Piatyszek, E. & Karagiannis, G. M. (2012). A model-based approach for a systematic risk analysis of local flood emergency operation plans: a first step toward a decision support system. *Natural Hazards*, 61(3), 1443-1462. https://doi.org/10.1007/s11069-011-0079-z

Rajapakse, P., & Premalal, K. H. M. S. (2021). Increase of Pluvial Flood in Borelesgamuwa Area with the Climate Change and Land Use Changes. *Multi-Hazard Early Warning and Disaster Risks* (pp. 235–245). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73003-1_15

Santos-Cerquera, C., & Caamaño, H. R. (2020). Modelando la inundación pluvial por escurrimiento superficial urbano y de la cuenca en la Ciudad de México. *Revista UD y La Geomatica*, 15, 33-39. https://doi.org/10.14483/23448407.15231

Sarmiento, J. P., Sandoval, V., & Jerath, M. (2020). The influence of land tenure and dwelling occupancy on disaster risk reduction. The case of eight informal settlements in six Latin American and Caribbean countries. *Progress in Disaster Science*, 5, 1-8 100054. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100054

SEDATU. (2018). *Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay-Pix y Xul-Há*.

SEMA (2015). *Programa de Ordenamiento Ecológico Local del municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo*. SEMARNAT y Municipio de Othón P. Blanco. https://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/I/f/2019/1ertrim/POEL_OPB_2015.pdf

Soetanto, R., Mullins, A., Achour, N., & Soetanto R. Soetanto, R. (2017). The perceptions of social responsibility for community resilience to flooding: the impact of past experience, age, gender and ethnicity. 86, 1105–1126. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2732-z

Talledos, E., & Velázquez, J. (2022). Prácticas locales ante inundaciones urbanas en la ciudad de San Luis Potosí. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(6), 352-407. https://doi.org/10.24850/j-tyca-13-06-08

UNISDR. (2017). *Herramienta de autoevaluación para la resiliencia frente a desastres a nivel local. Evaluación preliminar*.

UQROO, & CIG. (2011). *Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo* 2011. SEDESOL, Gobierno Federal.

Velázquez-Torres, D., Chávez-Alvarado, R., & Camacho-Sanabria. (2019). *Resiliencia en ciudades costeras del Caribe mexicano ante desastres por huracanes*. (M. L. Castillo-Villanueva, Ed.; Primera edición). Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.

Zambrano, L., Pacheco-Muñoz, R., & Fernández, T. (2018). Influence of solid waste and topography on urban floods: The case of Mexico City. *Ambio*, 47(7), 771–780. https://doi.org/10.1007/s13280-018-1023-1

Zimmermann, E., & Bracalenti, L. (2017). Validación de una metodología empírica para evaluar modificaciones del riesgo de inundación urbana ante escenarios hipotéticos de uso del suelo. *Cuadernos Del CURIHAM*, 23, 63–75. https://doi.org/10.35305/curiham.v23i0.31

Zurich, A. (2017). *Medir la resilencia comunitaria frente a inundaciones: la herramienta del Programa Zurich*.

4.3 Antropización de la cobertura vegetal y temperatura superficial en los paisajes al sur de Quintana Roo

Aranely Wendolyne Estrada Porcayo
Doctorante en Geografía de la Universidad Autónoma de Quintana Roo, México

Rosalía Chávez Alvarado
Cátedras SECIHTI, Universidad Autónoma de Quintana Roo, México

José Manuel Camacho Sanabria
Cátedras SECIHTI, Universidad Autónoma de Quintana Roo, México

Palabras Clave: actividades antrópicas, análisis espacial, banda térmica, vegetación, Landsat.
ODS 2030 de incidencia: 13 Acción por el clima.

Introducción

El cambio climático es un tema relevante a nivel mundial debido a que ha incidido en la variación significativa de las precipitaciones anuales, la temperatura y el nivel medio del mar; así como en la creciente intensidad y frecuencia de peligros hidrometeorológicos (inundaciones, tormentas, incendios, ciclones, olas de calor y sequías) y epidemias (Ali *et al*., 2014), afectando así la vida en el planeta.

En cuanto a la temperatura, las modificaciones documentadas explican que las actividades antrópicas han generado un aumento de casi 1.0 °C respecto a los niveles preindustriales. Durante el decenio de 2006-2015, la temperatura media global en superficie fue de 0.87°C más alta que el promedio del periodo 1850-1900. En la actualidad el calentamiento global antropógeno estimado incrementa 0.2°C por decenio (IPCC, 2019). En la reunión de Glasgow, COP26 (el Pacto de Glasgow para el Clima) del 2021, se hizo énfasis en la urgencia de disminuir toda actividad que continúe modificando el clima en el mundo, principalmente, las actividades humanas que han provocado un incremento de 1,1 °C en las temperaturas. La meta es no exceder el 1.5°C para finales de este siglo.

Por lo general, las actividades que realiza el hombre mediante los cambios de uso del suelo modifican y/o transforman (en mayor o menor grado) las coberturas vegetales que conforman a los paisajes de un determinado espacio geográfico, a esto se le conoce como antropización de la cobertura vegetal y ocasiona variaciones en la temperatura, dado que la conversión histórica del uso del suelo de las actividades antrópicas causó en el mundo una disminución en la temperatura de entre 1 y 2°C en latitudes medias; y un aumento de 1 a 2°C en áreas tropicales deforestadas (Rodríguez-Eraso *et al*., 2010). Por tanto, la cobertura vegetal, como es el caso de los bosques y selvas, juega un papel importante en el equilibrio climático global, aunado a que forman el nicho que sostiene a otras formas de vida y brinda servicios ambientales relacionados con la limpieza de la atmósfera, el suministro y regulación del ciclo del agua y la conservación del suelo (Layza *et al*., 2018).

Cuevas *et al*. (2010) mencionan que las actividades antrópicas que han tenido mayor impacto sobre la cobertura vegetal de los paisajes son: la ganadería, la agricultura, el crecimiento de los asentamientos humanos y la creación de ciudades. Éstas, a su vez, han coadyuvado a la variación de la temperatura pues, al sustituir la vegetación por usos de suelo impermeables, principalmente, se afecta el grado de absorción de la radiación solar, convirtiéndose así en una fuente de aumento de temperatura superficial terrestre. Se calcula que para el año 2050 la temperatura superficial aumentará de forma vertiginosa, por lo que el 69% de la población mundial estará expuesta a altas temperaturas (Pal & Ziaul, 2017; Singh *et al*., 2021).

Salinas-Castillo & Treviño-Garza (2001) mencionan que la remoción de la vegetación tiene un impacto sobre la proporción de calor latente y sensible de la radiación solar incidente en una determinada zona. Esta modificación del equilibrio energético propicia cambios en el microclima local y regional, pues la presencia de las áreas de bosques y selvas tiene un gran potencial para aliviar las condiciones climáticas que interactúan con las radiaciones del sol, propiciando así sombra para bajar las temperaturas. Teóricamente, la antropización de las coberturas forestales tendría un impacto inverso en los valores de temperatura (ya sea aire o temperatura superficial), de modo que, cuando se produzca la pérdida de la cobertura vegetal, más subirá la temperatura (Khorramí *et al*., 2019).

En el contexto del cambio climático, establecer la temperatura superficial (TS) significa contar con uno de los parámetros ambientales más importantes, ya que es factible conocer la variación espaciotemporal entre la superficie y la atmósfera, permitiendo entender los procesos adaptativos que deberá enfrentar el ser humano al vivir en un entorno con variabilidad climática (Khorramí *et al*., 2019; Mallick & Kant, 2008).

A nivel internacional se ha estudiado la relación de los cambios de cobertura y usos del suelo con la temperatura superficial, particularmente con la generación de islas de calor en las grandes ciudades, este tipo de investigaciones se han realizado en países como la India, Egipto, Nigeria, entre otros, y se han basado en el uso de la percepción remota para la obtención de los datos de temperatura superficial (Akinbobola, 2019; Choudhury *et al*., 2019; El-Zeiny & Effat, 2017; Mallick & Kant, 2008; Mushore *et al*., 2017; Nzoiwu *et al*., 2017; Paolini, 2012; Quijano Pérez *et al*., 2017).

En cuanto a México, esto ha sido diferente, ya que para estudios de este tipo se han utilizado los datos históricos obtenidos de las estaciones meteorológicas (Fuentes-Pérez, 2017; Jáuregui, 2012; Pérez *et al*., 2010; Salinas-Castillo & Treviño-Garza, 2001), sin embargo, esto presenta una deficiencia ya que los resultados obtenidos se representan principalmente mediante gráficas, dejando de lado la parte espacial, por lo que se carece de una asociación espaciotemporal de esta variable con los cambios en las coberturas y usos del suelo, así como de manera específica con la antropización de la cobertura vegetal.

A nivel regional y en el entorno próximo al área de estudio también se carece de investigaciones que analicen la relación entre antropización y temperatura. La mayoría de los estudios se ha enfocado en el análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo y sus causas (Cortina Villar *et al*., 1999; Ellis *et al*., 2017; García-Rubio *et al*., 2012). Por otra parte, se ha estudiado el crecimiento de las ciudades, como Chetumal o Mérida (Alonzo-Alonzo & González-Vera, 2010; Orozco *et al*., 2018), desde el punto de vista del desarrollo urbano y de la generación de islas de calor, pero se ha dejado de lado la parte ambiental, es decir, analizar el grado de alteración de las coberturas vegetales y su asociación con variables climáticas como la temperatura. La investigación más significativa en el área de estudio fue la de Padilla (2019), en donde analizó el comportamiento térmico de la ciudad de Chetumal e hizo un comparativo con el de Calderitas. El estudio se enfocó únicamente en las islas de calor, así como la comparación de éstas en un entorno urbano y en uno suburbano.

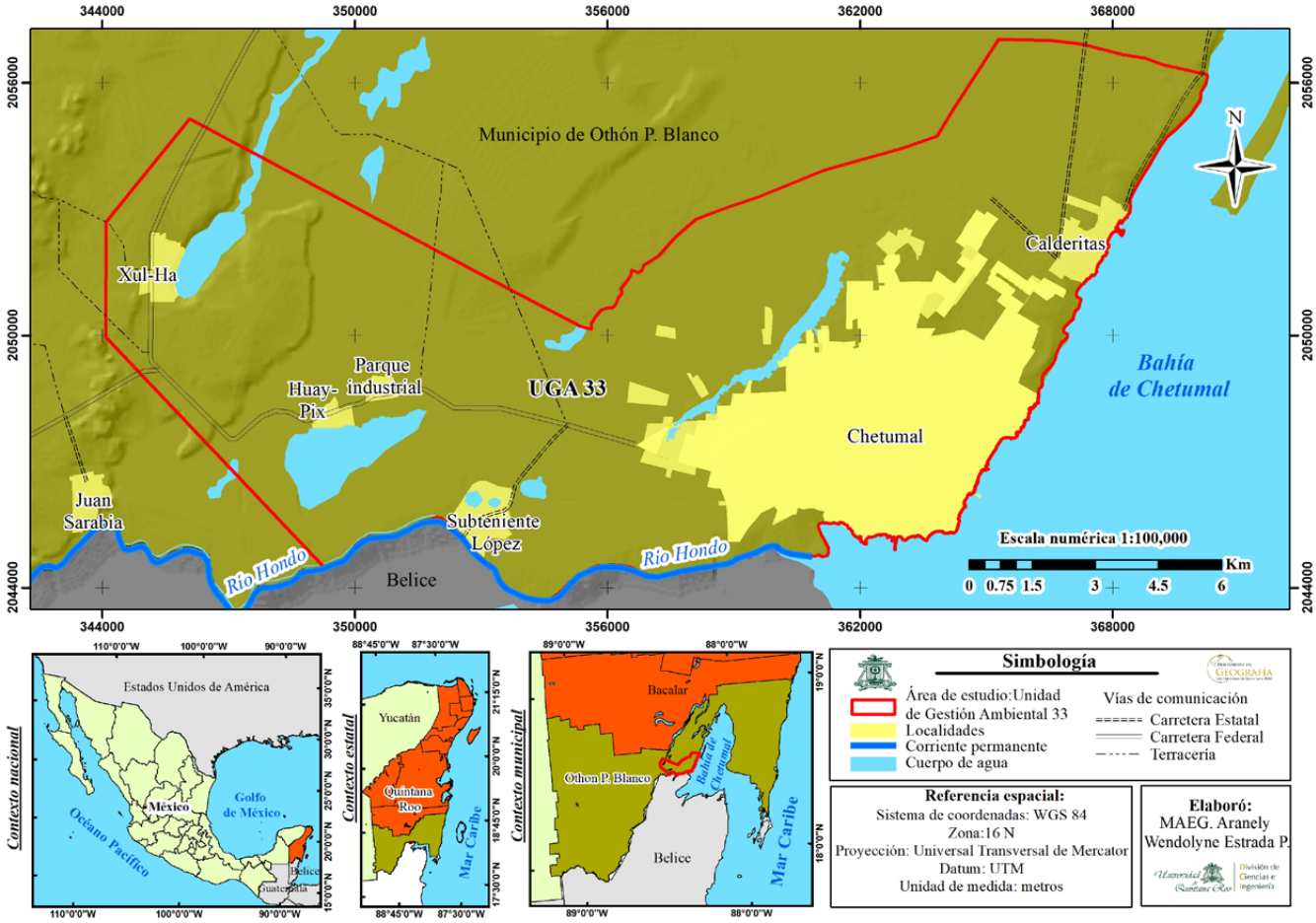
Con base en los estudios que se han realizado, se identificó que para el área de estudio hacen falta investigaciones en donde se analice la relación entre la antropización y la temperatura superficial, pues es un área que se localiza en el Caribe, una de las regiones tropicales más antropizadas, en donde la cobertura vegetal de los paisajes ha sido modificada y transformada a través del tiempo para dar paso a la urbanización y expansión agrícola, principalmente. El objetivo de este estudio es analizar espacialmente la relación entre la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes de la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) 33 y la temperatura superficial, considerando el año 1984 y 2020. Como insumos se utilizaron el mapa de paisajes físicogeográficos generado para el área de estudio y dos imágenes satelitales del sensor Landsat (correspondiente a cada año de análisis).

Un estudio de este tipo permitirá identificar el grado de antropización que ha experimentado la cobertura vegetal de los paisajes del sur de Quintana Roo, así como la relación que esto tiene con la temperatura superficial, dato que será un aporte para los tomadores de decisiones sobre el ordenamiento territorial, planificación urbana, los gestores e inversores de la ciudad y de su infraestructura, ya que permitirá lograr los objetivos que México firmó en las reuniones de Naciones Unidas sobre la reducción de emisiones y actividades que favorecen al cambio climático, entre ellos el objetivo 13, acción por el clima, dentro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030.

Metodología

Área de estudio

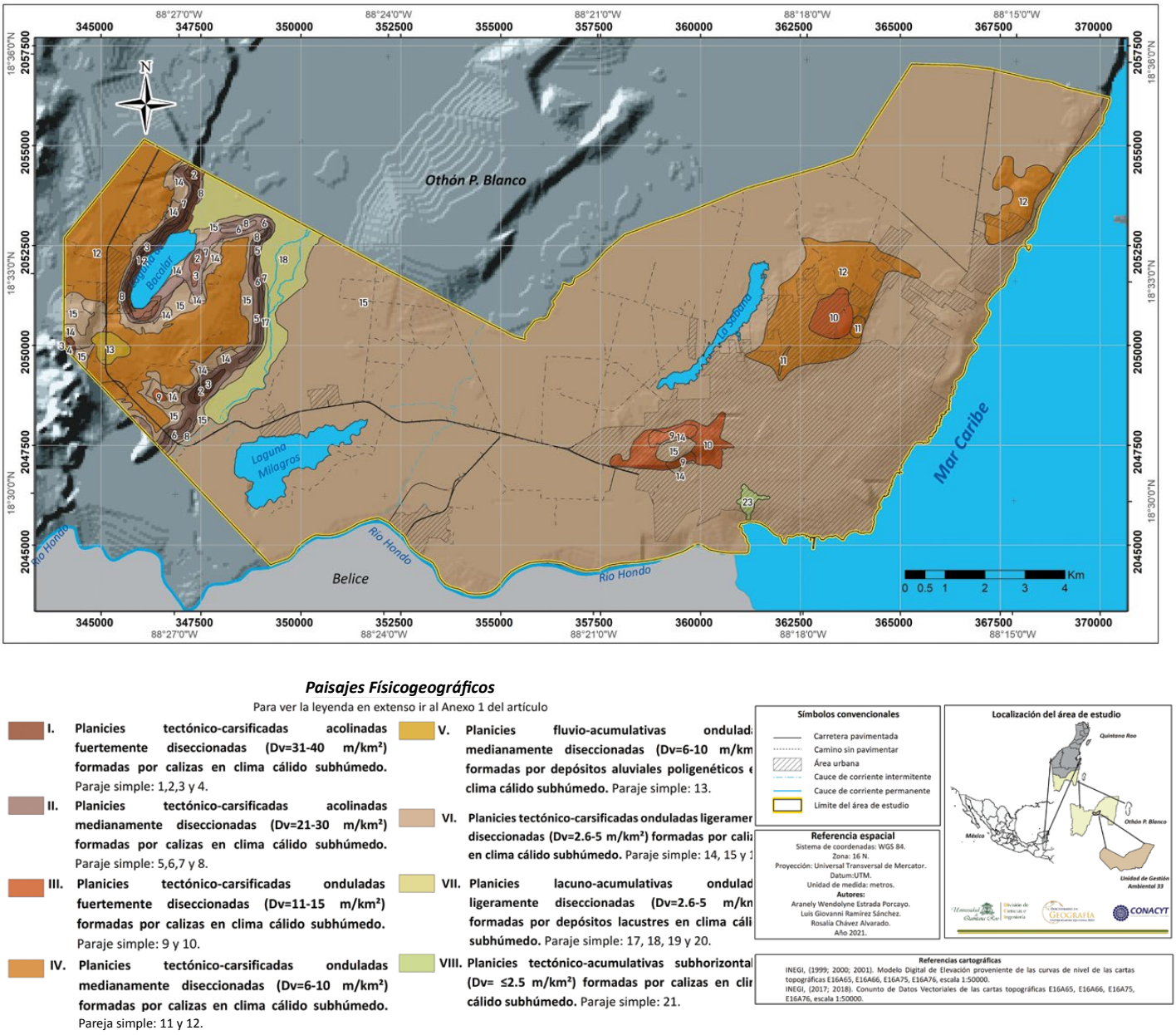
La UGA 33 es una unidad territorial del municipio de Othón P. Blanco, localizada al sur de Quintana Roo, entre las coordenadas 18°36´03.18´´ y 18°28´43.16´´ de latitud norte y 88°28´41.90´´ y 88°13'46.59´´ de longitud oeste (Figura 1). El área de estudio se encuentra bajo la política de aprovechamiento sustentable (SEMA, 2015), pues corresponde a la zona urbana actual y al Programa de Desarrollo Urbano de la ciudad de Chetumal, el cual incluye las principales localidades próximas a la capital estatal y cabecera municipal, como lo es Calderitas, Subteniente López, Huay-Pix y Xul-Há (SEDATU, 2018).



► **Figura 1.** Localización de la UGA 33 en el contexto nacional, estatal y municipal.
Fuente: Elaboración propia con datos de SEDATU (2018), INEGI (2016).

El área de estudio se caracteriza por presentar, en su mayoría, un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, presenta un grado de humedad entre 43.2 y 55.3, el porcentaje de lluvia invernal está entre 5 y 10.2, la temperatura media anual está por encima de los 22°C y la precipitación del mes más seco es inferior a los 60mm. Los suelos que predominan son el Gleysol, Leptosol y Luvisol. La vegetación existente corresponde a vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia, en ésta existen diversas especies, abundan las lianas, las epífitas y las palmas. La mayoría de los árboles tienen hojas grandes y duras (Challenger & Soberón, 2008). También es notoria la presencia de asentamientos humanos

Paisajes Físicogeográficos de la UGA 33, Quintana Roo, México



► **Figura 2.** Mapa de paisajes Físicogeográficos de la UGA 33.
Fuente: Elaboración propia.

que contribuyen al crecimiento urbano de alta intensidad, zonas industriales, áreas agrícolas y pecuarias, cuerpos de agua y vegetación hidrófila, como el manglar y el tular (SEMA, 2015). Desde el punto de vista de la Geoecología, la UGA se encuentra conformada por diferentes paisajes físicogeográficos caracterizados por la presencia de planicies de origen tectónico-carsificadas acolinadas y onduladas, que van de fuerte a ligeramente diseccionadas hasta llegar a planicies subhorizontales. La mayoría de la UGA (79.9%) está integrada por planicies tectónico-carsificadas onduladas ligeramente diseccionadas, seguido de las onduladas medianamente diseccionadas (11.7%); y con un menor porcentaje de representación se encuentran las planicies lacuno-acumulativas onduladas ligeramente diseccionadas (3.0%), las tectónico-carsificadas acolinadas que van de fuerte a medianamente diseccionadas (1.1% y 2.2%, respectivamente) y las onduladas fuertemente diseccionadas (1.7%) (Figura 2).

Materiales y métodos

El desarrollo de la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, su alcance es de tipo relacional y el diseño de la misma se caracteriza por ser un estudio analítico, longitudinal y retrospectivo. Como insumos o materiales se utilizaron el mapa de paisajes físicogeográficos de la UGA 33 (Estrada-Porcayo *et al*., 2023) y dos imágenes satelitales (path/row: 019/047) del sensor Landsat, las cuales fueron seleccionadas en función de su disponibilidad, la nula nubosidad, o, en su defecto, poca nubosidad en el área de estudio y la existencia de la banda térmica para el análisis de la temperatura superficial. Las imágenes referidas fueron clasificadas mediante un método híbrido (Francois *et al*., 2017) para obtener mapas de cobertura y usos del suelo (CUS) de la UGA, correspondientes a los años 1984 y 2020, y con ello se evaluó la antropización de las coberturas vegetales. Cabe resaltar que el mapa de paisajes fue la base cartográfica para el desarrollo de la presente investigación.

Evaluación del grado de antropización de la cobertura vegetal en los paisajes de la UGA 33

Para estimar el grado de antropización de la cobertura vegetal de los pasajes se aplicó la metodología propuesta por Martínez-Dueñas (2010) y modificada por Velázquez-Salazar *et al*. (2019), la cual se sustenta en el cálculo del Índice Integrado Relativo de Antropización (INRA) basado en el establecimiento de unidades de análisis (UA) y subunidades de análisis (SUA) en el área de estudio. Las primeras, corresponden a las áreas a las que se les asigna el valor del índice, mientras que las segundas son áreas más pequeñas que dividen a la UA y llevan el valor de antropización parcial relativo; ambas se generan a partir de la creación de una malla o grilla (en forma cuadrada para una mejor interpretación) con el SIG. El tamaño de las UA fue de 200x200m, ya que se consideró la Unidad Mínima Cartografiable (UMC) utilizada en el mapa de paisajes (40,000 m^2); esto con la finalidad de evitar la generalización de la información. Por su parte, el tamaño de las subunidades se determinó en función del teorema de muestreo (Triviño *et al*., 2007), el cual indica que cada lado de la SUA debe ser de al menos la mitad del objeto más pequeño a representar (en este caso el AMC), por tanto, las dimensiones de las SUA fueron de 100x100m (10000m^2). A través de la herramienta SIG (ArcMap 10.5), a cada SUA se le asignó la cobertura y/o uso del suelo que le correspondía y se le estableció un valor relativo entre 0 y 1 (Tabla 1).

El valor relativo de antropización para cada SUA se estimó con base en Velázquez-Salazar *et al*. (2019). Los valores del INRA varían de 0 a 100, donde 0 indica nula antropización y 100 indica antropización total. Los coeficientes obtenidos se categorizaron a partir del método de rompimiento natural de Jenks (ESRI ARCGIS, 2017) para establecer de manera cualitativa el grado de antropización (Tabla 2), el cual se sobrepuso con el mapa de paisajes para obtener su representación espacial.

Tabla 1. Valor relativo de antropización de acuerdo a las CUS.

Cobertura vegetal/uso del suelo	Valor de antropización
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	0.2
Vegetación secundaria herbácea/arbustiva de selva mediana subperennifolia	0.4
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia modificada	0.6
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia modificada con asentamientos humanos	0.7
Vegetación hidrófila	0.01
Cuerpo de agua	0.03
Lirio acuático	0.03
Agricultura/Pastizal	0.83
Suelo desprovisto de vegetación	0.01
Asentamientos humanos con vegetación arbórea de selva mediana subperennifolia	0.90
Asentamientos humanos	0.99

Fuente: Elaboración propia con datos de Priego (2004) y modificado de a cuerdo con las características del área de estudio.

Valor cuantitativo (rango)	Valor cualitativo	Forma de representación
1-7	Muy bajo	
7.1-16	Bajo	
16.1-34	Medio	
34.1-69	Alto	
69.1- 99	Muy alto	

Tabla 2. Definición de los diferentes grados de antropización.

Fuente: Elaboración propia.

Estimación de la temperatura superficial en los paisajes de la UGA 33

Para obtener el valor de la temperatura superficial se utilizaron las bandas térmicas de las imágenes satelitales, las cuales fueron corregidas radiométricamente y atmosféricamente. Se realizó la transformación de números digitales hasta llegar a la obtención de la temperatura superficial a partir del siguiente procedimiento:

1) Conversión de los número digitales (ND) a radiancia espectral: esto representa la energía irradiada por la superficie de la tierra y captada por cada banda en la parte superior de la atmósfera (Allen *et al.*, 2002), la ecuación a aplicar en este paso es la siguiente:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{Max} - L_{Min}}{(QCAL_{Max} - QCAL_{Min})} \right) \times (DN - QCAL_{Min}) + L_{Min}$$

En donde DN= número digital de cada píxel, L_{Max} y L_{Max} son constantes de la calibración, $QCAL_{Max}$ y QCA L_{Min} corresponden al rango más alto y más bajo de los valores de radiancia reescalados en números digitales.

2) Conversión de radiancia a reflectancia: La reflectancia es la relación entre la radiación entrante y la radiación saliente de la superficie (Allen *et al.*, 2002) y, se calcula con la siguiente ecuación:

$$P\rho = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta_s}$$

En donde $P\rho$= reflectancia (sin unidad), Lλ= radiancia espectral, d= distancia de la Tierra al sol en unidades astronómicas, ESUN= media de las irradiancias exoatmosféricas solares y θs= ángulo del cenit solar en grados.

3) Reflectancia a temperatura del satélite: para hacer esta conversión se aplica la fórmula mostrada a continuación:

$$T = \frac{K_2}{In\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

En donde T= temperatura efectiva del satélite (Kelvin), K1 y K2 son constantes para las imágenes Landsat (Marham & Barker, 1987).

4) Temperatura del satélite a temperatura de la superficie: la temperatura superficial se calcula a partir de la siguiente ecuación (Artis & Carnahan, 1982):

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\lambda \times \frac{BT}{P}\right) In(e)}$$

En donde BT= temperatura brillo del satélite, λ= longitud de onda de la radiancia emitida, P=hxc/s (1.438x10-2mk) P= 14380, h=constante de Plank (6.626x10-34 Js), s= constante de Boltzmann (1.38x10-23 J/K), c= velocidad de la luz (2.998x110-8 m/s).

Los valores obtenidos de temperatura superficial (TS) fueron agrupados en cinco rangos a partir del método de rompimiento natural de Jenks (ESRI ARCGIS, 2017). De cada uno se calculó el valor promedio de TS para su posterior representación espacial.

Finalmente, el análisis espacial de la relación entre antropización y temperatura se llevó a cabo a partir de la sobreposición cartográfica del mapa de paisajes, el de antropización y el de temperatura superficial promedio (TSP) en el SIG ArcMap 10.5, y el procesamiento y análisis de esta información a partir del uso de tablas dinámicas en Excel.

Resultados

Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes y temperatura superficial promedio: año 1984

La Figura 3 muestra cómo, a principios de la década de los años 80 (1984), la cobertura vegetal de los paisajes, particularmente de las planicies tectónico-carsificadas onduladas ligeramente diseccionadas que se distribuyen espacialmente de oriente a poniente en la UGA 33, presentaba en el 49.2% de su superficie (89.43 km^2) un grado de antropización medio, el cual se distribuía de manera homogénea dentro de esta unidad de paisaje. La temperatura superficial promedio (TSP) registrada para este

grado de antropización osciló entre los 21.3°C y 22.4°C, producto de la presencia de vegetación secundaria arbórea (86.16 km²) y herbácea/arbustiva de vegetación de selva mediana subperennifolia (1.85 km²) que, a pesar de ser vegetación secundaria, aún se caracterizaba por formar parte de un ecosistema natural. Este tipo de paisajes también presentó un grado de antropización muy alto (17.29 km²), muy bajo (15.69 km²) y alto (13.68 km²). En cuanto a la modificación antrópica más alta, ésta se localizó al sur y poniente de la unidad, principalmente. La TSP de estas áreas fueron las más altas en 1984, con valores entre los 24.3°C y 26.9°C, debido a la presencia de los asentamientos humanos (13.08 km²) al sur que integraban a la ciudad de Chetumal, y a las áreas agrícolas/pecuarias (3.40 km²) al poniente de la unidad, particularmente, las que se encontraban en los ejidos localizados al norte de la actual localidad de Huay-Pix.

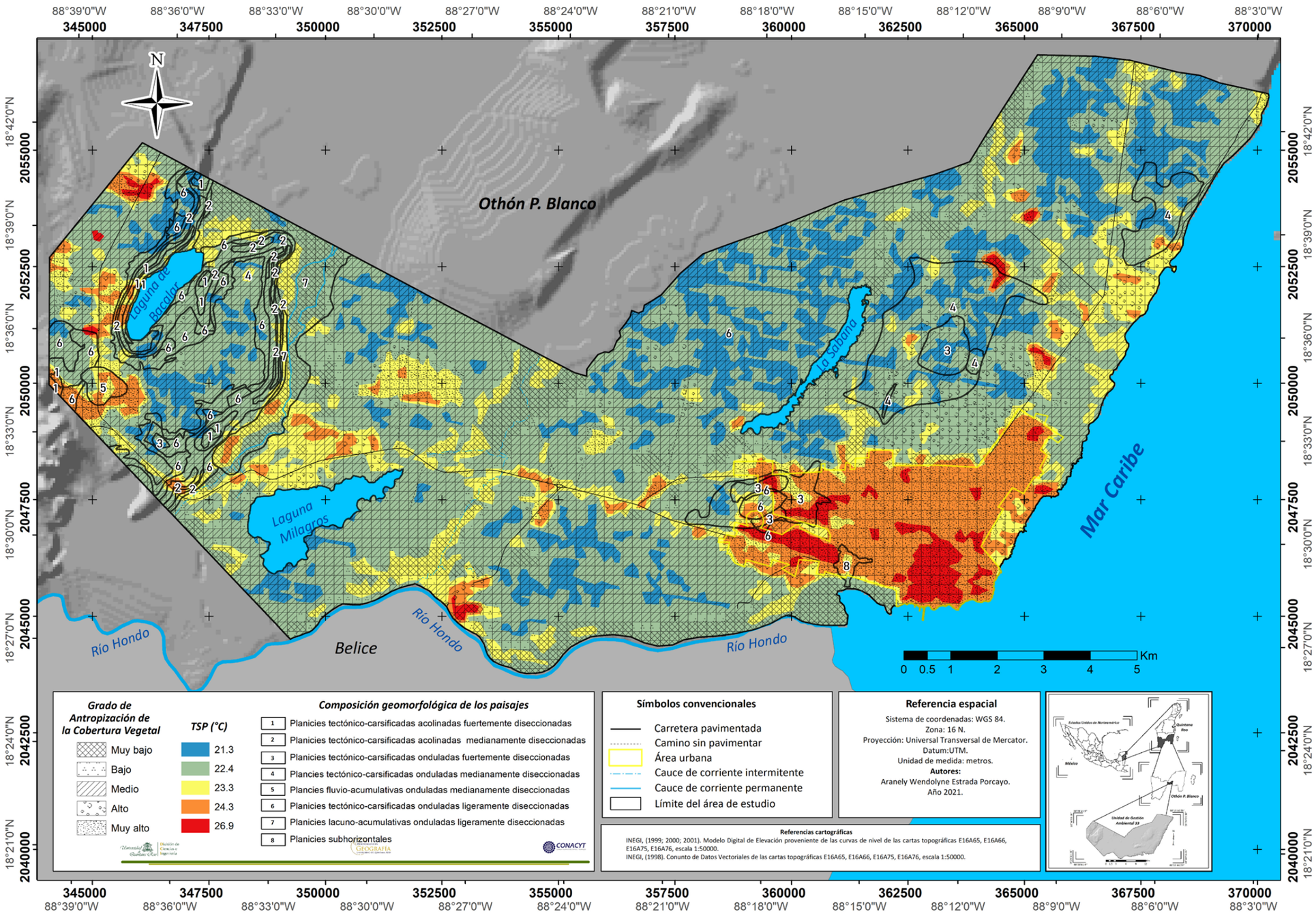
La antropización más baja se presentó al poniente, sur y nororiente de este geocomplejo, con temperaturas promedio entre los 22.4°C y 23.3°C, particularmente en las áreas adyacentes a la laguna Milagros, el río Hondo y el cuerpo de agua conocido como La Sabana, puesto que en estas zonas es donde se concentra la mayor parte de la superficie con coberturas netamente naturales, como lo son la vegetación hidrófila (12.30 km²) y los cuerpos de agua (5.06 km²), mencionados anteriormente. Las áreas de este geocomplejo con una alta antropización presentó una TSP de 22.4°C, que se debió a la presencia de vegetación secundaria herbácea/arbustiva (5.35 km²) y arbórea (2.84 km²) de selva mediana subperennifolia, existente al norte de la ciudad de Chetumal y al noreste de la misma, en donde se localiza la actual localidad de Calderitas, en donde también se identificaron áreas de selva modificadas (2.84 km²), en las cuales parte de su superficie fue deforestada para establecer caminos o realizar la limpieza del terreno para su posterior cambio de uso del suelo. Las actividades agrícolas y pecuarias (1.77 km²), así como los asentamientos humanos (0.56 km²), fueron algunas actividades antrópicas que también contribuyeron a la alta modificación de la cobertura vegetal de estos paisajes.

Las planicies tectónico-carsificadas onduladas medianamente diseccionadas, localizadas al poniente y oriente de la UGA, se caracterizaron por presentar una antropización media (15.50 km²) con temperaturas entre los 21.3°C y 22.4°C, debido a la presencia de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (14.69 km²). Estos geocomplejos también manifestaron una antropización alta (3.53 km²) y muy alta (1.94 km²) en áreas localizadas al poniente de la UGA 33, principalmente, en donde la TSP osciló entre los 23.3°C y 24.3°C, debido a la presencia de vegetación secundaria herbácea/arbustiva (2.05 km²) y de actividades agrícolas (3.40 km²) desarrolladas en los ejidos localizados al poniente y sur de la actual localidad de Xul-Ha.

En las planicies lacuno-acumulativas onduladas ligeramente diseccionadas, localizadas al poniente de la UGA y particularmente en el entorno inmediato entre la laguna de Bacalar y la laguna Milagros, el grado de antropización en 1984 fue muy bajo (4.75 km²) y presentó temperaturas entre los 22.4°C y 23.3°C, temperaturas relativamente bajas en comparación del resto, debido a la presencia de vegetación hidrófila de tipo primaria (4.15 km²).

Los paisajes conformados por planicies tecntónico-carsificadas onduladas fuertemente diseccionadas, localizadas en la poción centro de la UGA, particularmente al oeste y norte de la ciudad de Chetumal, presentaron una antropización media (1.62 km²) en la mayor parte de su superficie, con temperaturas entre 21.3°C y 22.4°C producto de la presencia de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (1.51 km²); seguido de una muy alta (1.01 km²), con una TSP que varió entre 23.3°C y 26.9°C debido a la presencia de asentamientos humanos (0.97 km²) localizados en la porción poniente de la ciudad de Chetumal en 1984.

Antropización de la cobertura vegetal y temperatura superficial promedio en los paisajes de la UGA 33 (año 1984)



► **Figura 3.** Mapa de antropización y TSP (°C) en los paisajes de la UGA 33.

Fuente: Elaboración propia.

Las planicies tectónico-carsificadas acolinadas que van de fuerte a ligeramente diseccionadas, localizadas en las áreas adyacentes a la laguna de Bacalar, presentaron, en su mayoría, un grado de antropización medio con 1.4 km² y 3.2 km², respectivamente, con temperaturas entre los 22.4°C y 23.3°C derivado de la existencia de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia. Las planicies subhorizontales presentaron, en su mayoría, una antropización muy alta (0.24 km²), puesto que este tipo de paisaje estaba conformado casi en su totalidad por asentamientos humanos, lo que produjo temperaturas de 24.3°C.

Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes y temperatura superficial promedio: año 2020

Para el año 2020 las actividades realizadas por el hombre contribuyeron al incremento de la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes que integran la UGA 33. La Figura 4 representa cómo en las planicies tectónico-carsificadas onduladas ligeramente diseccionadas, localizadas de oriente a poniente en el área de estudio, predominó el grado de antropización medio con 75.43 km², seguido del muy alto con 32.82 km², el alto con 15.13 km², el muy bajo con 14.20 km² y el bajo con 7.46 km².

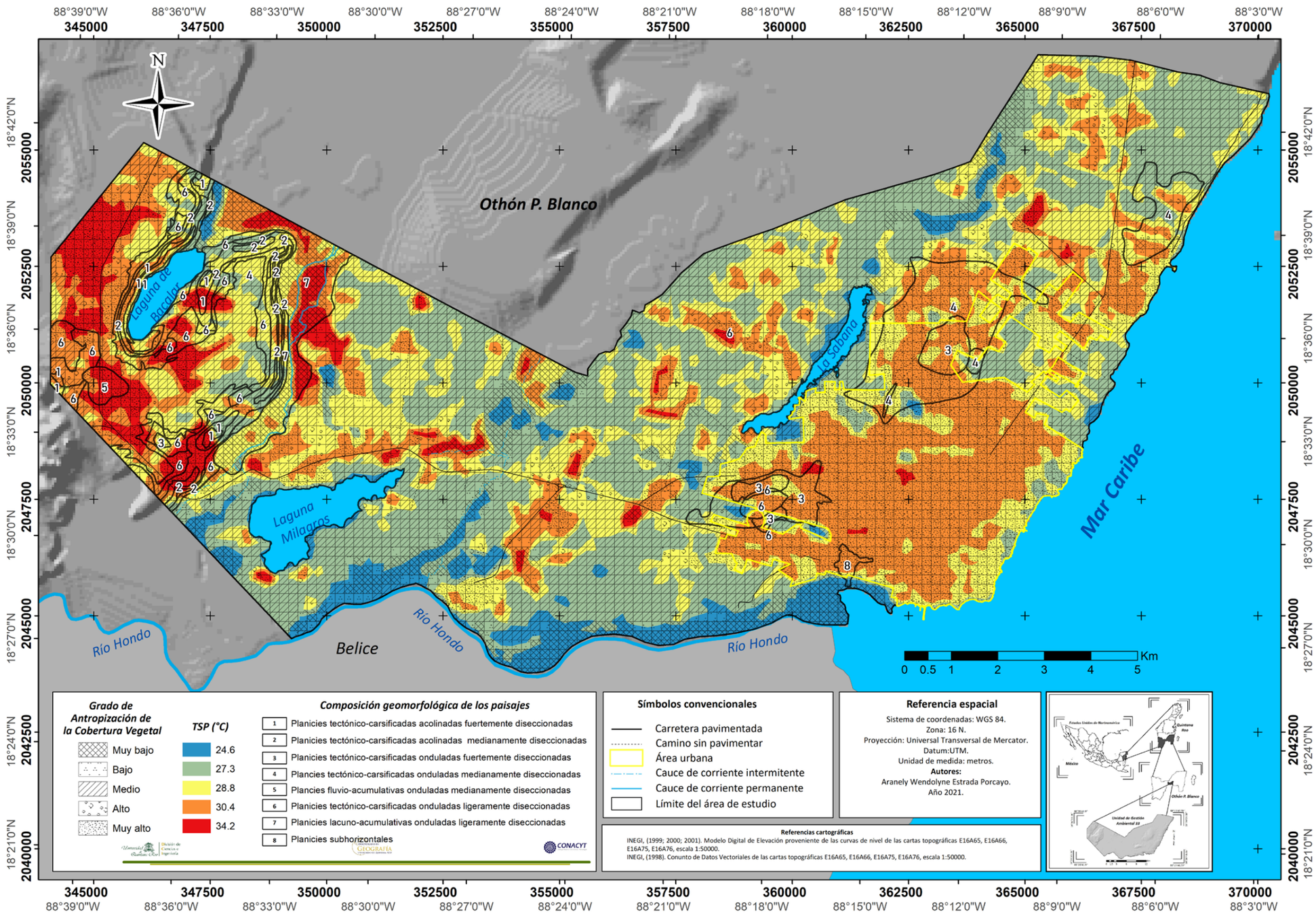
A pesar de que la antropización media fue la que predominó en este tipo de geocomplejos, se identificó una disminución de 14 km² para este grado de antropización, al igual que para la baja (1.5 km²) y muy baja (1.5 km²), dando como resultado un incremento de 1.5 km² en las zonas con antropización alta y de 15.5 km² en las de muy alta. De esta forma los paisajes con un alto grado de modificación antrópica pasaron de 13.6 km² en el año 1984 a 15.13 km² en el 2020 y se localizaron en la porción centro y norponiente del geocomplejo. Mientras que el grado más alto de antropización fue el que ganó mayor superficie al norponiente de la UGA, pasó de 17.28 km² a 32.82 km². Dichas variaciones en los grados de antropización se debieron, en el caso de la antropización alta, a que la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia fue sustituida por vegetación herbácea/ arbustiva y por vegetación secundaria arbórea de selva modificada, principalmente. Mientras que el grado más alto de antropización fue a causa de que la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia fue transformada por asentamientos humanos. Por tanto, la TSP para las áreas medianamente antropizadas osciló entre los 27.3°C y 28.8°C, para las altas y muy altamente antropizadas los valores fueron entre 28.8°C y 34.2°C, mientras que las áreas con menor antropización presentaron una variación de temperatura entre 24.6°C y 28.8°C.

En las planicies tectónico-carsificadas onduladas medianamente diseccionadas prevaleció la categoría muy alta de antropización con 9.7 km², seguido de la media con 7.5 km² y la alta con 3.6 km². La primera se distribuyó al poniente y nororiente de la UGA, presentando una TSP entre 30.4°C y 34.2°C; el mayor grado de antropización al poniente se asoció con la presencia de áreas agrícolas (3.6 km²) localizadas en los ejidos que se encuentran al oeste y sur de la localidad de Xul-Ha, además de la existencia de asentamientos humanos con selva mediana subperennifolia (2.2 km²), correspondientes a la localidad de Xul-Ha; y la antropización muy alta que se localizó al nororiente de la UGA guardó relación con los asentamientos humanos existentes al norte de la ciudad de Chetumal y que equivalieron a 3.4 km², en esta unidad de paisaje. En cuanto a la antropización media, ésta se localizó al poniente de la UGA, particularmente al oriente de este geocomplejo y fue resultado de la presencia de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (7.2 km²). La temperatura superficial promedio en esta zona osciló entre 28.8°C y 30.4°C. La antropización alta se asoció con la presencia de áreas con vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (1.5 km²) y áreas agrícolas (1.09 km²), las cuales se distribuyeron principalmente al poniente de la UGA. El registro de TSP para este grado de antropización fue de 30.4°C.

Los paisajes de planicies lacuno-acumulativas onduladas ligeramente diseccionadas presentaron, en su gran mayoría, un grado de antropización muy bajo (4.70 km²), debido a que correspondió a las áreas más naturales de la UGA y las cuales se localizan en los sitios adyacentes a la laguna de Bacalar y la laguna Milagros, puesto que son paisajes cubiertos por vegetación hidrófila, la cual no ha experimentado alteración alguna por parte de las actividades antrópicas. Sin embargo, estas áreas, a pesar de tener una antropización muy baja, presentaron valores de TSP de 28.8°C y en algunos casos de 30.4°C hasta 34.2°C.

En las planicies tectónico-carsificadas onduladas fuertemente diseccionadas continuó prevaleciendo el grado muy alto de antropización, sin embargo, a comparación del año 1984, esta categoría aumentó 0.9 km², dando un total de 2.29 km² para el año 2020. El aumento en este grado de antropización se derivó de la sustitución de 0.7 km² de vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia por asentamientos humanos, particularmente los localizados en el norte de la ciudad de Chetumal en donde las temperaturas registraron valores entre los 28.8°C y 30.4°C.

Antropización de la cobertura vegetal y temperatura superficial promedio en los paisajes de la UGA 33 (año 2020)



► **Figura 4.** Mapa de antropización y TSP (°C) en los paisajes de la UGA 33.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados de este estudio muestran que en un periodo de 36 años algunos de los paisajes de la UGA 33 presentaron un incremento de áreas con un grado de antropización alto, particularmente, al sur de las planicies tectónico-carsificadas onduladas ligeramente diseccionadas y al poniente de la UGA, en las planicies tectónico-carsificadas onduladas medianamente diseccionadas. Las primeras se debieron al crecimiento urbano de la ciudad de Chetumal, mientras que las segundas fueron producto del establecimiento de asentamientos humanos en la localidad de Xul-Ha y de áreas agrícolas en zonas circundantes a la misma. Las TSP para estas zonas fueron de las más altas en el área de estudio, sin embargo, las zonas agrícolas presentaron mayor temperatura que las zonas urbanas.

Los paisajes que conforman a la UGA 33 se caracterizaron por presentar, en su gran mayoría, un grado de antropización medio, esto debido a que en ellos prevalece la presencia de vegetación secundaria de selva mediana subperennifolia, si bien al ser secundaria indica que ya fue antropizada en algún momento, pero al ser una cobertura vegetal sigue cumpliendo con sus funciones ecológicas, coadyuvando así con la regulación de la temperatura superficial, puesto que parte de la superficie de los paisajes con este grado de antropización presentó temperaturas superficiales más bajas que aquellas mayormente antropizadas.

Las zonas menormente antropizadas se distribuyeron espacialmente al sur y poniente de las planicies tectónico-acumulativas onduladas ligeramente diseccionadas, en las planicies lacuno-acumulativas onduladas ligeramente diseccionadas, en ambos casos correspondió con la presencia de áreas con vegetación hidrófila que, al ser de tipo primaria, denota la ausencia de perturbación y/o modificación por parte del hombre. Sin embargo, el comportamiento de la temperatura superficial para estas zonas en un lapso de 36 años fue variante, pues se observaron desde temperaturas bajas y muy bajas al sur, hasta temperaturas muy cálidas al poniente, en los paisajes lacuno-acumulativos localizados en las inmediaciones de la laguna de Bacalar y la laguna Milagros.

Aún cuando los resultados de esta investigación evidencian la relación entre la antropización y la temperatura superficial, la asociación espacial entre ambas variables denotó que esta relación no es totalmente directa, es decir, no en todos los casos se cumplió la premisa de a mayor antropización mayor temperatura y viceversa. Esto indica que existen otros factores que inciden en el comportamiento de la temperatura, los cuales se sugiere analizar en investigaciones futuras.

Analizar la antropización de la cobertura vegetal y el comportamiento de la temperatura superficial en un lapso de 36 años permitió identificar que los proyectos pensados para el desarrollo social y económico de la región influirán en los procesos de cambios de uso de suelo, incrementado así la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes de la UGA 33 y contribuyendo a la variación de la temperatura superficial en la zona de estudio.

En esta porción del Caribe mexicano existe la tendencia a disminuir las condiciones ecológicas de la región, por tanto, convendría realizar estudios de proyección sobre las variaciones de la temperatura superficial a fin de sistematizar y evidenciar las consecuencias que tiene la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes sobre esta variable ambiental.

» Referencias bibliográficas

Akinbobola, A. (2019). Simulating Land Cover Changes and Their Impacts on Land Surface Temperature in Onitsha, South East Nigeria. *Atmospheric and Climate Sciences*, 09(02), 243–263. https://doi.org/10.4236/acs.2019.92017

Ali, A., Riaz, S., & Iqbal, S. (2014). Deforestation And Its Impacts On Climate Change An Overview Of Pakistan. *Papers on Global Change IGBP*, 21(1), 51–60. https://doi.org/10.1515/igbp-2015-0003

Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., Trezza, R., & Waters, R. (2002). *Surface energy balance algorithms for land, Idaho implementation, advanced training and user's manual*. NASA.

Alonzo-Alonzo, L. A., & González-Vera, M. A. (2010). PERDIDA DE COBERTURA VEGETAL COMO EFECTO DE LA URBANIZACIÓN EN CHETUMAL, QUINTANA ROO. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 12(2), 1–19. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40115676001

Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313–329. https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8

Challenger, A., & Sóberon, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. *Capital Natural de México* (Vol. 1, pp. 87–108). CONABIO.

Choudhury, D., Das, K., & Das, A. (2019). Assessment of land use land cover changes and its impact on variations of land surface temperature in Asansol-Durgapur Development Region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), 203–218. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.004

Cortina Villar, S., Mendoza, P. M., & Orgneva-Himmelberger, Y. (1999). Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas*, 1(38). https://doi.org/10.14350/rig.59077

Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez-Damián, J. L., & Gonzales-Terrazas, D.I. (2010). Proceso de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. In H. Cotler-Ávalos (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México* (Primera edición, pp. 96–111). https://agua.org.mx/

Ellis, E. A., Hernandez Gomez, U., & Romero-Montero, J. A. (2017). Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la Península Yucatán, México. *Ecosistemas*, 26(1), 101–111. https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.16

El-Zeiny, A. M., & Effat, H. A. (2017). Environmental monitoring of spatiotemporal change in land use/land cover and its impact on land surface temperature in El-Fayoum governorate, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 266–277. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.003

Estrada-Porcayo, A. W., Ramírez-Sánchez, L. G., & Chávez-Alvarado, R. (2023). Clasificación de los paisajes físico-geográficos de la Unidad de Gestión Ambiental 33, Quintana Roo, México a escala 1:50000. *Estudios Geográficos*, 84(294), e130. https://doi.org/10.3989/estgeogr.2023136.136

Fuentes-Pérez, C. A. (2017). Climatología urbana por modificación antropogénica. Alteración del balance de energía natural. *Revista de La Facultad de Arquitectura de La Universidad Autónoma de Nuevo León*, 9(11), 73–91. https://contexto.uanl.mx/index.php/contexto/article/view/88

García-Rubio, G., Schmook, B., & Espejel-Carvajal, I. (2012). Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas*, 58, 122-139. https://doi.org/10.14350/rig.30051

IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C* (V. Masson-Delmotte, P. Hans-Otto, S. Jim, A. Pirani, R. Pidcock, Y. Chen, E. Lonnoy, W. Moufouma-Okia, S. Connors, X. Zhou, T. Maycock, M. Tignor, P. Zhai, D. Roberts, P. R. Shukla, P. R. Péan, J. B. Matthews, M. I. Gomis, & T. Waterfield, Eds.; 1st ed.). OMM, PNUMA.

Jáuregui, E. (2012). Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region. *Investigaciones Geográficas*, 55, 46-60. https://doi.org/10.14350/rig.30110

Khorramí, B., Gunduz, O., Patel, N., Ghouzlane, S., & Najjar, M. (2019). Land surface temperature anomalies in response to changes in forest cover. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(3), 149–156. https://doi.org/10.26833/ijeg.549944

Layza, R., Gonzales, F., & Terán, J. (2018). La deforestación y el cambio climático en la provincia de San Martín periodo: 1973 al 2014. *Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 14(2), 19–30. https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/2072

Mallick, J., & Kant, Y. (2008). *Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16407623

Marham, B. L., & Barker, J. L. (1987). Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3), 517–523. https://doi.org/10.1080/01431168708948658

Martínez-Dueñas, W. A. (2010). INRA - Índice integrado relativo de antropización: propuesta técnica-conceptual y aplicación. *Intropica*, 5(1), 37–46. https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/152

Mushore, T. D., Mutanga, O., Odindi, J., & Dube, T. (2017). Linking major shifts in land surface temperatures to long term land use and land cover changes: A case of Harare, Zimbabwe. *Urban Climate*, 20, 120–134. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.005

Nzoiwu, C. P., Agulue, E. I., Mbah, S., & Igboanugo, C. P. (2017). Impact of Land Use/Land Cover Change on Surface Temperature Condition of Awka Town, Nigeria. *Journal of Geographic Information System*, 09(06), 763–776. https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96047

Padilla, Y. (2019). *Proceso de urbanización y cambio de condiciones térmicas. Caso de estudio Chetumal Quintana Roo*. [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/2342

Pal, S., & Ziaul, Sk. (2017). Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 125–145. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.003

Paolini, L. (2012). Análisis de la respuesta de la temperatura de superfcie al crecimiento urbano utilizando series temporales modis. *Revista Española de Teledetección*, 19–26.

Pérez, J. I. J., Némiga, X. A., Monroy Gaytán, J. F., Gutiérrez Cedillo, J. G., Balderas Plata, M. Á., Loik, M. E., Hernández González, M. M., & Camacho Sanabria, J. M. (2010). Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México: 1960-2007. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 17(2), 143–153. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10413200004

Quijano Pérez, S. A., Ramírez Velásquez, I. M., & González Manosalva, J. L. (2017). Gradiente térmico en la ciudad de Medellín y su relación con el crecimiento urbano: estudio de caso. *Producción + Limpia*, 12(2), 159–168. https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a13

Rodríguez-Eraso, N., Pabón-Caicedo, J. D., Bernal-Suárez, N. R., & Martínez-Collantes, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. ©Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Salinas-Castillo, W. E., & Treviño-Garza, E. J. (2001). Impacto de la deforestación en el microclima de la subcuenca río Corona, Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*, 1(47), 59-76. https://doi.org/10.14350/rig.59165

SEDATU. (2018). *Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay-Pix y Xul-Ha. Municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo*. Gobierno de Othón P. Blanco. https://qroo.gob.mx/sedetus2/programas-de-desarrollo-urbano/

SEMA. (2015). Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. Bitácora Ambiental SEMAQROO. http://bitacora-ambiental.semaqroo.gob.mx/index.php/gallery/municipio-de-othon-p-blanco

Singh, N., Chatterjee, R. S., Kumar, D., & Panigrahi, D. C. (2021). Spatio-temporal variation and propagation direction of coal fire in Jharia Coalfield, India by satellite-based multi-temporal night-time land surface temperature imaging. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(5), 765–778. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.07.002

Velázquez-Salazar, S., Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T., & Cruz-López, M. I. (2019). Anthropization in the coastal zone associated with Mexican mangroves (2005–2015). *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(8), 521-550. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7661-3

4.4 Implementación de indicadores de resiliencia en playas de uso turístico

Rosalinda Islas García
Laboratorio de Observación e Investigación Espacial de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Oscar Frausto Martínez
Laboratorio de Observación e Investigación Espacial de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Palabras Clave: Gestión del riesgo, vulnerabilidad, amenaza, capacidad adaptativa, manejo costero.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial del Turismo (OMT), en el año 2018 la industria turística representaba el 10.4% del producto interno bruto (PIB) a nivel mundial, convirtiéndose en el segundo sector con mejor evolución, por detrás de la industria manufacturera (Altimira-Vega *et al*., 2007).

La industria turística tiene como mayor demanda las zonas costeras debido a sus características intrínsecas que representa. Uno de sus componentes son las zonas litorales, también conocidas como playas, éstas son altamente valoradas, en especial las playas de arena, estos ecosistemas son considerados como sistemas frágiles con alto dinamismo y están fuertemente influenciados por factores naturales, oceanográficos y antropogénicos.

En las últimas décadas, las zonas costeras han presentado una mayor demanda demográfica, presentando altos crecimientos en la configuración de su población, lo que refleja altas demandas de servicios, principalmente de infraestructura.

La presión que se ejerce sobre los ecosistemas terrestres y marinos de las zonas costeras tiene como efecto el surgimiento de nuevas ciudades costeras que requieren de los servicios ecosistémicos, esta transición puede convertirse en importantes problemas con conflictos sociales debido a la pérdida de importantes servicios ecosistémicos (Barragán & de Andrés, 2016).

Por lo tanto, resulta importante proponer nuevos modelos de gestión que tomen en cuenta los riesgos a los que puedan estar sujetos estos ambientes y las pérdidas de ingresos derivados del turismo, ya que esto involucra una reducción de la competitividad en los destinos turísticos (Jiménez *et al*., 2017).

Uno de los nuevos modelos que toma en cuenta los riesgos en las sociedades y los ecosistemas son los modelos y estudios de la resiliencia con enfoque en sistemas socioecológicos. Cutter *et al*. (2014) hacen hincapié en la necesidad de la comprensión de la gestión y dinámica del sistema, posterior a esto, Frausto-Martínez *et al*. (2018) señalan que la resiliencia costera está en función de las capacidades de respuesta que desarrolla la sociedad, las organizaciones y las instituciones ante cierta amenaza.

Los estudios de resiliencia son fundamentales, ya que analizan los procesos de gestión y la información de los diferentes componentes del sistema, de manera que son útiles para la formulación de políticas públicas específicas capaces de resolver un problema en las diferentes escalas de tiempo: corto, mediano y largo plazo. Gestionando de la mejor manera los recursos naturales, humanos y económicos (Frausto-Martínez & Colín-Olivares, 2019).

Una de las formas de analizar la resiliencia es a través de indicadores, tomando como contexto especifico el lugar y la amenaza, el uso de indicadores para el estudio de la resiliencia se ha encontrado para disminuir los desastres y fortalecer las capacidades de las

comunidades, ya que estos sistematizan la información. Los indicadores deben medir las características específicas de la amenaza y el sistema contextualizado, además de ser significativos, relevantes, pertinentes y prácticos (Frausto *et al.*, 2016).

El objetivo de esta investigación es analizar las playas desde la perspectiva de la resiliencia, proponiendo un sistema de indicadores que permita reconocer los factores sociales, ambientales e institucionales que definen la resiliencia ante los procesos de erosión costera en las playas de uso turístico.

Indicadores

Los indicadores son útiles para la gestión de los recursos naturales, debido a que clasifican evalúan y comparan información a través de tiempo y el espacio, cumplen tres funciones básicas: simplifican, cuantifican y comunican información (Frausto *et al.*, 2016). En la gestión, la elaboración de indicadores está asociada a la evaluación, ya que parten de la realidad como juicios de valor emitidos por los actores (Enseñat-Soberanis, 2019).

Un indicador también puede ser una herramienta metodológica que sirve para la gestión, debido a que permite visualizar impactos de procesos tanto de mejoramiento y fortalecimiento como de privación y vulnerabilidad socioambiental, los indicadores pueden desagregar o articular información (Frausto-Martínez & Colín-Olivares, 2019), son un valor derivado de parámetros generales que describen el estado de un fenómeno dado, funcionan como variables que miden, simplifican y comunican información de un aspecto determinado de un fenómeno, haciendo perceptibles fenómenos de interés, representando de manera operativa una característica del sistema (Frausto-Martínez *et al.*, 2005).

Los indicadores son representaciones operativas de un atributo, es decir, la característica de una variable determinada del fenómeno a medir, por lo tanto, un indicador debe ser: significativo, relevante, pertinente y práctico. Se clasifican según la disponibilidad de información y el nivel de agregación, dando como resultado el grado de complejidad, resultando entonces las siguientes categorías: indicadores simples y complejos e indicadores con información y sin información. Depende de su categoría, estos pueden ser aplicados a corto plazo, mediano o largo plazo, ambos pueden ser de corte métrico (cualitativos) o lista de verificación (cuantitativos) (Frausto-Martínez & Colín-Olivares, 2019).

Resiliencia e indicadores

El estudio de la resiliencia puede ser analizado de forma sistemática y científica de aproximación de la realidad, con una orientación transdisciplinaria, bajo el enfoque de sistema socioecológico complejo, ya que en él se consideran las relaciones entre los sistemas sociales y ambientales, en este enfoque se destacan las relaciones y conjuntos que pueden establecerse dentro de ambos sistemas (Peralta, 2016).

Resulta necesario identificar la relación entre el sistema social y el sistema ecológico, el primero integrado por: instituciones, políticas, economía, grupos sociales y tecnología; el segundo, por: hidrología, clima, procesos físicos, químicos y biológicos (Raskin, 2008). Por lo general, los sistemas sociales se mantienen gracias al intercambio de materia y energía del medio ecológico, habiendo una estrecha relación entre ambos, las relaciones y los procesos asociados causan modificaciones en ambos sistemas.

La viabilidad de los sistemas está en función del flujo incesante de materia y energía que proviene del entorno entre ambos sistemas abiertos (Urquiza-Gómez & Cadenas, 2015). La interacción entre estos ecosistemas se reconoce también como sistemas socioecológicos.

Los sistemas socioecológicos representan sistemas complejos adaptativos, como característica se puede decir que son interdependientes, dinámicos, no lineales, tienden a la incertidumbre, son emergentes, se autoorganizan y se adaptan a través del tiempo (Castillo-Villanueva & Velázquez-Torres, 2015).

Una forma de aproximarse al entendimiento de los sistemas socioecológicos es por medio de los estudios con enfoque hacia la resiliencia, siendo que la resiliencia determina algunos aspectos como lo son: liderazgo, eficacia colectiva, cohesión social y apego al lugar. Sin embargo, los componentes físicos, como la infraestructura y los recursos, son aspectos adicionales (Cutter *et al.*, 2008; Ungar, 2011).

La resiliencia es la capacidad de los sistemas socioecológicos para adaptarse o transformarse en respuesta a situaciones desconocidas, choques inesperados o extremos, por medio de la diversidad, modularidad, apertura, reservas, retroalimentación, monitoreo y liderazgo del sistema impactado (Carpenter *et al.*, 2012).

La pérdida de resiliencia ecológica pone a prueba la capacidad de adaptación del ser humano en las dimensiones del sistema (Walker *et al.*, 2006). En el contexto de la gestión ambiental y sostenibilidad, la resiliencia es la capacidad de los sistemas socioecológicos para absorber las perturbaciones, reorganizarse y conservar las mismas funciones en cuanto a estructura y composición.

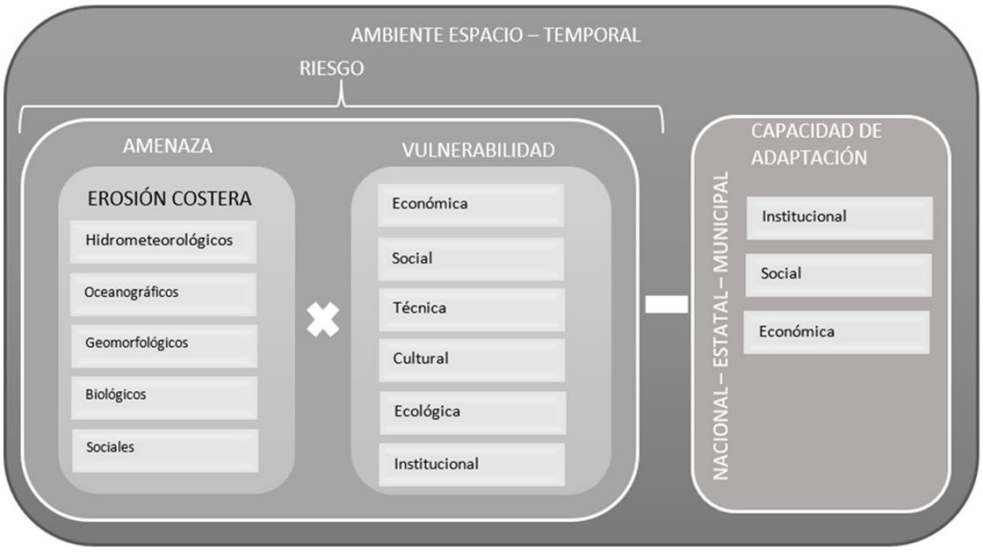
El análisis de la resiliencia se enfatiza hacia el estudio de los desastres, evaluando la amenaza y las vulnerabilidades del sistema, reconociendo entonces la resiliencia como la capacidad de adaptación de una comunidad para restablecerse por sí misma tras los impactos de una amenaza en particular.

De acuerdo con Frausto *et al.* (2016), los componentes de la resiliencia son: peligro o amenaza, vulnerabilidad, riesgo y capacidad adaptativa. La resiliencia expresada como la capacidad de adaptación de un sistema refleja las siguientes expresiones:

*Riesgo=Amenaza*vulnerabilidad*
*Riesgo=Vulnerabilidad Capacidad de respuesta *Amenaza*
*IR= Amenaza*Vulnerabilidad-Capacidad de adaptación*

Para operacionalizar la ecuación y determinar la resiliencia se realizan tres fases:

- ***Fase 1***. Se caracteriza la amenaza y sus componentes físicos.
- ***Fase 2***. Se analiza la vulnerabilidad del sistema y se establecen dimensiones reconociendo al sistema como complejo, donde interactúan factores sociales y biofísicos en diferentes escalas de tiempo y espacio.
- ***Fase 3***. Se mide la capacidad de adaptación en diferentes dimensiones después de una fecha de cohorte.



► **Figura 1.** Modelo de los componentes de la resiliencia.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Hernández Aguilar (2014).

La operacionalización de la resiliencia resulta importante para cuantificar los procesos y elementos del sistema con el fin de estimar una línea base y posteriormente medir los progresos para aumentarla.

Para esta investigación se diseñaron indicadores como herramienta de gestión, ya que estos miden ya sea el fenómeno o los elementos expuestos de presión, estado o respuesta en un espacio determinado.

El análisis de la resiliencia en este estudio se realizó por medio de indicadores, ya que muestran la transformación de los sistemas socioecológicos a través del tiempo, considerando una fecha de cohorte, los indicadores ayudaron a reconocer la vulnerabilidad y las capacidades de adaptación del sistema en sus diferentes componentes.

Resiliencia en playas de uso turístico

El sector turístico ha sido un factor que ha contribuido a cambios ambientales, económicos y sociales, tanto positivos como negativos (Ariza *et al*., 2014). Los cambios sociales y económicos han transformado las playas a través del tiempo convirtiendo las playas naturales en espacios recreativos, lo que conlleva: altas tasas de migración, crecimiento económico acelerado y cambio de uso de suelo (Lucrezi *et al*., 2016).

Estos espacios se definen como unidades geomorfológicas presentes en la mayor parte de las costas, son ambientes dinámicos y ecológicamente sensibles a cambios tanto de origen natural como antropogénico. Otras definiciones de playa han sido aportadas por diferentes autores, que la definen como un recurso costero por el cual se obtienen ventajas económicas como el turismo y desarrollo inmobiliario (Botero *et al*., 2012).

Por su parte, Semeoshenkova *et al*. (2017) definen las playas recreativas como unos de los espacios para el esparcimiento, la diversión y el descanso. Es importante considerar que las playas generan valor y se capitalizan en el mercado dependiendo de su amplitud, entre más anchas y menos pendiente tengan, su valor aumenta (Semeoshenkova *et al*., 2017).

Para la gestión y aprovechamiento de las playas se han realizado estudios principalmente en función de la calidad ambiental, considerando aspectos, físicos y biológicos. Sin embargo, en los estudios de las playas turísticas es indispensable conocer la hidrodinámica, morfología, clima, parámetros fisicoquímicos, la infraestructura, la estética en términos de limpieza e higiene, el color de la arena en términos ecológicos y estéticos, la calidad del paisaje natural, información sobre comercios y construcciones, aptitud recreativa y seguridad física para los usuarios, percepción de los usuarios y prestadores de servicios, participación en los procesos de gestión de los prestadores de servicio (C. M. Botero *et al*. (2012)). Además del reconocimiento de hábitos de recreación, políticas de desarrollo regional, análisis de la gobernanza y reconocimiento de los elementos primarios que influyen en la satisfacción e insatisfacción de los usuarios de las playas (Ariza *et al*., 2014; Cervantes-Rosas, 2008).

Para esta investigación, se entenderá por resiliencia ante erosión costera en playas de uso turístico como: las capacidades locales que desarrolla la sociedad, las organizaciones y las instituciones con el fin de conservar las funciones del sistema en cuanto a sus dimensiones (sociales, técnicas, culturales, ecológicas, institucionales y económicas).

Área de estudio

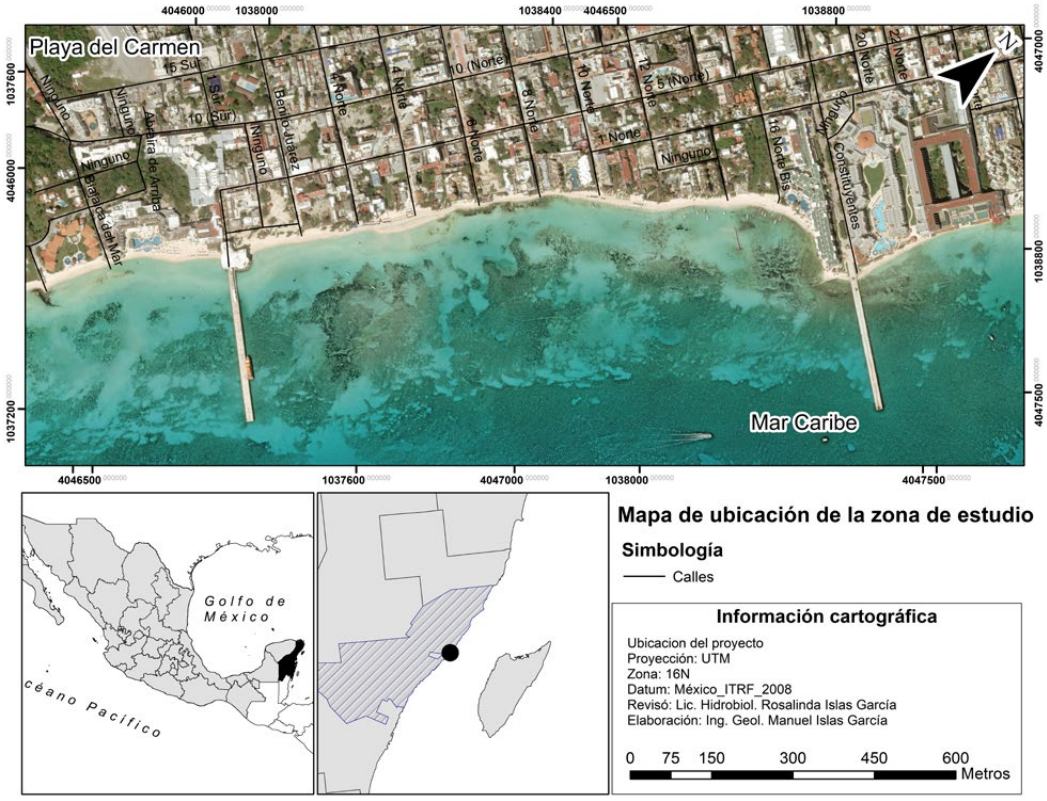
El municipio de Solidaridad se ubica en la zona norte del estado de Quintana Roo, esta zona, reconocida también como la riviera Maya, contempla cuatro municipios, Cancún, Puerto Morelos, Tulum y Solidaridad, la principal actividad económica es el turismo de sol y playa. El área de estudio está inmersa en una ciudad costera clasificada como pequeña, con 333,800 habitantes (INEGI, 2020). La población del municipio

de Solidaridad se considera, en su mayoría, migrante de los diferentes estados de la República Mexicana y de distintos países del mundo, además de contar con un alto número de población flotante (Delgado-Linero, 2016).

El área de estudio contempla 1,300 metros de longitud de playas, ubicadas en la zona centro de Playa del Carmen, cuenta con nueve accesos públicos al mar a través de calles pavimentadas perpendiculares a la costa, esta zona no cuenta son servicios públicos, al norte del área de estudio se cuanta con un cooperativa pesquera llamada Xaman – Ha con 29 años de antigüedad, a lo largo de la franja litoral se encuentran restaurantes con servicio de preparación de pescados y mariscos, cafeterías, fuentes de sodas, neverías, refresquerías y similares, servicios de alojamiento temporal de preparación y bebidas, servicios de esparcimiento culturales, deportivos y otros servicios recreativos, pesca marítima y otros.

La zona de estudio está delimitada por dos muelles, al sur se encuentra un muelle de 300 metros, que brinda servicios de trasporte marítimo y es la conexión con la isla de Cozumel, y al norte se ubica un muelle de 200 metros que se encuentra inactivo. Es un área urbanizada en su totalidad, por lo tanto, los procesos de erosión y acreción de las playas están fuertemente influenciados por las infraestructuras que delimitan el área de estudio.

Las playas del área de estudio pertenecen a una terraza marina, son playas rectas paralelas a la costa, con algunas salientes perpendiculares al norte, las playas están controladas por altos topográficos y por la exposición de algunas terrazas de bloques de roca al centro del área de estudio. Las playas presentan un comportamiento reflejante y menestable, siendo más estrechas en la temporada de nortes y más extensas para la temporada de secas, las geoformas de depósito de arena son en flechas de arena, el material sedimentario es de origen biogénico, rico en partículas coralinas, combinados con roca carbonatada y restos de conchas.



► **Figura 2.** Ubicación geográfica del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Esta región se encuentra sobre una franja con alta incidencia de trayectoria de huracanes, el huracán Gilberto (el año 1998) y el huracán Wilma (en el año 2005) impactaron las costas del norte de Quintana Roo, siendo el municipio de Solidaridad uno de los afectados, perdiendo grandes volúmenes de arena, exponiendo sustratos rocosos (Aldana *et al*., 2009; Sánchez-Rivera *et al*., 2021).

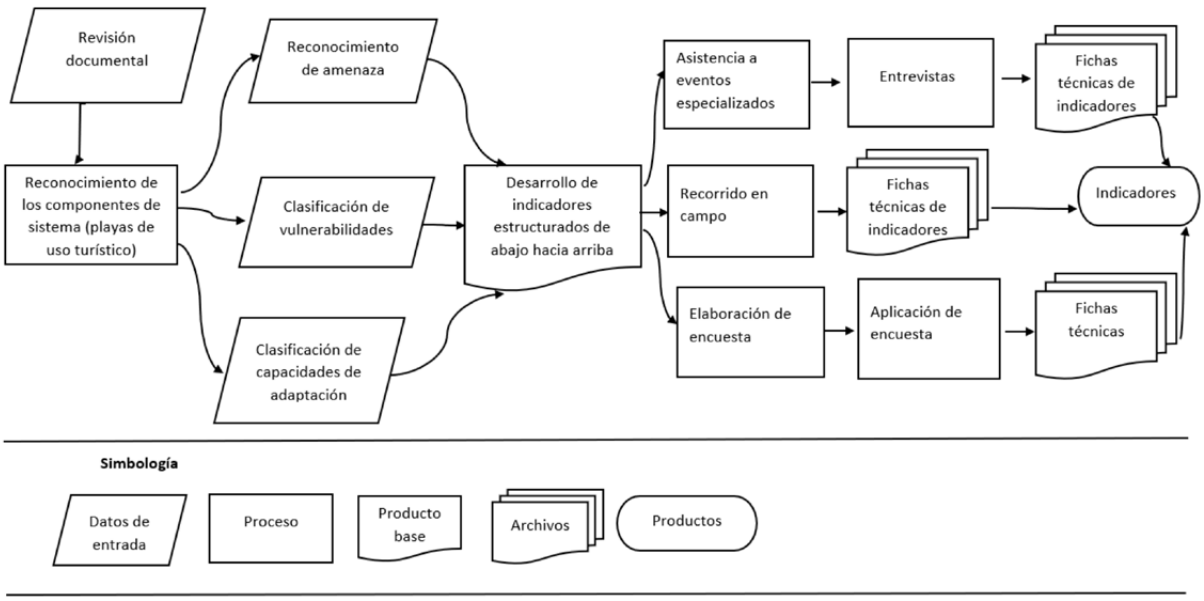
El 23 de junio del 2011 se estableció un Comité Técnico del Fideicomiso para la restauración, recuperación, sostenimiento y mantenimiento de la zona federal marítimo terrestre del estado de Quintana Roo, donde se propuso el programa de monitoreo y el programa de mantenimiento para las playas recuperadas por parte de la Comisión Federal de Electricidad. Se realizó un relleno simple de arena apoyado en una estructura de cierre, paralela a la costa, de 150 m de longitud, con un ancho de playa de 40- 50 metros y un volumen de 800,000m^3, el monitoreo permanente posterior fue de un año, resultando un ancho de playa mínimo de 29 m y un ancho de playa máximo de 85 m.

Metodología

El desarrollo de indicadores se realizó bajo los principios de los modelos estructurados de abajo hacia arriba, reconocidos como modelos participativos donde influye la participación de los actores clave y la percepción de la población (Ensenat-Soberanis, 2019; Frausto-Martínez & Colín-Olivares, 2019).

Para el desarrollo de los indicadores, se reconocieron los tres componentes de la resiliencia para determinar sus dimensiones y variables a medir. En primer lugar, se caracterizó la amenaza y, posteriormente, la vulnerabilidad de los elementos expuestos, diferenciada en: vulnerabilidad social, técnica, cultural, ecológica, económica e institucional. Finalmente, se clasificó y reconocieron las dimensiones de la capacidad adaptativa, quedando de la siguiente manera: institucional, social y económica.

Cada variable se redujo a su mínima expresión para proponer un sistema de indicadores con base en la amenaza y las características del objeto de estudio. La información fue desagregada bajo las nociones metodológicas básicas, cuyo objeto es describir a través de una reconstrucción de la realidad, mediante una estructura teórica y control de variables (Ensenat-Soberanis, 2019; Frausto *et al*., 2016).



► **Figura 3.** Esquema de la metodología empleada para la elaboración de indicadores.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, se elaboraron las fichas técnicas para cada indicador. Éstas constituyen una herramienta básica en los estudios del monitoreo de indicadores (Frausto-Martínez *et al*., 2018), permiten la consulta sistematizada de información y contribuyen a la toma de decisiones. Están conformadas por variables, tipo de indicador, dimensión en el análisis de la resiliencia, meta y se señala si es un indicador de presión, estado o respuesta; si es sencillo o complejo de elaborar en función de la información disponible. Asimismo, se señala una definición y comentarios donde se menciona la importancia en el sistema, la metodología, fuentes de información y resultados de cada ficha.

Resultados

Se reconocen 18 indicadores para el sistema de resiliencia ante la erosión costera en playas de uso turístico. Una dimensión y un indicador correspondiente a la amenaza, seis dimensiones con catorce indicadores para la vulnerabilidad y tres dimensiones con tres indicadores para la capacidad adaptativa.

En la Tabla 1 se detallan los componentes de la variable considerada, la dimensión, el número y tipo de indicador, el nombre, fuente de datos y la referencia conceptual.

Tabla 1. Batería de indicadores, propuesta del sistema de indicadores de resiliencia ante la erosión costera en playas de uso turístico

Variable	Dimensión	ID	TIPO PER	Indicadores	Fuente	Cita
Amenaza	Erosión costera	01	Estado	Presencia de escarpes	Visita de Campo	Lugo Hubp (2011)
Vulnerabilidad	Social	02	Estado	Cohesión social	Encuesta	Cohen *et al*., 2017; Cutter *et al*., 2008; Ungar (2011)
		03	Respuesta	Participación ciudadana	Encuesta	Cutter *et al*., 2008; Ruiz-Ballesteros (2015)
		04	Estado	Percepción del riesgo	Encuesta	Ojeda Rosero & López Vázquez, 2017; Zabala- Forero & Victorino (2019)
	Técnica	05	Respuesta	Mecanismos de planificación	Entrevista	Cutter *et al*., 2014; Kreibich *et al*., 2017; Ungar (2011)
		06	Estado	Desestabilización de cimientos	Visita de Campo	Soares *et al*. (2012)
		07	Estado	Accesibilidad a la playa	Visita de Campo	C. M. Botero *et al*. (2014)
		08	Estado	Infraestructura adecuada	Encuesta	Acosta, 2018; C. M. Botero *et al*. (2014)
	Cultural	09	Estado	Área suficiente para recreación	Visita de Campo	C. M. Botero *et al*., 2014; Hurtado García (2010)
		10	Respuesta	Arraigo	Encuesta/Entrevista	B. H. Walker *et al*. (2006a)
	Ecológica	11	Estado	Cobertura vegetal de playas	Visita de Campo	Espejel *et al*., 2017; Moreno-Casasola & Vázquez (2006)
		12	Estado	Calidad de arena	Análisis de laboratorio	Cervantes Rosas (2008)
	Económica	13	Respuesta	Recursos de inversión	Entrevista	Aronson, Blignaut, *et al*., 2007; Aronson, Renison, *et al*. (2007)
	Institucional	14	Respuesta	Normatividad	Análisis crítico de documentos.	Newell (2005)
		15	Respuesta	Identificación del riesgo	Entrevista	Pérez Marmolejo, 2017; B. H. Walker *et al*. (2006b)
Capacidad Adaptativa	Institucional	16	Respuesta	Uso de tecnologías	Encuesta/Entrevista	Zugar & Francoso (2009)
	Social	17	Respuesta	Gestión integral del riesgo costero	Encuesta/Entrevista	Jimenez *et al*. (2017)
	Económica	18	Respuesta	Fondos de ahorro	Entrevista	Xie *et al*. (2018)

Fuente: Elaboración propia con datos de entrevistas.

A continuación, se detallan los principales resultados por indicador:

Indicador clave 01. Presencia de escarpes: Respecto a la información obtenida para el indicador uno, que es un indicador de estado, se obtuvo que las zonas con mayor presencia de escarpes de acuerdo con los recorridos son: en época de nortes se encuentran escarpes a lo largo de toda la zona de estudio en temporada de secas, se encuentran escarpes permanentes en la zona norte y, finalmente, en época de lluvias se encuentran escarpes en la zona centro.

Indicador clave 02. Cohesión Social: Corresponde a un indicador de estado y, de acuerdo con los resultados, se tiene que el 88% de los encuestados afirman tener comunicación permanente cuando existe algún desastre, sin embargo, la mayoría de las personas no tienen antigüedad en sus puestos.

Sorj & Tironi (2007) afirman que los sistemas urbanizados y modernizados carecen de integración social y, de acuerdo con Delgado-Linero (2016), Playa del Carmen es un lugar con altas tasas de migración y un alto número de población flotante, donde la rotación de empleos es alta.

Es importante reconocer que, pese a que la zona de estudio está completamente urbanizada, existe un porcentaje alto de cohesión social en los prestadores de servicio, lo anterior es positivo ya que las estrategias de adaptación exitosas se derivan a partir de estructuras organizativas de las comunidades, pero al mismo tiempo, y como afirman Cutter *et al*. (2014) y Walker *et al*. (2006), la creación de redes y transmisión del conocimiento es fundamental para crear resiliencia, entonces, pese a que se tiene un porcentaje alto, no se cuenta con la experiencia de transmisión de conocimiento generacional.

Indicador clave 03. Participación ciudadana: Indicador de respuesta y está representado por el 20% de participación ciudadana en consultas públicas e instrumentos de planeación, lo que representa un problema ya que, como menciona Martínez-Flores *et al*. (2015), es fundamental interactuar y verter las opiniones en las mesas de diálogo junto con actores políticos para un adecuado diseño de políticas públicas, además de que estas sirven para la construcción de programas e instrumentos de regulación del territorio (Sánchez-Mazo, 2007).

Considerando la relación del indicador 02, se podría mencionar que sólo es la consecuencia de un periodo laboral corto dando como resultado un indicador con porcentajes bajos de participación ciudadana.

Indicador clave 04. Percepción del riesgo: Indicador de estado, representado por el 32%, es decir, que muy pocas personas perciben la erosión costera como un riesgo. Este indicador define a una sociedad ya que es la manera en cómo interpreta un fenómeno, la baja percepción del riesgo depende del conocimiento y significado generacional en relación con la amenaza (Ojeda-Rosero & López-Vázquez, 2017), considerando que el tiempo de permanencia de las personas es corto, las personas no identifican el riesgo.

Indicador clave 05. Mecanismos de planificación: Indicador de respuesta que refleja la gobernanza que existe con respecto a los litorales, además de la atención específica a problemas relacionados con la erosión costera. Es importante mencionar que existe un interés y coordinación entre sectores federales, estatales y municipales, sin embargo, no existen programas y estrategias específicas para la resolución de problemas relacionados con la erosión costera.

Indicador clave 06. Desestabilización de cimientos : Indicador de estado, representa el 32% de la población que reconoce haber tenido daños en su infraestructura causados por oleaje. Soares *et al*. (2012) aluden que la presencia de daños en estructuras está representada por el desarrollo técnico de las medidas de atenuación del impacto de la erosión.

Indicador clave 07. Accesibilidad a la playa: Indicador de estado, representado por el 76% de afirmaciones positivas, donde los concesionarios reconocen que han perdido accesibilidad a la playa a causa de fenómenos naturales.

Indicador clave 08. Infraestructura adecuada: Indicador de estado, donde se muestra el principal material de construcción de los locales o comercios, la mayoría de estos están hechos de concreto, es importante mencionar que, de acuerdo con Milanés-Batista *et al*.

(2018), las playas requieren modelos de construcción con estructuras moldeables, móviles y desmontables, además de considerar los pilotes para emplazar las estructuras rígidas como el cemento, ya que éste no permite el transporte de los sedimentos.

Indicador clave 09. Área suficiente para recreación: Indicador de estado y refleja el 76 % de frente reducido de playa de acuerdo con la Ley General de Bienes Nacionales, título cuarto, capítulo uno, establece que la zona federal marítima terrestre estará constituida por 20 metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua, lo cual limita los usos recreativos de los turistas, en esta zona es donde se cumple la normativa y se busca estandarizar los procesos que puedan ser objetos de multas administrativas, restricciones de uso de suelo y desarrollo de infraestructuras (Pennetta *et al*., 2011).

Indicador clave 10. Arraigo: Indicador de respuesta, refleja el compromiso humano por el espacio geográfico y todo lo que en éste suceda, involucrando la responsabilidad y corresponsabilidad con el medio que lo rodea tanto ambiental como socialmente (Rincón-Zárate, 2021). De acuerdo con los resultados el 64% de los prestadores de servicios y concesionarios han participado en programas de conservación y recuperación de playas, es importante mencionar que la mayoría considera que la limpieza de playas se refiere a programas de conservación y recuperación de playas.

Indicador clave 11. Cobertura vegetal de playas: Indicador de estado, refleja la inexistencia de dunas costeras en el área de estudio. De acuerdo con Espejel *et al*. (2017), la presencia de vegetación interviene en la fijación de las arenas. Por lo tanto, se tiene que el área está completamente expuesta al transporte de arenas, debido a que no se cuenta con vegetación que impida el transporte derivado del flujo del viento (Jiménez-Orocio *et al*., 2015).

Indicador clave 12. Calidad de arena: Indicador de estado, no cuenta con información. Se refiere al tipo y características del sustrato arenoso, ya que la composición influye directamente en la cohesión de los granos de arena, siendo que las arenas de igual tamaño (homogéneas) son características de las playas estables, en comparación con arenas heterogéneas, de diferentes tamaños, que reflejan mayor intercambio de energía y, como producto, mayor tasas de erosión.

Indicador clave 13. Recursos de inversión: Indicador de respuesta y se refiere a las acciones que se realizan en los tres niveles del gobierno (municipales, estatales y federales) para la conservación, protección y recuperación de las arenas. De acuerdo con Aronson, Blignaut, *et al*. (2007), es necesario restaurar los ecosistemas degradados e invertir en la restauración del capital natural para preservar y manejar los recursos naturales, con el fin de poder reincorporarlos a la cadena de bienes y servicios ecosistémicos. En este indicador entran los programas y acciones que tengan como objetivo conservar y mantener las playas.

Indicador clave 14. Normatividad: Indicador de respuesta y se refiere a la normatividad vigente aplicable a los litorales. De acuerdo con Vázquez-Sosa (2020), los instrumentos jurídicos actuales carecen de congruencia, además de presentar irregularidades, vacíos jurídicos y sobreposición de competencias. Actualmente no existe una ley de costas, de modo que la construcción de políticas públicas carece de un vector, sin embargo, como instrumento de guía se cuenta con la Política Nacional de Mares y Costas, donde se establecen algunas estrategias para la atención de los litorales, este indicador no cuenta con información.

Indicador clave 15. Identificación del riesgo: Indicador de respuesta que representa la respuesta institucional para identificar los riesgos. De acuerdo con los resultados los últimos dos atlas de riesgo del municipio de Solidaridad no reconocen la erosión como una amenaza.

Indicador clave 16. Uso de tecnologías: Indicador de respuesta y se refiere al uso de tecnologías como respuesta para conocer y construir modelos de evolución geomorfológicas de las costas (Pazmiño-Zabala *et al*., 2020). De acuerdo con los resultados el municipio, no cuenta con un sistema de información geográfica ni con estaciones meteorológicas que ayuden a complementar los datos.

Indicador clave 17. Gestión Integral de riesgo costero: Indicador de respuesta institucional, que representa la importancia de contar con fondos de inversión específicos para la atención de emergencias y desastres causados por la erosión costera, para prevenir y reducir las vulnerabilidades. De acuerdo con los resultados el municipio de Solidaridad, no cuenta con fondos específicos, en ninguno de los niveles (municipales, estatales y federales), para reducir y enfrentar los daños causados por erosión costera.

Indicador clave 18. Fondos de ahorro: Indicador de respuesta social que determina la capacidad de la población para contar con un seguro que responda ante posibles riesgos o siniestros, este indicador refleja que el 64% de los comercios y locales se encuentran asegurados.

Tabla 2. Resumen del estado de los indicadores de resiliencia ante la erosión costera de playas de uso turístico.

Variable	Dimensión		Indicador	Tipo	Resultado	Línea de acción sugerida
Amenaza	Erosión costera	E	Presencia de escarpes	Cl	Presencia	Realizar estudios de geomorfología de playas para conocer las tasas de erosión / acreción
Vulnerabilidad	Social	E	Cohesión social	Ct	88%	Fortalecer la cohesión social desde el ámbito institucional
		R	Participación ciudadana	Ct	20%	Desarrollar estrategias y mecanismos informativos de los instrumentos de planeación y manejo de zonas costeras para incrementar la participación ciudadana
		E	Percepción del riesgo	Ct	32%	Generar conciencia e implementar mecanismos de identificación de riesgos
	Técnica	R	Mecanismos de planificación	Cl	33%	Fortalecer a las instituciones con enfoque en el conocimiento de la erosión costera
		E	Desestabilización de cimientos	Ct	32%	Implementar medidas para la reducción y mitigación de daños causados por el oleaje en la infraestructura turística, promover la construcción de infraestructura adecuada.
		E	Accesibilidad a la playa	Ct	76%	Realizar medidas de mitigación, prevención o recuperación de playas en las zonas estrechas
		E	Infraestructura adecuada	Cl	Concreto/ madera	Promover la construcción de infraestructura adecuada
	Cultural	E	Área suficiente para la recreación	Ct	76%	Promover el cuidado y uso de buenas prácticas para evitar procesos erosivos
		R	Arraigo	Ct	64%	Fortalecer el sentido de arraigo en los prestadores de servicio por medio de la transmisión del conocimiento
	Ecológica	E	Cobertura vegetal de playas	Cl	Ausencia	Restaurar la cobertura vegetal con plantas nativas
		E	Calidad de arena	Ct	Sin información	Realizar estudios para la identificación de la composición de las arenas
	Económica	R	Recursos de inversión	Cl	25%	Desarrollar, implementar y fortalecer programas articulados entre los diferentes niveles municipal, estatal y federal
	Institucional	R	Normatividad	Cl	Sin información	Implementar los criterios de la Política Nacional de Mares y Costas Mexicana y promover la Ley General de Costas Mexicanas
		R	Identificación del riesgo	Cl	Ausencia	Considerar a la erosión costera como una amenaza e incluirla en las herramientas de gestión del territorio
Capacidad Adaptativa	Institucional	R	Uso de tecnologías	Cl	Ausencia	Establecer sistemas de información geográfica en las zonas costeras
	Social	R	Gestión integral de riesgo costero	Cl	Ausencia	Promover la profesionalización de las instituciones en materia de identificación y gestión del riesgo
	Economica	R	Fondos de ahorro	Cl	Ausencia	Contar con un fondo específico de atención y recuperación

Recorrido de campo Entrevista Encuesta
CL=Cualitativo CT=Cuantitativo

Fuente: Elaborado con base en entrevistas.

Conclusiones

La función de los indicadores de resiliencia tiene por objetivo ser una herramienta que permita visualizar las áreas de oportunidad y metas a futuro, es decir, la planeación a corto, mediano y largo plazo, además de permitir análisis comparativos en el tiempo y espacio.

El uso de las fichas técnicas de indicadores proporciona información relevante para la toma de decisiones y sirve para anticipar situaciones de riesgo o conflicto. Por medio de la ficha de corte presentada en esta investigación y las fichas técnicas es posible monitorear la gestión de las playas.

Los indicadores y fichas técnicas nos permiten reconocer cuáles son los principales actores que intervienen en cada variable, por lo tanto, este tipo de estudios fortalecen los procesos de gobernanza.

Los factores que intervienen en la resiliencia de las playas de uso turístico ante la amenaza de erosión costera son:

- ***Ambientales***: presencia de escarpes, cobertura vegetal de playas, calidad de la arena.
- ***Sociales***: cohesión social, participación ciudadana, percepción del riesgo y gestión integral del riesgo costero.
- ***Institucionale***s: normatividad e identificación del riesgo y uso de tecnologías.

Es importante mencionar que, de acuerdo con los hallazgos de esta investigación, además de los factores descritos anteriormente, existen factores técnicos, culturales y económicos que contribuyen al reconocimiento de la resiliencia en un sistema de playas de uso turístico:

- ***Factores técnicos***: mecanismos de planificación, desestabilización de cimientos, accesibilidad a la playa e infraestructura adecuada.
- ***Culturales***: área suficiente para recreación y arraigo.
- ***Económicos***: recursos de inversión y fondos económicos.

La batería de indicadores propuesta se aplicó en un 88%. Calidad de arena y normatividad no cuentan con información.

» Referencias bibliográficas

Acosta-Salas, H. D. (2018). *Propuesta de soluciones adaptativas para el hábitat aplicable al impacto del cambio climático en Cuba*. Título [Trabajo de diplomado]. Universidad Central "Marta Abreu". https://dspace.uclv.edu.cu/items/6dc36f3d-1619-431a-a4fe-9ac42b5c1317

Aldana, P. G., Ramírez Camperos, A., Godínez Orta, L., Cruz León, S., & Juárez León, A. (2009). Estudio de la erosión costera en cancún y la riviera maya, méxico. *Avances En Recursos Hidráulico*, 20. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/28457

Altimira-Vega, R., Ximena, Y., & Vivas, M. (2007). *El turismo como motor de crecimiento económico. Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 40, 677–710. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2267966

Ariza, E., Lindeman, K. C., Mozumder, P., & Suman, D. O. (2014). Beach management in Florida: Assessing stakeholder perceptions on governance. *Ocean & Coastal Management*, 96, 82–93. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.033

Aronson, J., Blignaut, J. N., Milton, S. J., & Clewell, A. F. (2006). Natural capital: The limiting factor. *Ecological Engineering*, 28(1), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.05.012

Aronson, J., Renison, D., Rangel-Ch., J. O., Levy-Tacher, S., Ovalle, C., & Pozo, A. Del. (2007). Restauración del Capital Natural: sin reservas no hay bienes ni servicios. *Ecosistemas*, 16(3), 15-24. https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/89

Barragán, J. M., & de Andrés, M. (2016). Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 129–149. https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200009

Botero, C., Cabrera, J. A., & Perea, A. R. (2012). Las playas dentro del Manejo Integrado Costero. In A. Rodríguez-Perea, G. x. Pons, R. X. Roig-Munar, l. Á. Martín-Prieto, M. Mir-Gual, & J. A. Cabrera (Eds.), *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en latinoamerica y europa* (Vol. 19, pp. 17–31). Secretaría de historia natural de les Balears. www.plpyascol.com.

Botero, C., Pereira, C., Tosic, M., & Manjarrez, G. (2015). Design of an index for monitoring the environmental quality of tourist beaches from a holistic approach. *Ocean & Coastal Management*, 108, 65–73. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.07.017

Carpenter, S., Arrow, K., Barrett, S., Biggs, R., Brock, W., Crépin, A.-S., Engström, G., Folke, C., Hughes, T., Kautsky, N., Li, C.-Z., McCarney, G., Meng, K., Mäler, K.-G., Polasky, S., Scheffer, M., Shogren, J., Sterner, T., Vincent, J., … Zeeuw, A. (2012). General Resilience to Cope with Extreme Events. *Sustainability*, 4(12), 3248–3259. https://doi.org/10.3390/su4123248

Castillo-Villanueva, L., & Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 17(2), 11–32. https://quivera.uaemex.mx/article/view/9811

Cervantes-Rosas, O. D. (2008). *Diseño de un índice integral (VIP) para evaluar playas recreativas* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas. https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/9661

Cohen, O., Goldberg, A., Lahad, M., & Aharonson-Daniel, L. (2017). Building resilience: The relationship between information provided by municipal authorities during emergency situations and community resilience. *Technological Forecasting and Social Change*, 121, 119–125. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.11.008

Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 29, 65–77. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18(4), 598–606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013

Delgado-Linero, M. G. (2016). *Migración, crecimiento poblacional y mercado laboral en Playa del Carmen entre 1995 y 2015* [Tesis de Maestría] Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. https://flacso.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1026/94

Enseñat-Soberanis, F. (2019). *La gestión del visitante en zonas arqueológicas turistificadas de la Península de Yucatán: Hacia un uso publico sustentable a través de indicadores* [Tesis de doctorado] Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/2429

Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Castillo-Campos, G., P. Garcillán, P., Álvarez, L., Castillo-Argüero, S., Durán, R., Ferrer, M., Infante-Mata, D., Iriarte, S., León de la Luz, J. L., López-Rosas, H., Medel Narváez, A., Monroy, R., Moreno-Casasola, P., P. Rebman, J., Rodríguez-Revelo, N., Sánchez-Escalante, J., & Vanderplank, S. (2017). Flora en playas y dunas costeras de México. *Acta Botanica Mexicana*, 121, 39–81. https://doi.org/10.21829/abm121.2017.1290

Frausto, O., Vazquez, A., Arroyo, L., Castillo, L., & Hernández, M. L. (2016). Hurricane resilience indicators in mexican caribbean coastal cities. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(4), 755–763. https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N4-755-763

Frausto-Martínez, O., Chalé-Caamal, G., & Rojas-López, J. (2005). Herramientas y técnicas para la aplicación y evaluación de indicadores de desarrollo sustentable para las localidades o municipios. *Turismo:Teoria y Praxis*, 86–89.

Frausto-Martínez, O., & Colín-Olivares, O. (2019). Indicadores de Sustentabilidad de la Política de Mares y Costas -México. *Revista Costas*, 1(2), 41–58. https://doi.org/10.26359/costas.0203

Frausto-Martínez, O., Tun-Chim, J., Colín-Olivares, O., Vázquez-Sosa, A., Dzul-Pech, R., Isla-Garcia, R., Hernández-Aguilar, M. L., Campos-Vargas, M., Arroyo-Arcos, L., & Palacio-Aponte, G. (2018). Perfil de resiliencia urbana de la isla de Cozumel, México. Antrópica. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(8), 215–237. https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/113

Hernández Aguilar, María Luisa. (2014). *Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de huracanes en zonas costeras del Caribe Mexicano: Chetumal y Mahahual* [Tesis de doctorado] en Geografía. Universidad de Quintana Roo, México. http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/1/browse?type=author&value=HERNANDEZ+AGUILAR%2C+MARIA+LUISA

Hurtado-García, Y. P. (2010). *Determinación de un modelo de medición de capacidad de carga en playas turísticas de uso intensivo como herramienta para el manejo integrado costero. Aplicación en la playa El Rodadero (Santa Marta, Colombia)* [Tesis de Maestría] Universidad de Magdalena]. http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/3161

Jiménez, J. A., Valdemoro, H. I., Bosom, E., Sánchez-Arcilla, A., & Nicholls, R. J. (2017). Impacts of sea-level rise-induced erosion on the Catalan coast. *Regional Environmental Change*, 17(2), 593–603. https://doi.org/10.1007/s10113-016-1052-x

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., & Martínez, M. L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), 486–507. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.022

Kreibich, H., Di Baldassarre, G., Vorogushyn, S., Aerts, J. C. J. H., Apel, H., Aronica, G. T., Arnbjerg-Nielsen, K., Bouwer, L. M., Bubeck, P., Caloiero, T., Chinh, D. T., Cortès, M., Gain, A. K., Giampá, V., Kuhlicke, C., Kundzewicz, Z. W., Llasat, M. C., Mård, J., Matczak, P., … Merz, B. (2017). Adaptation to flood risk: Results of international paired flood event studies. *Earth's Future*, 5(10), 953–965. https://doi.org/10.1002/2017EF000606

Lucrezi, S., Saayman, M., & Van der Merwe, P. (2016). An assessment tool for sandy beaches: A case study for integrating beach description, human dimension, and economic factors to identify priority management issues. *Ocean & Coastal Management*, 121, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.12.003

Lugo-Hubp, J. (2011). *Diccionario geomorfológico* (1ª ed., Vol. 7). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez-Flores, V., Romo-Aguilar, Ma. de L., & Córdova-Bojórquez, G. (2015). Participación ciudadana y planeación del ordenamiento territorial en la frontera norte de México. *Espiral Estudios Sobre Estado y Sociedad*, 22(64), 189–220. https://doi.org/10.32870/espiral.v22i64.2923

Milanés-Batista, C., Chávez, I., Meza-Estrada, C., & Cermeño, R. (2018). *NUEVOS INSTRUMENTOS PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE PLAYAS APLICADOS EN CUBA*.

Moreno-Casasola, P., & Vázquez, G. (2006). Las comunidades de las dunas. In P. Moreno-Casasola (Ed.), *Entornos Veracruzanos: La Costa de la Mancha* (Primera Edición, pp. 285–310). Instituto de Ecología, A.C.

Newell, P. (2005). Citizenship, accountability and community: the limits of the CSR agenda. *International Affairs*, 81(3), 541–557. https://doi.org/10.1111/j.1468-2346.2005.00468.x

Ojeda-Rosero, D. E., & López-Vázquez, E. (2017). Relaciones intergeneracionales en la construcción social de la percepción del riesgo. *Desacatos. Revista de Ciencias Sociales*, 54, 106. https://doi.org/10.29340/54.1743

Ojeda-Zújar, J., Álvarez-Francoso, J. I., Martín-Cajaraville, D., & Fraile-Jurado, P. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del indice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 9, 4. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3040454&info=resumen&idioma=ENG

OMT. (2018). *El primer tablero de datos global para analizar el turismo*. Dashboard de Datos Turísticos de La OMT. https://www.unwto.org/es/omt-dashboard-datos-turisticos

Pazmiño-Zabala, C. A., Serrano-Castro, A. K., & Gonzáles-Rivera, M. M. (2020). Las Tics como herramienta para la gestión de riesgos. *Revista Científica Mundo de La Investigación y El Conocimiento*, 4(1), 173–181. https://doi.org/https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(1).esp.marzo.2020.173-181

Pennetta, M., Corbelli, V., Esposito, P., Gattullo, V., & Nappi, R. (2011). Environmental Impact of Coastal Dunes in the Area Located to the Left of the Garigliano River Mouth (Campany, Italy). *Journal of Coastal Research*, 61, 421–427. https://doi.org/10.2112/SI61-001.52

Peralta, E. (2016). Teoría general de los sistemas aplicada a modelos de gestión. *Aglala*, 7(1), 122–146. https://doi.org/10.22519/22157360.901

Pérez-Marmolejo, L. (2017). *Identificación de riesgo ambiental del posible desbordamiento del río Cauca sobre el nororiente de la ciudad de Santiago de Cali* [Trabajo de grado]. Universidad Militar Nueva Granada.

Raskin, P. D. (2008). World lines: A framework for exploring global pathways. *Ecological Economics*, 65(3), 461–470. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.021

Rincón-Zárate, U. A. (2021). Fenomenología de la inmigración: frontera, territorialización, desplazamiento y sentido de pertenencia. *REMHU: Revista Interdisciplinar Da Mobilidade Humana*, 29(61), 241–256. https://doi.org/10.1590/1980-85852503880006114

Sánchez-Mazo, L. M. (2007). Fragmentación social y planeación territorial. *Bitácora Urbano Territorial*, 11(1), 28–39. https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/18629

Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., Gómez-Mendoza, L., Terán-Cuevas, Á. R., & Hernández, J. C. M. (2021). Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin and Yucatan Peninsula, Mexico: Identification of Extreme Events. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(2), 145–160. https://doi.org/10.18280/ijdne.160204

Semeoshenkova, V., Newton, A., Rojas, M., Piccolo, M. C., Bustos, M. L., Huamantinco Cisneros, M. A., & Berninsone, L. G. (2017). A combined DPSIR and SAF approach for the adaptive management of beach erosion in Monte Hermoso and Pehuen Co (Argentina). *Ocean & Coastal Management*, 143, 63–73. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.04.015

Soares, J. C., Gandara, J. M., & Ivars Baidal, J. (2012). Indicadores para analizar la evolución del ciclo de vida de los destinos turísticos litorales. *Investigaciones Turísticas*, 3, 19-38. https://doi.org/10.14198/INTURI2012.3.02

Ungar, M. (2011). Community resilience for youth and families: Facilitative physical and social capital in contexts of adversity. *Children and Youth Services Review*, 33(9), 1742–1748. https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2011.04.027

Urquiza-Gómez, A., & Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire Des Amériques*, 218. https://doi.org/10.4000/orda.1774

Vázquez-Sosa, A. B. (2020). *Manejo Integrado de la Zona Costera de Akumal, en el Caribe Méxicano: Una propuesta para su Desarrollo Sostenible* [Tesis de Doctorado] Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo]. http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/2430

Walker, B. H., Anderies, J. M., Kinzig, A. P., & Ryan, P. (2006). Exploring Resilience in Social-Ecological Systems Through Comparative Studies and Theory Development: Introduction to the Special Issue. *Ecology and Society*, 11(1), art12. https://doi.org/10.5751/ES-01573-110112

Xie, W., Rose, A., Li, S., He, J., Li, N., & Ali, T. (2018). Dynamic Economic Resilience and Economic Recovery from Disasters: A Quantitative Assessment. *Risk Analysis*, 38(6), 1306–1318. https://doi.org/10.1111/risa.12948

Zabala-Forero, F. A., & Victorino, I. (2019). Capacidad adaptativa y vulnerabilidad de la cuenca del río Orotoy ante el cambio climático, a partir del análisis de las variables de los medios de vida. *Biodiversidad En La Práctica*, 4, 51–85. https://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/672

5

5.1 Bienestar sostenible ante desastres

Gabriela Suárez González
Universidad Veracruzana, México

María Isabel Hernández Sánchez
El Colegio de Veracruz, México

Palabras Clave: bienestar sostenible, desastres, vulnerabilidad.
ODS: 12 y 13 Producción y Consumo Responsable y Acción por el Clima.

Introducción

La economía ecológica se considera un campo transdiciplinario en el que convergen el estudio y gestión del sistema de los seres humanos y el resto de la naturaleza; ésta reconoce que existe una realidad biofísica independiente de los seres humanos y la necesidad de crear una sociedad justa y equitativa centrada en el bienestar sostenible (Costanza *et al*., 2020), Según Costanza & Farley (2007), el bienestar se genera con la producción de bienes y servicios de mercado, por las redes y normas sociales, por el conocimiento y la salud, pero también por los bienes y servicios que produce la naturaleza. En otras palabras, lo que genera bienestar son los capitales económico, social, humano y natural.

El bienestar puede llegar a ser sostenible si cuenta con tres características esenciales: 1) una asignación eficiente (que alcance para todos, en el presente y el futuro), una distribución justa (equitativa) y a una escala sostenible (permanecer dentro de los límites del planeta); de hecho, el bienestar sostenible debe ser el objetivo general de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Costanza *et al*., 2014).

Sin embargo, el bienestar puede verse amenazado por diversos factores, entre ellos el cambio climático, que produce impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. De 1950 a la fecha, diversas regiones del planeta han experimentado un incremento de las temperaturas cálidas extremas y el número de precipitaciones intensas, disminución de las temperaturas frías extremas y elevación de los niveles máximos del mar, que hacen evidente la vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática (IPCC, 2014).

Cuando se combinan estos eventos con la vulnerabilidad y exposición de los sistemas humanos y naturales, se produce un desastre (IPCC, 2014), situación que plantea un riesgo para el logro de los ODS (UNDRR, 2019) y, por ende, para la consecución del bienestar sostenible.

Por lo anterior, el estudio plantea investigar cómo se relacionan los desastres y el bienestar sostenible. Cabe mencionar que dicha relación no ha sido explorada de manera integral en la literatura existente, de ahí la importancia del trabajo. No obstante, Hochrainer-Stigler (2009) evaluó los impactos de los desastres en el capital económico, señaló como una brecha de conocimiento el estudio de los impactos de los desastres en el capital humano y ambiental, así como sus repercusiones económicas, tanto de forma aislada como en conjunto con el capital producido. En un intento

por cubrir esta brecha, Döpke & Maschke (2016) examinaron si otras medidas de bienestar alternativas al producto interno bruto (PIB) se veían afectadas por desastres; por su parte, Markhvida *et al*. (2020) cuantificaron los impactos de los desastres, en el escenario de un terremoto, integrando los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental (amenazas y daños a los activos), económico (cambios macroeconómicos en la producción y el empleo) y social (recuperación de desastres a nivel de los hogares).

En este contexto, el objetivo del presente es analizar la relación que existe entre los desastres, asociados a distintas amenazas, y el bienestar sostenible, mediante una revisión de la literatura. El documento se compone de cuatro apartados, en el primer apartado se realiza una revisión del concepto de bienestar sostenible. En el segundo, se describen los capitales que lo conforman. En el tercero, se analizan los impactos sobre los capitales ante un desastre, principalmente aquellos de origen hidrometeorológico. Finalmente, en el cuarto apartado se presentan las conclusiones.

Bienestar Sostenible

Estudiar el bienestar es introducirse en un término que requiere un adjetivo para mejorar su comprensión, por sí mismo se asocia con algo que parece bueno. Helne & Hirvilammi (2015) señalan que todo ser humano lo reconoce y desea alcanzarlo en su vida; siempre está relacionado con la satisfacción de necesidades y la forma en que éstas se satisfacen tiene consecuencias sociales y ecológicas inevitables. En gran parte de la literatura se asume que los sistemas económicos contribuyen al bienestar del ser humano mediante la producción de bienes y servicios, sin embargo, la producción requiere insumos que generan efectos negativos en los sistemas sociales y ecosistemas (Cracolici *et al*., 2018).

Pearce (1991) fue pionero en el uso del concepto de bienestar sostenible, manifestó que el desarrollo sostenible tiene capitales base, como aquel creado por el hombre como las máquinas o carreteras; el capital humano, como el conocimiento y la salud; y el capital natural, como las especies, la selva monzónica o la capa de ozono. En la misma línea, Anielski (2001) asoció el bienestar sostenible con el bienestar total de una sociedad, su economía y la naturaleza; consideraba que tener una calidad de vida alta y un estilo de vida sostenible dependen de aspectos como la salud personal, la cohesión social, el capital intelectual, la prosperidad económica, la sostenibilidad del capital natural y un medio ambiente sano.

El bienestar sostenible debe implicar una mejora en los aspectos económicos y no económicos de la vida del ser humano, sin representar una carga para el medio ambiente (Cracolici *et al*., 2018). De hecho, Ronen & Kerret (2020) señalan que se alcanza cuando la mejora del bienestar individual se correlaciona con la mejora del bienestar de otros miembros de la sociedad y del entorno natural.

El logro del bienestar sostenible requiere un equilibrio entre activos naturales, humanos, sociales y culturales que debe cumplir con tres características: 1) la sostenibilidad ecológica, que implica reconocer que el planeta y sus recursos son finitos para todas las generaciones; 2) la equidad social, que significa una distribución equitativa entre humanos y especies, inter e intrageneracional; y 3) la asignación eficiente, que se refiere al uso eficiente de los recursos finitos (Costanza, 2013).

Para Bakar *et al*. (2015), el bienestar sostenible corresponde al logro del bienestar sin comprometer las capacidades de los “demás” para lograr su propio bienestar. Los "demás" hacen referencia a la sociedad actual, la generación futura y el entorno. Para estos autores, alcanzar este bienestar depende del ser humano y de la naturaleza.

Algo que tienen en común todas las aproximaciones al concepto de bienestar sostenible es que 1) consideran la existencia de varios tipos de capitales, 2) hacen referencia a un equilibrio entre los mismos, y 3) los capitales deben emplearse para la satisfacción de la generación actual, al mismo tiempo que se deben conservar para satisfacer las nece-

sidades de las generaciones futuras. Por lo tanto, se considera bienestar sostenible a un estado de equilibrio en el uso y disfrute sobre los capitales (humano, construido, social y natural) para satisfacer las necesidades humanas; es indispensable que se conserven o incrementen estos capitales para que las generaciones futuras obtengan bienestar.

Los capitales del bienestar sostenible

En la literatura se identifican por lo menos dos tipos de capital: el natural y el creado por el hombre, que es el artificial. Esta división, aunque pudiera parecer simplista, resulta pertinente, pues todo lo que no es naturaleza ha sido generado por el ingenio del ser humano. El capital natural y el artificial se complementan y, en muy pocos casos, uno sustituye al otro, por ejemplo: para producir un mueble de madera, se requiere cierta cantidad de madera (capital natural), herramientas y mano de obra (capital creado por el hombre), si se altera la combinación de capitales, con más herramientas y menos cantidad de madera, no se genera de manera satisfactoria el producto deseado (Daly, 1990; Martínez-Alier & Roca-Jusmet, 2013).

Algunos autores identifican tres tipos de capital: manufacturado, humano y natural (Costanza & Daly, 1992) o económico, social y natural (Costanza *et al*., 2016) y establecen una correspondencia con los factores de producción en economía: tierra, trabajo y capital, respectivamente. Otros más, como Vemuri & Costanza (2006), hacen referencia a cuatro tipos de capital: humano, social, construido y natural, e indicaron que un equilibrio entre estos capitales puede generar bienestar individual y comunitario; World Bank (2006) menciona al capital producido, natural, humano e institucional en sus estimaciones de riqueza y sostuvo que la combinación en el uso de estos capitales contribuye al bienestar o malestar de las personas.

Costanza *et al*. (2007) proporcionan una definición de los cuatro capitales. El capital social se constituye por las redes y normas que facilitan la acción cooperativa, haciendo referencia al trabajo de Putnam *et al*. (1993); el capital humano es el conocimiento y la información que se encuentran almacenados en los cerebros, así como el trabajo ; el capital construido lo conforman los bienes manufacturados (herramientas, equipos, edificios, etc.); y el capital natural se integra por los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas, como en Costanza & Daly (1992).

Costanza (2013) también hace referencia a cuatro tipos de capital, con la variante de que al capital social se le denomina "social y cultural". Este autor manifiesta que al capital natural lo constituye el entorno y su biodiversidad, el cual proporciona al ser humano bienes y servicios ecosistémicos cuando se combina con los otros capitales; el capital social y cultural se conforma por las redes, la confianza, el conocimiento y la cooperación entre las personas; el capital humano comprende los individuos y sus atributos, su salud física y mental, conocimientos y capacidades; y, finalmente, el capital construido corresponde a los artefactos y servicios creados por el humano que satisfacen sus necesidades básicas (edificios, maquinaria, etc.).

Considerando las bases teóricas del bienestar sostenible, este estudio parte de la existencia de cuatro tipos de capitales: humano, construido, social y natural. Cada capital posee una forma distinta de medirse, incluso algunos autores emplean variables proxys, por ejemplo: el capital natural se puede estimar a través de los servicios ecosistémicos culturales, de provisionamiento y regulación (Sangha *et al*., 2019); el capital social, a través de la sociedad en aspectos de colectivismo y confianza (Turner *et al*., 2016); y el capital humano y construido puede ser medido a través de herramientas, equipos, red carretera, edificaciones, conocimiento, salud física y fuerza laboral (Turner *et al*., 2016).

Cabe mencionar que los cuatro tipos de capitales que integran el bienestar sostenible satisfacen necesidades, a partir de las oportunidades que tenga el ser humano para acceder a estos (Costanza *et al*., 2007). Para conocer el nivel de bienestar sostenible de

una región o país se requiere desarrollar una medida que integre valores de los capitales que lo conforman. Particularmente, la meta 17.19 de los ODS señala que se deben aprovechar las iniciativas para elaborar indicadores que permitan medir los progresos, y que complementen el producto interno bruto Naciones Unidas (2022). No obstante, no todos los países y regiones producen información para todos los indicadores y años, lo cual puede resultar una limitante para las estimaciones del bienestar sostenible.

Impactos de los desastres en los capitales

Un desastre es una perturbación severa en el funcionamiento de sociedad o comunidad, que, independientemente de su escala, es ocasionado por la interacción de un evento peligroso con las condiciones de exposición y vulnerabilidad, que conducen a pérdidas e impactos materiales, económicos, ambientales y en vidas humanas (IPCC, 2019).

Un evento peligroso o peligro puede afectar diferentes sitios, con distintos grados de intensidad (Blaikie *et al*., 1996), por ejemplo, un sismo, un ciclón tropical o una pandemia (como la ocasionada en 2020 por el SARS-CoV-2). Un peligro es:

> la ocurrencia potencial de un evento o tendencia física natural o inducida por el hombre que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios, los ecosistemas y los recursos ambientales. (IPCC, 2019).

La exposición, por su parte, se refiere a la presencia de seres humanos, especies o ecosistemas; sus activos, bienes y servicios en lugares y entornos que podrían verse afectados; mientras que la vulnerabilidad es una condición de predisposición a padecer daño o ser afectado de manera negativa (IPCC, 2019).

La vulnerabilidad se clasifica en diversos tipos, dependiendo del autor, algunos sólo identifican la social (Cutter *et al*., 2003; Soares *et al*., 2015); Cardona (1993) la divide en vulnerabilidad técnica y social; Kumpulainen (2006) reconoce tres tipos de vulnerabilidad: la económica, la social y la ecológica; mientras que Wilches-Chaux (1989) la clasifica en once: natural, física, ecológica, económica, social, política, ideológica, institucional, cultural, educativa y técnica.

Para alcanzar el bienestar sostenible se requiere atender las vulnerabilidades del sistema humano y los ecosistemas, no es casualidad que las variables cuantitativas y cualitativas que se usan en la construcción de índices de vulnerabilidad sean las mismas que evalúan a los capitales del bienestar sostenible. La vulnerabilidad es conocida y es visible, sólo que cambia de nombre, se le llama índice de pobreza, inseguridad, feminicidios, esperanza de vida, producto interno bruto (PIB) *per cápita*, analfabetismo, cambio de uso de suelo, etc. Lo anterior se evidencia en estudios sobre vulnerabilidad, como el de Soares *et al*. (2015), que emplean entre sus indicadores los años promedio de escolaridad de la población; Barro & Lee (1993) y World Bank (2018) también utilizan los años promedio de escolaridad para medir el capital humano. Cutter *et al*. (2003) emplean el porcentaje de participación (votos) en elecciones presidenciales y el número de fábricas como indicadores del capital social (Nguyen *et al*., 2016) y el capital construido (Kauling *et al*., 2018), respectivamente. Wilches-Chaux (1989), para referirse a la vulnerabilidad ecológica, usa indicadores como la superficie de manglares, mismos que emplean Fairbrass *et al*. (2020) y C. Zhang *et al*. (2019).

Debido a las condiciones climáticas cambiantes y la degradación ambiental, los desastres relacionados con el clima se han vuelto más frecuentes (Bettin & Zazzaro, 2018). De 1950 al 2021, más del 63% de los desastres ocurridos en todo el mundo están relacionados con fenómenos de origen natural; Asia es el continente más afec-

tado, seguido de América, donde los eventos más frecuentes son los hidrológicos y los meteorológicos. Según la clasificación de la base de datos internacional sobre desastres (EM-DAT), los desastres hidrológicos (particularmente las inundaciones y deslaves) son los eventos más frecuentes (40.34%), seguidos de los desastres meteorológicos (tormentas, niebla y temperaturas extremas) (31.71%) y los geofísicos y biológicos con poco más del 10%, respectivamente. Los desastres climáticos, que incluyen sequías e incendios forestales, representan sólo 7.73% (Tabla 1) (CRED & UCLouvain, 2022).

Tabla 1. Frecuencia de los desastres asociados a fenómenos naturales (1950-2021).

Continente	Subgrupo de desastre											
	Biológicos		Climatológicos		Extraterrestres		Geofísicos		Hidrológicos		Meteorológicos	
	Frec.	%	Frec.	%	Frec.	%	Frec.	%	Frec	%	Frec.	%
África	948	6.08	353	2.26			93	0.60	1208	7.75	309	1.98
América	178	1.14	333	2.14			364	2.33	1445	9.27	1486	9.53
Asia	368	2.36	278	1.78			864	5.54	2723	17.46	2008	12.88
Europa	47	0.30	165	1.06	1	0.01	178	1.14	735	4.71	806	5.17
Oceanía	29	0.19	76	0.49			84	0.54	179	1.15	336	2.15
Total	1570	10.07	1205	7.73	1	0.01	1583	10.15	6290	40.30	4945	31.71

Fuente: Elaboración propia con datos de CRED & UClouvain (2022).

Los fenómenos naturales producen impactos en los sistemas humanos y ecosistemas, que, de acuerdo con el IPCC (2019), son las consecuencias del desastre. Estos impactos hacen referencia a: los efectos sobre las vidas, los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, los activos económicos, sociales y culturales, los servicios (incluidos los servicios de los ecosistemas) y la infraestructura. Los impactos pueden denominarse consecuencias o resultados, y pueden ser adversos o beneficiosos.

La literatura muestra evidencia sobre los efectos adversos y beneficiosos de los desastres asociados a fenómenos naturales en cada uno de los cuatro capitales que conforman el bienestar sostenible (Tabla 2). De esta manera, se encuentran estudios que demuestran que el capital humano permite al individuo resistir ante un desastre o hacerle frente. Skidmore & Toya (2002) obtuvieron evidencia que indica que los desastres climáticos tienen un efecto positivo en la inversión en capital humano, el crecimiento de la productividad total de los factores y el crecimiento económico a largo plazo, contrario a los desastres geológicos. Yamauchi *et al.* (2009) mostraron que la acumulación de capital humano biológico, como la salud y nutrición, previa al desastre ayuda a los infantes a mantener sus inversiones en este capital posterior al desastre. Hochrainer-Stigler (2015) encontró que en sociedades con mayor nivel educativo las tasas de crecimiento económico eran más altas después de desastres, las cuales contrastan con sociedades con bajo nivel educativo y que serán más susceptibles a padecer los efectos a largo plazo ante un evento de desastre. Al-Maruf (2017) presenta evidencia empírica para afirmar que el capital humano realiza una contribución significativa y positiva a la resiliencia ante desastres a nivel hogar. Zhang & Ruan (2020) hallaron que una mayor frecuencia de desastres naturales (por sequías e inundaciones, principalmente) se correlacionan con tasas más altas de acumulación de capital humano intergeneracional en China, situación que obedece a la cultura de educación que predomina en dicho país.

En cuanto a los efectos adversos de los desastres en el capital humano, Cuaresma (2010) evidenció un efecto negativo de los desastres naturales en las tasas de inscripción en la escuela secundaria. Mientras que McDermott (2012) determinó

que los desastres tienen importantes consecuencias para la acumulación de capital humano al identificar efectos directos (como resultado de una combinación de lesiones, enfermedades y muertes originadas por el desastre) e indirectos, por ejemplo, en las tasas de escolarización, los cuales dependen de la capacidad de las familias para acceder a fuentes de financiamiento y en la salud, donde los flujos de ayuda contribuyen a su mitigación. Paudel & Ryu (2018) analizaron el impacto a largo plazo de un terremoto en los resultados educativos entre los niños afectados de las zonas rurales de Nepal, mostraron que los bebés nacidos en zonas muy afectadas tienen menos probabilidades de completar la escuela primaria y secundaria. Valencia-Amaya (2020) determinó que los desastres disminuyeron los resultados de las pruebas de conocimiento de los estudiantes, y que el impacto fue mayor para las mujeres estudiantes de localidades rurales y de bajos ingresos.

Tabla 2. Efectos de los desastres en los capitales del bienestar sostenible.

Capital	Efectos beneficiosos	Efectos adversos
Humano	• Genera inversión en este capital. • Altas tasas de acumulación de este capital. • Crecimiento de la productividad total de los factores. • Crecimiento económico a largo plazo. • La acumulación de capital humano biológico (salud y nutrición) ayuda a mantenerlo posdesastre. • Contribuye a la resiliencia.	• Disminución en las tasas de inscripción en la escuela secundaria. • Disminución de las tasas de escolarización. • Lesiones, enfermedades y muertes. • Disminución en los resultados de las pruebas de conocimiento de los estudiantes, sobre todo a las mujeres estudiantes de localidades rurales y de bajos ingresos.
Construido	• Destrucción creativa: permite renovar infraestructura económica y de servicios. • Mayor PIB a corto y largo plazo si destruye bienes duraderos.	• Destrucción y daños de infraestructura económica y de servicios.
Social	• Es efectivo para prevenir desastres. • Subsana los vacíos gubernamentales. • Incrementa ante una mayor asistencia del gobierno.	• Afectan la confianza social. • Se detiene el crecimiento de este capital.
Natural	• Pueden contribuir a la resiliencia si se incluyen en el plan de recuperación.	• Presión antropogénica sobre los bosques. • Daños severos a manglares.

Fuente: Elaboración propia con datos de Albrecht (2018), Al-Maruf (2017), Cuaresma (2010), FAO (2015), Hochrainer-Stigler (2015), Inzulza-Contardo & Díaz Parra (2016), Loayza et al. (2012), Mabon (2019), McDermott (2012), Paudel & Ryu (2018), Sangha et al. (2020), Skidmore & Toya (2002), Strulik & Trimborn (2019), Toscana-Aparicio & Fernández-Poncela (2017), Valencia-Amaya (2020), Wang & Ganapati (2018), Yamamura (2010), Yamauchi et al. (2009), C. Zhang et al. (2019), Zhang & Ruan (2020).

Respecto al capital construido, los efectos adversos son más evidentes, en particular, la destrucción y daños de infraestructura económica y de servicios es inmediata. Generalmente los estudios sobre las afectaciones de desastres tienden a valuar las pérdidas en la moneda de la nación afectada o, si se trata de un estudio internacional, se valúan en dólares. Sin embargo, la literatura muestra algunos efectos beneficiosos, por ejemplo, bajo la lógica de destrucción creativa, Loayza *et al.* (2012) e Inzulza-Contardo & Díaz Parra (2016) indican que los desastres juegan un papel clave. Asimismo, Strulik & Trimborn (2019) hallaron que si el desastre destruye bienes duraderos (electrodomésticos, muebles o vehículos) conducen a un mayor PIB a corto y largo plazo.

En lo que concierne al capital social, Yamamura (2010) observó que el capital social reduce los daños que ocasionan los desastres y que el riesgo de un desastre por fenómenos naturales hace que las personas sean más aptas para cooperar, es decir, el capital social es más efectivo para prevenir desastres. Del mismo modo, Toscana-Aparicio & Fernández-Poncela (2017) señalan que el capital social puede llenar los vacíos gubernamentales ante un desastre. Otros estudios, como el de Albrecht (2018), postulan que los desastres pueden afectar la confianza social, quien descubrió que la gravedad de un desastre es un factor determinante que impacta en la confianza social.

Identificó que nueve defunciones o más se asocian con una disminución de la confianza social después de un desastre. Finalmente, Wang & Ganapati (2018) sostienen que los desastres frenan el crecimiento del capital social, pero que se incrementa ante una mayor asistencia del gobierno.

El capital natural también puede verse afectado de manera adversa por los desastres, pues estos pueden derivar en degradación y deforestación, debido a la interrupción de suministro de productos forestales y servicios ambientales, pudiendo desencadenar presión antropogénica sobre los bosques (FAO, 2015). Algunos ecosistemas en particular, como los manglares, que actúan como barreras naturales en las costas sufren daños severos ante el impacto de huracanes (Zhang *et al*., 2019). Autores como Sangha *et al*. (2020) consideran que, ante desastres, las pérdidas ambientales y sus impactos a largo plazo en el bienestar humano generalmente no son consideradas y propusieron cinco valores económicos de pérdidas del capital natural. Por otro lado, Mabon (2019) señala que, después de la destrucción ocasionada por un desastre, los servicios ecosistémicos pueden contribuir a la resiliencia si se incluyen en el plan de recuperación, pues mostró que los servicios de los ecosistemas culturales son esenciales para recuperar el sentido de identidad y orgullo después del desastre, a pesar de que las municipalidades carecen del conocimiento técnico para evaluar este capital natural. Un hallazgo interesante en esta revisión es que se encontraron pocos estudios que relacionen al capital natural con los desastres.

Conclusiones

El bienestar es un concepto que todos los seres humanos reconocen y se asocia con algo bueno que todos desean alcanzar, se relaciona con la satisfacción de las necesidades, que tiene consecuencias ecológicas. Alcanzarlo de manera sostenible implica un equilibrio en el uso de los capitales humano, social, construido y natural para satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras, reconociendo los límites planetarios.

El cambio climático y los fenómenos hidrometeorológicos extremos representan una amenaza para el alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y, por tanto, del bienestar sostenible. Los capitales humano, social, construido y natural pueden verse afectados por desastres. Entre los efectos adversos se encuentran una disminución en las tasas de inscripción escolar, las tasas de escolarización y los resultados de las pruebas de conocimiento de los estudiantes; lesiones, enfermedades y muertes; destrucción y daños de infraestructura económica y de servicios; afectación a la confianza social; inhibición del crecimiento del capital social; presión antropogénica sobre los bosques y daños severos a manglares. Se encontró que existe muy poca literatura que analice la relación entre el capital natural y los desastres. Respecto a los efectos beneficiosos, los desastres generan inversión en capital humano, altas tasas de acumulación de éste, crecimiento de la productividad total de los factores, crecimiento económico a largo plazo; contribución a la resiliencia; la acumulación de la salud y la nutrición ayuda a mantener el capital humano posdesastre; si destruye bienes duraderos se genera un mayor PIB a corto y largo plazo; renovación de infraestructura económica y de servicios; el capital social subsana los vacíos gubernamentales e incrementa ante una mayor asistencia del gobierno. Finalmente, el capital natural puede contribuir a la resiliencia si se incluye en el plan de recuperación. Corresponde a la sociedad y gobiernos generar alianzas para alcanzar los ODS, además se requiere el desarrollo de indicadores para medir el bienestar sostenible que consideren la vulnerabilidad.

» Referencias bibliográficas

Albrecht, F. (2018). Natural hazard events and social capital: the social impact of natural disasters. *Disasters*, 42(2), 336–360. https://doi.org/10.1111/disa.12246

Al-Maruf, A. (2017). *Enhancing Disaster Resilience through Human Capital: Prospects for Adaptation to Cyclones in Coastal Bangladesh* [Tesis de doctorado]. Universidad de Colonia. http://www.uni-koeln.de/

Anielski, M. (2001). *Measuring the Sustainability of Nations: The Genuine Progress Indicator System of Sustainable Well Being Account*s. 1–52. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17413036

Bakar, A. A., Osman, M. M., Bachok, S., Ibrahim, M., & Mohamed, M. Z. (2015). Modelling Economic Wellbeing and Social Wellbeing for Sustainability: A Theoretical Concept. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 286–296. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.037

Barro, R., & Lee, J.-W. (1993). International comparisons of educational attainment. *Journal of Monetary Economics*, 32(3), 363–394. https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:moneco:v:32:y:1993:i:3:p:363-394

Bettin, G., & Zazzaro, A. (2018). The Impact of Natural Disasters on Remittances to Low- and Middle-Income Countries. *The Journal of Development Studies*, 54(3), 481–500. https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1303672

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres*. LA RED & Tercer Mundo Editores.

Cardona, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. In A. Maskrey (Ed.), *Los desastres no son naturales* (pp. 45–63). LA RED.

Costanza, R. (2013). Sustainable Well-Being. *Resurgence and Ecologist*, 279, 39–41.

Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, 6(1), 37–46. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x

Costanza, R., Daly, L., Fioramonti, L., Giovannini, E., Kubiszewski, I., Mortensen, L. F., Pickett, K. E., Ragnarsdottir, K. V., De Vogli, R., & Wilkinson, R. (2016). Modelling and measuring sustainable wellbeing in connection with the UN Sustainable Development Goals. *Ecological Economics*, 130, 350–355. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.07.009

Costanza, R., Erickson, J. D., Farley, J., & Kubiszewski, I. (2020). *Sustainable Wellbeing Futures* (R. Costanza, J. D. Erickson, J. Farley, & I. Kubiszewski, Eds.). Edward Elgar Publishing. https://doi.org/10.4337/9781789900958

Costanza, R., & Farley, J. (2007). Ecological economics of coastal disasters: Introduction to the special issue. *Ecological Economics*, 63(2–3), 249–253. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.002

Costanza, R., Fisher, B., Ali, S., Beer, C., Bond, L., Boumans, R., Danigelis, N. L., Dickinson, J., Elliott, C., Farley, J., Gayer, D. E., Glenn, L. M., Hudspeth, T., Mahoney, D., McCahill, L., McIntosh, B., Reed, B., Rizvi, S. A. T., Rizzo, D. M., … Snapp, R. (2007). Quality of life: An approach integrating opportunities, human needs, and subjective well-being. *Ecological Economics,* 61(2–3), 267–276. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.02.023

Costanza, R., Mcglade, J., & Lovins, L. H. (2014). An Overarching Goal for the UN Sustainable Development Goals. *Solutions*, 5(4), 13–16.

Cracolici, M. F., Cuffaro, M., & Lacagnina, V. (2018). Assessment of Sustainable Well-being in the Italian Regions: An Activity Analysis Model. *Ecological Economics*, 143, 105–110. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.010

CRED & UCLouvain. (2022). *Public EM-DAT platform*. https://public.emdat.be/

Cuaresma, J. C. (2010). Natural Disasters and Human Capital Accumulation. *The World Bank Economic Review*, 24(2), 280–302. https://doi.org/10.1093/wber/lhq008

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards *. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002

Daly, H. E. (1990). Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, 2(1), 1–6. https://doi.org/10.1016/0921-8009(90)90010-R

Döpke, J., & Maschke, P. (2016). Alternatives to GDP - Measuring the impact of natural disasters using panel data. *Journal of Economic and Social Measurement*, 41(3), 265–287. https://doi.org/10.3233/JEM-160429

Fairbrass, A., Mace, G., Ekins, P., & Milligan, B. (2020). The natural capital indicator framework (NCIF) for improved national natural capital reporting. *Ecosystem Services*, 46, 101198. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101198

FAO. (2015). *Unasylva. An international Journal of forestry and forest induestries*, 66 (1)

Helne, T., & Hirvilammi, T. (2015). Wellbeing and Sustainability: A Relational Approach. *Sustainable Development*, 23(3), 167–175. https://doi.org/10.1002/sd.1581

Hochrainer-Stigler, S. (2009). *Assessing The Macroeconomic Impacts Of Natural Disasters: Are There Any?* The World Bank. https://doi.org/10.1596/1813-9450-4968

Hochrainer-Stigler, S. (2015). Natural Disasters and Macroeconomic Performance: An Empirical Analysis Based on an Econometric Modelling Approach. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, 5(1), 21–41. https://doi.org/10.5595/idrim.2015.0096

Inzulza-Contardo, J., & Díaz Parra, I. (2016). Desastres naturales, destrucción creativa y gentrificación: estudio de casos comparados en Sevilla (España), Ciudad de México (México) y Talca (Chile). *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 109–128. https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200008

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Match, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, Y. O. Ebi, R. C. Estrada, B. Genova, E. S. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White, Eds.). Organización Meteorológica Mundial.

IPCC. (2019). Annex I: Glossary. In P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo-Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. Van-Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal-Pereira, P. Vyas, E. Huntley, … J. Malley (Eds.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 803–830). In press.

Kauling, M. F., Fernandes, V., Limont, M., & Dziedzic, M. (2018). Evaluating sustainable territorial development with built capital indicators. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 50, 128–148. https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180437

Kumpulainen, S. (2006). Vulnerability concepts in hazard and risk assessment. In *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions* (Special Paper, pp. 42, 65–74). Geological Survey of Finland.

Loayza, N. V., Olaberría, E., Rigolini, J., & Christiaensen, L. (2012). Natural Disasters and Growth: Going Beyond the Averages. *World Development*, 40(7), 1317–1336. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2012.03.002

Mabon, L. (2019). Enhancing post-disaster resilience by 'building back greener': Evaluating the contribution of nature-based solutions to recovery planning in Futaba County, Fukushima Prefecture, Japan. *Landscape and Urban Planning*, 187, 105–118. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.03.013

Markhvida, M., Walsh, B., Hallegatte, S., & Baker, J. (2020). Quantification of disaster impacts through household well-being losses. *Nature Sustainability*, 3(7), 538–547. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0508-7

Martínez-Alier, J., & Roca-Jusmet, J. (2013). Economía ecológica y política ambiental (Ed.; 3a ed.). Fondo de Cultura Económica.

McDermott, T. K. J. (2012). The Effects of Natural Disasters on Human Capital Accumulation. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.2011768

Naciones Unidas. (2022). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Nguyen, P. Van, Nguyen, P. T., Nguyen, Q. L. H. T. T., & Huynh, V. D. B. (2016). Calculating Weights of Social Capital Index Using Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 6(3), 1189–1193. https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/2407

Paudel, J., & Ryu, H. (2018). Natural disasters and human capital: The case of Nepal's earthquake. *World Development*, 111, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.06.019

Pearce, D. (1991). A Sustainable World: who cares, who pays? *RSA The Royal Society for Arts, Manufactures and Commerce*, 139(5420), 493–505. https://www.jstor.org/stable/41378097

Putnam, R. D., Leonardi, R., & Nanetti, R. Y. (1993). Making Democracy Work: Civic Traditions in Modern Italy. *Princeton University Press*. https://books.google.com.mx/books?id=6hpoGGrHH-oC

Ronen, T., & Kerret, D. (2020). Promoting Sustainable Wellbeing: Integrating Positive Psychology and Environmental Sustainability in Education. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 6968. https://doi.org/10.3390/ijerph17196968

Sangha, K. K., Russell-Smith, J., Evans, J., & Edwards, A. (2020). Methodological approaches and challenges to assess the environmental losses from natural disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 49, 101619. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101619

Sangha, K. K., Stoeckl, N., Crossman, N., & Costanza, R. (2019). A state-wide economic assessment of coastal and marine ecosystem services to inform sustainable development policies in the Northern Territory, Australia. *Marine Policy*, 107, 103595. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103595

Skidmore, M., & Toya, H. (2002). Do Natural Disasters Promote Long-Run Growth? *Economic Inquiry*, 40(4), 664–687. https://EconPapers.repec.org/RePEc:oup:ecinqu:v:40:y:2002:i:4:p:664-687

Soares, D., Romero, R., & López, R. (2015). Conceptualización de vulnerabilidad y construcción de un Índice de Vulnerabilidad Social. In I. Arregún-Cortés, M. López-Pérez, O. Rodríguez-López, & M. J. Montero-Martínez (Eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (Primera Edición, pp. 10–41). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Strulik, H., & Trimborn, T. (2019). Natural Disasters and Macroeconomic Performance. *Environmental and Resource Economics*, 72(4), 1069–1098. https://doi.org/10.1007/s10640-018-0239-7

Toscana-Aparicio, A., & Fernández-Poncela, A. M. (2017). El capital social ante el vacío gubernamental en los procesos de desastre. Caso Valle de Chalco Solidaridad. *Espiral Estudios Sobre Estado y Sociedad*, 24(68), 155–190. https://doi.org/10.32870/espiral.v24i68.6335

Turner, K. G., Anderson, S., Gonzales-Chang, M., Costanza, R., Courville, S., Dalgaard, T., Dominati, E., Kubiszewski, I., Ogilvy, S., Porfirio, L., Ratna, N., Sandhu, H., Sutton, P. C., Svenning, J.-C., Turner, G. M., Varennes, Y.-D., Voinov, A., & Wratten, S. (2016). A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration. *Ecological Modelling*, 319, 190–207. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.07.017

UNDRR. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction 2019*.

Valencia-Amaya, M. G. (2020). Climate shocks and human capital: The impact of the natural disasters of 2010 in Colombia on student achievement. *Cuadernos de Economía*, 39(79), 303–328. https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v39n79.56830

Vemuri, A. W., & Costanza, R. (2006). The role of human, social, built, and natural capital in explaining life satisfaction at the country level: Toward a National Well-Being Index (NWI). *Ecological Economics*, 58(1), 119–133. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.02.008

Wang, L., & Ganapati, N. E. (2018). Disasters and Social Capital: Exploring the Impact of Hurricane Katrina on Gulf Coast Counties. *Social Science Quarterly*, 99(1), 296–312. https://doi.org/10.1111/ssqu.12392

Wilches-Chaux, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional : herramientas para la crisis* (M. D. Noguera, Ed.). Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

World Bank. (2006). *Where is the Wealth of nations? Measuring Capital for the 21st Century*. The International Bank for Reconstruction and Development & The World Bank.

World Bank. (2018). *The Human Capital Projet*. International Bank for Reconstruction and Development & The World Bank.

Yamamura, E. (2010). Effects of Interactions among Social Capital, Income and Learning from Experiences of Natural Disasters: A Case Study from Japan. *Regional Studies*, 44(8), 1019–1032. https://doi.org/10.1080/00343400903365144

Yamauchi, F., Yohannes, Y., & Quisumbing, A. (2009). Natural disasters, self-insurance and human capital investment : evidence from Bangladesh, Ethiopia and Malawi. *Policy Research Working Paper*, 4910. The World Bank. DOI

Zhang, C., Durgan, S. D., & Lagomasino, D. (2019). Modeling risk of mangroves to tropical cyclones: A case study of Hurricane Irma. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 108–116. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.052

Zhang, Z., & Ruan, J. (2020). Do Long-Run Disasters Promote Human Capital in China? —The Impact of 500 Years of Natural Disasters on County-Level Human-Capital Accumulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7422. https://doi.org/10.3390/ijerph17207422

5.2 Críticas al enfoque antropocéntrico en la gestión integral del riesgo de desastres

Karen Viviana Rendón Osorio
El Colegio de México, México

Jorge Damián Moran Escamilla
El Colegio de San Luis, México

Palabras Clave: Gestión integral del riesgo, antropocentrismo, naturaleza.
ODS: 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.

Introducción

Bajo la primacía del antropocentrismo no sólo se reconoce lo humano como lo único valioso, sino que, incluso, se le separa de las demás especies de la naturaleza (Foladori, 2005a), las cuales son sometidas al predominio de las decisiones e intereses de la humanidad. Esa perspectiva no ha mostrado tener buenos resultados en cuanto al mantenimiento del equilibrio y bienestar de los ecosistemas más próximos a los asentamientos poblacionales. Las interacciones que se tejen entre el sistema social y el ecológico sugieren la subordinación de la naturaleza externa al hombre[1] (en adelante la naturaleza), al beneficio inmediato de la población, con la pretensión de proporcionar condiciones de bienestar que responden a ideales prácticamente insostenibles; lo que, al final, termina produciendo riesgos para la naturaleza y para la propia vida humana.

El presente capitulo plantea, como eje temático, la prevalencia del antropocentrismo en la gestión integral del riesgo de desastre (GIRD), como enfoque axiológico que conlleva a que el bienestar del ser humano sea el centro de todas las gestiones relativas al desastre; en detrimento de la consideración de la naturaleza como sujeto de protección, pese a que ésta también puede ser vulnerable ante ciertas amenazas. Por lo anterior, los objetivos perseguidos en este trabajo fueron criticar la prevalencia del enfoque antropocentrista en la GIRD y reflexionar acerca de las herramientas existentes para transitar hacia el reconocimiento de la naturaleza como sujeto de protección en el contexto de los desastres.

El capítulo presenta una reflexión de corte teórico, sustentado en una metodología documental y análisis de texto, que pretende visibilizar el sesgo antropocentrista presente en las principales disposiciones internacionales de GIRD y en la *Ley General de Protección Civil de los Estados Unidos Mexicanos*, como ley federal en la materia. Para esto último, se presenta un somero análisis de texto de la ley, que evidencia que las menciones de la palabra "naturaleza", en este cuerpo normativo, apuntan a su consideración como la causa de los desastres; pese a que instrumentos internacionales reconocen el potencial de las funciones de los ecosistemas y de las soluciones basadas en la naturaleza para gestionar el riesgo de desastres; sin que eso implique reconocerle como sujeto de protección, aún. Para la realización del análisis de texto, mediante el recuento de palabras, se empleó la plataforma Voyant tools, en la cual se analizó la ley en mención, con exclusión del conteo de algunas palabras sin significados sustanciales, como los conectores o el nombre del cuerpo colegiado que la expidió.

Entre las reflexiones teóricas se invita a vincular la GIRD con el marco de sistemas socio-ecológicos (SSE), en tanto su base conceptual permite considerar a los territorios como sistemas complejos en los que la vulnerabilidad ante desastres no

[1] O bien, las especies de la naturaleza distintas al ser humano.

puede predicarse sólo del entorno social, sino también del ecológico o natural. Reflexionar sobre la necesidad de transitar desde posturas antropocentristas de gestión del riesgo, hacia otras que reconozcan a la naturaleza como sujeto de protección, es imprescindible, puesto que su subordinación a los intereses del ser humano es una de las principales fuentes de aportación al proceso social de construcción del riesgo.

El antropocentrismo y la GIRD

Herrero-Cabrejas (2017), quien recupera a Crutzen y Stoermer (2000), señala que estamos viviendo la época del Antropoceno, una nueva era geológica que se caracteriza por los graves efectos nocivos de los seres humanos sobre el planeta Tierra y las demás especies que lo habitan. El Antropoceno, como época, se fundamenta en el paradigma antropocentrista, cuya primacía considera que lo único realmente valioso es el ser humano y, por ende, el resto de la naturaleza se percibe como *lo otro*, como lo peligroso, al punto que al ser humano se le llega a concebir como una especie ajena a aquella[2]. Bajo este paradigma, las valoraciones que se hacen de la naturaleza se encuentran en función de la utilidad que ésta tiene para aquel, lo que supone el no reconocimiento de su valor intrínseco (Callicott, 2004; Gudynas, 2010).

Respecto a la posición histórica antropocentrista, Foladori (2005a) señala que, desde esta postura, la "defensa de la naturaleza externa [está] en función de la experiencia pasada de la propia sociedad humana, lo cual significa considerar a la naturaleza subjetivada por la práctica humana, y establecer su valor o ética en función de la experiencia pasada". Es decir, a partir del antropocentrismo, el ser humano es quien asigna un sistema de valores a la naturaleza y lo hace según la experiencia que tiene con cada uno de sus elementos. Sin embargo, hay que distinguir entre lo antropocéntrico y lo antropogénico, ya que este último alude a las construcciones humanas, mientras el primero implica la consideración de esa especie como la única con valor intrínseco (Foladori, 2005a).

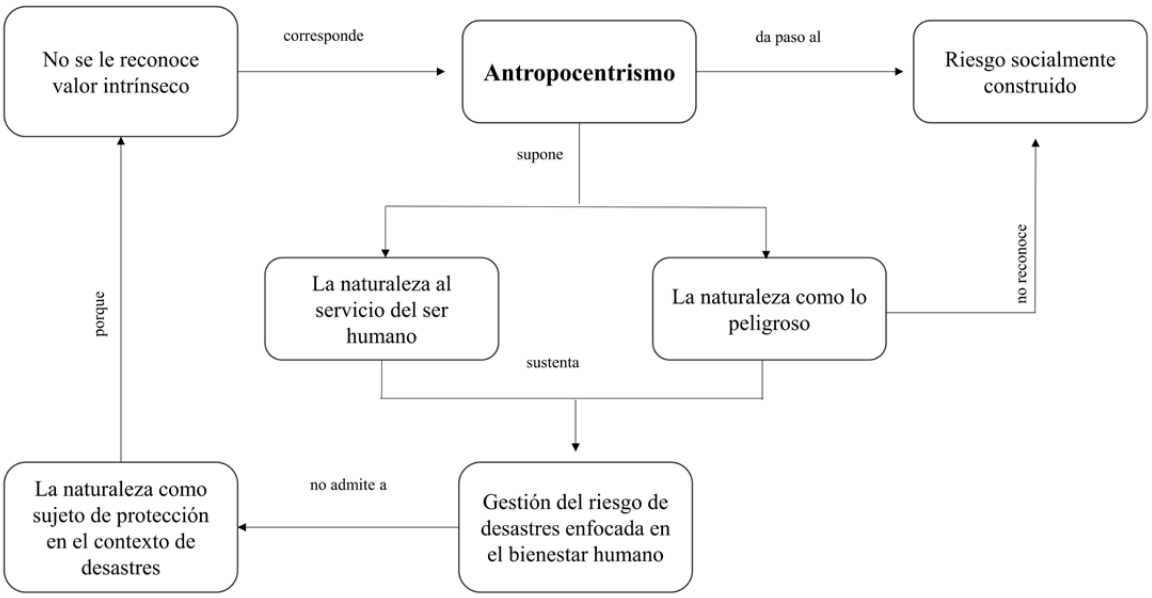
En las sociedades modernas occidentales predomina la tendencia a no reconocer el valor intrínseco de la naturaleza. De ahí que la mayoría de las políticas de gestión ambiental no suelen sostenerse sobre la lógica de mantener las condiciones de ésta, en tanto todas las especies que la conforman merecen gozar de ciertas condiciones de bienestar, sino que se sustentan en la idea de que acercarse a cierto nivel de equilibrio natural, le permite al ser humano gozar de condiciones de vida favorables. Los valores intrínsecos en la naturaleza, según Gudynas (2014):

> expresan una esencia, naturaleza o cualidad que son propias e inherentes a un objeto, ser vivo o ambiente, y por lo tanto independientes de los valores otorgados por los seres humanos. Son aquellos valores que no consideran a los objetos o las especies como un medio para un fin propio de las personas.

Aunque la discusión de las valoraciones en torno a la naturaleza no se haga explicita en todos los campos en los que se le estudia, es una cuestión subyacente a los patrones de interacción humana con ésta. El ámbito del riesgo de desastres no es ajeno a esa situación. Las posturas antropocentristas hacia la naturaleza son la base axiológica del riesgo socialmente construido, ya que la transformación y explotación desmedida de ésta, con miras a la satisfacción del bienestar humano, ha propiciado cambios ecológicos que permiten que los fenómenos y ciclos naturales se conviertan en amenazas. Como consecuencia de ello, las medidas de GIRD también responden a la misma lógica antropocentrista. Es decir, no se reconoce el valor intrínseco de la naturaleza y su explotación utilitarista da paso al riesgo socialmente construido. Pero, además, se responde ante este riesgo con políticas que reafirman tal desconocimiento y cuya preocupación se reduce

[2] En este trabajo se reconoce que el ser humano hace parte de la naturaleza.

al mantenimiento o la recuperación del bienestar humano (Gráfico 1). Bajo este panorama, la GIRD no se encuentra ajena a la discusión axiológica en torno a la valoración de la naturaleza; lo cual, sin duda, demarca un contexto de múltiples tensiones que está ligado a las concepciones que cada comunidad tiene de aquella.

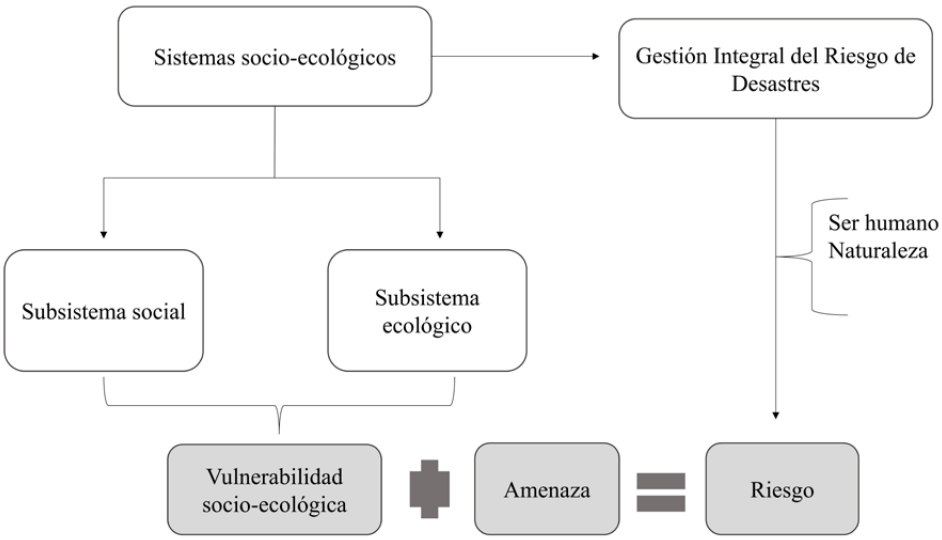


► **Gráfico 1.** Vínculo entre el antropocentrismo y el tratamiento de la naturaleza en la GRD.
Fuente: Elaboración propia.

El riesgo de desastre implica la interacción entre vulnerabilidad y amenaza (Lavell, 2000a), de ahí que, para gestionarlo de manera integral, se deba concebir tanto los factores sociales como los ecológicos que inciden en su existencia. Ahora bien, aunque en América Latina los estudios y procesos de gestión del riesgo de destre (GRD) han estado predominantemente sesgados al análisis de la amenaza (Cardona, 2009), en detrimento del análisis de la vulnerabilidad, el estudio de aquella, que es el elemento que usualmente considera el componente "natural" del riesgo, suele adscribirse al paradigma antropocéntrico y se analiza de cara al potencial de ocurrencia de eventos dañinos para la población y sus bienes. Pero, también, la conceptualización misma de vulnerabilidad, en el contexto del desastre, se centra en las condiciones de susceptibilidad y exposición de la población humana (Blaikie *et al.*, 1996; Cardona, 2015; Lavell, 2000b; Martínez, 2018; Wilchex-Chaux, 1993) puesto que, tradicionalmente, la naturaleza no ha sido un sujeto de protección ante riesgo de desastre, sino que se concibe como causante de éstos.

La consideración de los desastres como un asunto natural moldea las decisiones que se toman en torno a su gestión. La concepción de la naturaleza como "lo peligroso", que el ser humano debe dominar (Gudynas, 2010), automáticamente la elimina de la ecuación como sujeto de protección en caso de desastres, aunque hay ecosistemas que igualmente se encuentran en condiciones de vulnerabilidad respecto a la existencia de distintas amenazas. Por ejemplo, los arrecifes de coral y los ecosistemas de mangle son tan vulnerables ante el cambio climático como los son las poblaciones humanas que habitan ciudades costeras. Analizar la GIRD desde un enfoque socioecológico permite aproximarse a la vulnerabilidad, a partir de su dimensión no sólo social, sino también ecológica, con la finalidad de reconocer, en la naturaleza, a un agente que también resulta afectado y que, por lo tanto, debe ser considerado como un elemento a proteger en la GIRD.

El marco analítico de sistemas socio-ecológicos (SES) sugiere que en los territorios interaccionan constantemente las estructuras sociales con las ecológicas (Herrero-Jáuregui *et al.*, 2018). A partir de este marco, los territorios se conciben como sistemas complejos en los que sus elementos están tan intrínsecamente relacionados que resulta reduccionista intentar separarlos. Considerarlos como sistemas socio-ecológicos, al momento de estudiar la GIRD, permite considerar la arista ecológica en la vulnerabilidad para vincular a la naturaleza como sujeto de protección (y/o de derechos). Esto permitiría transitar hacia una GIRD en la que no se omita a ningún elemento involucrado en la construcción y GRD (Gráfico 2).



► **Gráfico 2.** Sistemas socio-ecológicos y GIRD: consideración de la naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

Desde el marco de SES, la vulnerabilidad no es sólo una cuestión poblacional o enfocada en el ser humano. Bajo este paraguas conceptual, se pueden considerar otras especies de la naturaleza como vulnerables ante desastres y, por tanto, como sujetos a contemplar en el proceso de GIRD. Esto nos inserta, nuevamente, en las tensiones en torno a las valoraciones que el ser humano hace respecto de las otras especies, puesto que, en virtud de ellas, también se priorizaría la consideración de una especie o ecosistema en el proceso de GIRD. Pero en este punto cabe señalar que, si bien esas valoraciones siempre serán antropogénicas, no tienen por qué ser antropocéntricas necesariamente (Foladori, 2005b). Sin embargo, para transitar hacia valoraciones de la naturaleza no antropocéntricas que permitan su consideración como sujeto de protección en sí mismos, en los procesos de GIRD se requiere no sólo reconocer la participación humana en la construcción del riesgo de desastres, sino también el reconocimiento de un valor más que utilitario de la naturaleza.

La evolución en el tratamiento internacional de la GIRD

Para comprender la GIRD y su visión antropocentrista, se propone un recuento de algunas transiciones que se han presentado a escala global y que influyen en la nacional, con el propósito de entender los preceptos detrás del paradigma adoptado sobre el riesgo de desastres y la forma de gestionarlo.

El primer referente es el Convenio de Ginebra de 1949, con el cual se buscaba proteger a las víctimas de los conflictos armados (Oberreuter-Olivares, 2016). Con éste se sientan las bases de los servicios de protección civil y la vocación hacia la reacción. Sin duda fue un avance en la materia, pero puso el centro de atención en el ser humano, su finalidad era

"proteger a la población civil contra los peligros de las hostilidades y de las catástrofes y a ayudarla a recuperarse de sus efectos inmediatos, así como a facilitar las condiciones necesarias para su supervivencia" (CICR, 1977).

Posteriormente, tras los desastres que se experimentaron en el mundo durante la década de 1980, se establece el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN) (1990-1999). Con él se erige un marco global para los riesgos y la gestión de los desastres en el que, sin embargo, al desastre se le califica como natural. Con la declaración del decenio, "se reafirma la necesidad de que tanto la reducción de desastres, como el manejo de los riesgos sean elementos esenciales de las políticas gubernamentales" (EIRD, 2001). Además, planteó la necesidad de pasar de una respuesta a los desastres, a una reducción de éstos, toda vez que se reconoció la participación de la acción humana en su consecución (EIRD, 2001).

En esa misma década, pero en 1994, se establece la Estrategia de Yokohama, que tuvo como plan de acción la reducción de los riesgos y el impacto de los desastres. "A su vez, esta estrategia se plantea en un enfoque de desarrollo sostenible y aumento de resiliencia por el desarrollo de capacidades nacionales y locales de gestión y reducción del riesgo" (Oberreuter-Olivares, 2016). Con la conclusión del DIRDN, se adopta la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD, 2001). Dicha transición trajo consigo un cambio conceptual, cuya base se sostuvo en el desarrollo de sociedades más seguras ante los desastres (Hernández *et al*., 2021; Oberreuter-Olivares, 2016). La visión que planteó la EIRD fue "habilitar a las sociedades para resistir a los peligros naturales y desastres tecnológicos y ambientales, con el propósito de reducir pérdidas ambientales, humanas, económicas y sociales" (EIRD, 2001). Además, señaló que la capacidad de la sociedad para resistir a los desastres está supeditada a sus fortalezas y debilidades, considerando diversos factores en los que se incluyen las disparidades sociales y económicas; sin considerar, de manera explícita,[3] el estado del medioambiente para mitigar los efectos adversos que pueden producir las manifestaciones de la naturaleza, ni la importancia del cuidado de ésta. En este punto, se reconocen los avances que se presentaron en la reducción de las muertes, aunque se exhibió un aumento en las pérdidas materiales y económicas. Asimismo, la consideración de la naturaleza como sujeto de protección siguió siendo una deuda en los temas a valorar en la agenda de desastres.

Posteriormente, se creó el Marco de Acción de Hyogo (MAH) (2005-2015), en el que se reconocen los objetivos alcanzados en la Estrategia de Yokohama y se buscó corregir los que no lograron cumplirse, sus esfuerzos se enfocaron en cinco ejes (Oberreuter-Olivares, 2016): 1) que la reducción del riesgo de desastres (RRD) fuera una prioridad nacional, dotada de una sólida base institucional de aplicación; 2) identificar, evaluar y vigilar los riesgos de desastres y potenciar las alertas tempranas; 3) utilizar los conocimientos, innovación y educación para la creación de una cultura de seguridad y resiliencia; 4) reducir los factores de riesgo subyacentes; y 5) fortalecer la preparación para casos de desastres a fin de asegurar una respuesta eficaz a todo nivel. En este último eje, el marco hace alusión a las personas y comunidades asentadas en zonas de amenaza. Asimismo, la identificación de riesgos también está centrada en aquellos que afectan a la sociedad, por lo que el MAH tampoco constituyó un avance claro respecto a la consideración de la naturaleza como sujeto de protección en la GIRD.

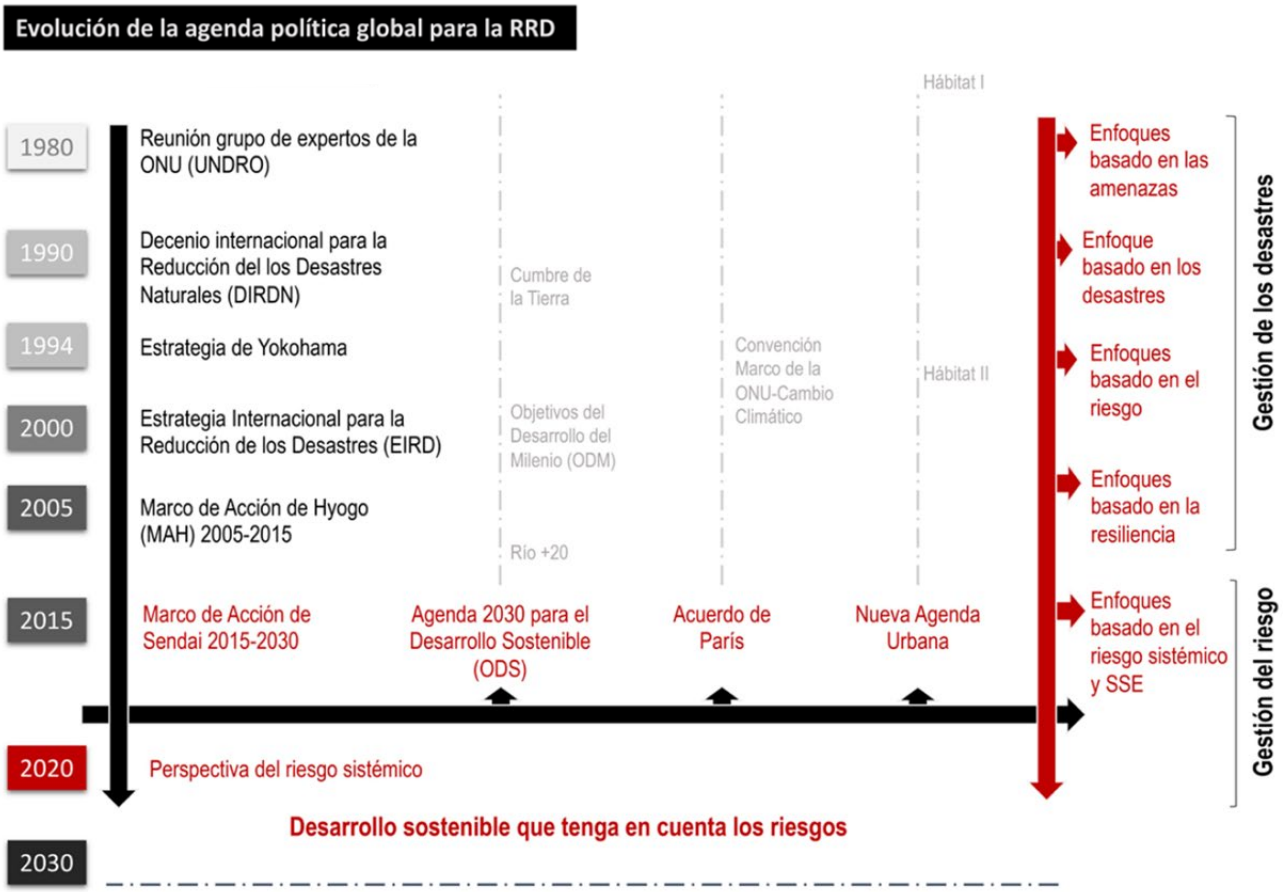
Una vez concluida la vigencia del MAH, se planteó el Marco de Acción de Sendai (MAS) (2015-2030). Con el MAS se busca una transición que permita alcanzar una GIRD, destacando cuatro prioridades de acción (Oberreuter, 2016, p. 2; MAS, 2015, p. 14): 1) comprender el riesgo de desastre; 2) fortalecer la gobernanza del riesgo de

[3] Aunque en los asuntos a tratar por parte de las autoridades, se plantea "un vínculo más estrecho entre los esfuerzos realizados para reducir los desastres y el proceso de aplicación de la Agenda 21, para intensificar la sinergia de los temas relacionados con el medio ambiente y el desarrollo sostenible" (EIRD, 2001:8). Esto es lo más cercano a incorporar el interés hacia la naturaleza, el entorno y el medio ambiente.

desastre para gestionarlo; 3) invertir en la RRD, en pro de la resiliencia; 4) aumentar la preparación para casos de desastres a fin de dar una respuesta eficaz para reconstruir mejor. Además, se plantea una coordinación de acciones con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (Hernández, *et al*. 2021). De esta forma, se puede plantear que se pasó de un modelo que administraba la emergencia, a uno que procuraba la gestión del desastre (DIRDN-MAH), para llegar al modelo actual dónde se promueve una GIRD (Marco de Acción de Sendai, 2015).

Si bien, la transición ha permitido un cambio de paradigma sobre los riesgos y desastres (Gráfico 3), sigue poniendo en el centro de la atención a las personas y sus bienes. Aunque señala la protección de la

> salud, medios de vida y bienes de producción, así como los activos culturales y ambientales […]; la planificación con miras a la aplicación de enfoques ecosistémicos en relación con los recursos compartidos [entre fronteras] […]; reforzar el uso y la ordenación sostenible de los ecosistemas y aplicar enfoques integrados de ordenación del medio ambiente y los recursos naturales que incorporen la reducción del riesgo de desastres (MAS, 2015:13-20).



► **Gráfico 3.** Evolución de la agenda política global para la reducción del riesgo de desastres. Fuente: Hernández *et al*. (2021).

A lo más que llega este marco es al reconocimiento de las funciones de los ecosistemas en la reducción de los riesgos (MAS, 2015:19), lo que está lejos de reconocer a la naturaleza como sujeto de protección y reafirma la postura antropocéntrica de la GIRD. Probablemente por ello las referencias sobre la GIRD y las distintas definiciones,

que se pueden rastrear al respecto, no parecen concebir a la naturaleza como sujeto de protección, sino como el origen de las amenazas o, en el mejor de casos, como una herramienta para la GRD desde el manejo de los ecosistemas y de los recursos naturales, que permite evitar prácticas ingenieriles invasivas e incluso perjudiciales a largo plazo (Depietri, 2019).

La naturaleza en algunas definiciones de la GIRD

En México, la Ley General de Protección Civil (LGPC) considera la gestión integral del riesgo como

> el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción, que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y *fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad*. Involucra las etapas de: identificación de los riesgos y/o su proceso de formación, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción (Ley General de Protección Civil, 2020) (cursivas fuera del texto original).

Por su parte, Alcántara *et al*. señalan que la GIRD

> debe entenderse como un proceso complejo sistemático conformado por una serie de decisiones, acciones y actividades, así como una coordinación transversal, entre los diferentes actores institucionales y sociales, para conocer y transformar las necesidades y debilidades expresadas en las diferentes vertientes de la vulnerabilidad y exposición, en respuestas puntuales y soluciones colectivas, cuyo objetivo principal sea la deconstrucción del riesgo. Ineludiblemente, la GIRD requiere una fundamentación dirigida hacia la reducción de vulnerabilidades como eje estratégico de diagnósticos, leyes, programas y co-gestión de gobierno y sociedad, donde *se privilegie la salvaguarda de la vida humana, el mejoramiento de la calidad de vida de la población y su desarrollo integral*, en un marco de respeto de los derechos humanos y, en consecuencia, con una perspectiva de género (Alcántara-Ayala *et al*., 2019).

En estas definiciones se hace alusión a las acciones administrativas, etapas, procesos complejos o multifactoriales que requieren decisiones, acciones y organización a fin de disminuir los impactos de los riesgos de desastres. Esto parece obedecer a una necesidad de definir parámetros, cuantitativos y operativos, para tomar decisiones sobre cuándo o cómo intervenir ante determinadas circunstancias (Lavell, 1996). Tanto la definición de la Ley General de Protección Civil (2020) como la que brindan Alcántara *et al*. (2019) señalan de forma explícita que la finalidad de GIRD es proteger la sociedad y/o la vida humana; en ellas se omite la consideración de la naturaleza como un sujeto hacia cuya protección también deben dirigirse todas las decisiones, acciones y procesos que se emprenden en el marco de los desastres, lo que reafirma la primacía del paradigma antropocentrista en la concepción de la GIRD en México.

En las definiciones anteriores se observa la visión antropocéntrica y administrativista que ha primado en la concepción de los desastres y la prioridad que le ha dado a la atención de emergencias. Por lo que es importante que, en lo subsecuente, se haga una transición hacia una visión socio-ecológica que integre a la naturaleza y su

valor propio y/o derechos, al mismo nivel que el de los seres humanos. Ésta sería la siguiente evolución en el enfoque de la GIRD, la cual debería integrar la gestión ambiental (GA).[4] Toda vez que ésta tiene un enfoque holístico y dinámico, como debería ser la GIRD. Además, la GA se concibe como un asunto relacionado con recursos naturales y con el ecosistema, abarcando lo social y lo socio-natural, así como formas complejas de interacción y una coordinación interinstitucional. Esto no significa una adición de los riesgos ambientales a la GIRD, sino una fusión que permita reconocer a la naturaleza como un agente con derecho a existir y coexistir con el ser humano, y, por tanto, a ser protegida en el contexto de desastres.

La GRD no sólo debería centrarse en un conjunto de herramientas o técnicas para direccionar el desarrollo o hacer frente a los desastres, sino en recuperar "la memoria perdida de una época en la cual los seres humanos sabíamos dialogar con la naturaleza […]" (EIRD, 2008, p. 54). El resultado de tal recuperación debería ser una mayor equidad y mejor calidad de vida para todos los que habitamos este planeta, entre los que se incluye a los habitantes no humanos.

La ausencia de una GIRD y su articulación con la GA es una cuestión que, a pesar de haber sido identificada desde el DIRDN, y pese a que se han creado organismos e iniciativas internacionales, se sigue observando. Tras dos décadas del nuevo siglo, aún hay un tratamiento sectorizado que limita la posibilidad de incidencia en los distintos órdenes de gobierno. Recuperando las palabras de Cardona, (1996:67),

> las actividades inherentes a la reducción de riesgos y la gestión ambiental y del hábitat urbano no se han llevado a cabo de manera coherente, y, en el mejor de los casos, han sido realizadas en forma dispersa por entidades desde diversos sectores sin vincular a las localidades y sin una debida orientación y coordinación.

Lo anterior no sólo deja en evidencia la desarticulación que debería haberse superado, además, refleja la (aparente) falta de avances en cuanto al reconocimiento de valores intrínsecos (y/o de derechos) en la naturaleza para entenderle como sujeto de protección, y los problemas de concientización sobre la gravedad del tema. A su vez, explica la amplitud que han alcanzado los riesgos, así como el surgimiento y proliferación de nuevas amenazas.

Hacia el reconocimiento de la naturaleza como sujeto de protección en la GIRD, en México

Una muestra de la desarticulación mencionada en el apartado anterior se puede observar en los escasos elementos que se encuentran en la LGPC sobre la naturaleza o los ecosistemas. La LGPC es el marco normativo que establece la forma en que el Estado mexicano asume una concepción y posición frente a los riesgos y desastres.[5] En ella se reconoce, en su Art. 2°, que la protección civil es una acción solidaria que, entre otros aspectos, busca salvaguardar "la vida, integridad y salud de la población, así como sus bienes; infraestructura, la planta productiva y el medio ambiente"; además de concebir, entre la reducción de riesgos, la implementación de medidas de protección del medioambiente.

[4] Cardona (1996) señala la necesidad de pensar al medioambiente y al ser humano como una misma unidad, ya que concebir a este último como externo sería limitado y alejado de la realidad; lo cual conduce a una definición incompleta de los desastres. Toda vez que un desastre, más que generar un impacto ambiental, es un impacto ambiental; no solo se ven afectados seres humanos, también se pueden ver comprometidos otros elementos renovables y no renovables.

[5] Sin embargo, no refiere a la forma en que se abocarán a las cuestiones ambientales, toda vez que ese rubro solo parece corresponder a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).

Sin embargo, al realizar un análisis de texto a la ley, se obtuvo que, entre las 25 palabras que más se mencionan se encuentran: "protección", "civil", "nacional", "riesgos", "entidades", "población" (ésta última con 45 alusiones), entre otras. Mientras que la palabra más cercana a "naturaleza" que se registra es "natural"[6] y sólo aparece al considerar las 45 palabras con más frecuencia de uso en el texto normativo (y fue encontrada 20 veces) (Gráficas 4 y 5). No obstante, la palabra "natural" es utilizada para aludir a "fenómeno natural", "perturbación natural", "origen natural" o "desastre natural"; lo que parece sugerir que, desde la normatividad federal en materia de riesgos de desastres, la naturaleza es considerada como el origen de las amenazas y, peor aún, como la causante del desastre.

Pero, además, la población, la integridad física de ésta y sus bienes siguen siendo el centro único de protección. Esto reafirma la postura antropocentrista del sistema mexicano en materia de GRD, por cuanto se concibe sólo para proteger al ser humano a partir de la consideración de la naturaleza como lo peligroso. Gran parte de esta concepción se debe a que, formalmente, el sistema nacional sigue conservando en su núcleo normativo la protección civil, antes que la gestión del riesgo; y, como su nombre mismo lo indica, las actividades de protección civil siempre tendrán en el centro de ellas a la población, puesto que sugiere medidas de respuestas para salvaguardar la vida e integridad de quienes se ven expuestos a una amenaza o resultan afectados por desastres.

Es decir, en México el reto inicial es trascender en las esferas, tanto normativas como prácticas, de la noción de protección civil cuando se trata de manejar los desastres, hacia instancias más preventivas como la gestión de riesgos. Sin embargo, como puede inferirse de los párrafos anteriores, la mera apropiación de la GIRD no implica *per se* la consideración de la naturaleza como sujeto de protección en ese proceso. Para lograrlo se requiere que la gestión esté permeada por marcos que permitan reconocer a la naturaleza como un sujeto con valor autónomo. En esa medida se posibilitaría que las acciones y decisiones de GIRD le reconozca como centro de

► **Gráfico 4.**
Nube de palabras frecuentes en la LGPC: 25 palabras más mencionadas.

Fuente: Elaboración propia.

[6] La palabra "ecológico" solo es mencionada una vez.

protección, a la par de los sistemas humanos; en tanto también hay sistemas naturales expuestos y vulnerables a las amenazas socioambientales, en los cuales los efectos de un desastre pueden resultar devastadores para el equilibrio ecológico.

Al respecto, se considera que el marco de SSE, desde lo conceptual, permite reconocer que no sólo la población humana es vulnerable en el contexto del riesgo; y que la GA, al poner en el centro el bienestar de los ecosistemas, puede hacer lo propio desde la práctica, para migrar hacia una GIRD menos antropocentrista.

► **Gráfico 5.**
Nube de palabras frecuentes en la LGPC: 45 palabras más mencionadas.

Fuente: Elaboración propia.

Reflexiones finales

Este capítulo constituye una reflexión teórica acerca del sesgo antropocentrista presente en las principales disposiciones internacionales de gestión integral del riesgo de desastres (GIRD) y en la Ley General de Protección Civil de los Estados Unidos Mexicanos, como ley federal en la materia. La principal conclusión al respecto sugiere que los instrumentos internacionales reconocen el potencial de las soluciones basadas en la naturaleza y de las funciones ecológicas de los ecosistemas, para la GIRD; más no posicionan a la naturaleza como sujeto principal de su protección. Además, en el caso mexicano se observa la necesidad de transitar del sesgo de los enfoques de la protección civil hacia la GIRD. Respecto a la cual se sugiere complementarla con marcos teóricos como el de sistemas socio-ecológicos y la gestión ambiental, que permitan contemplar todos los elementos de la naturaleza como vulnerables en el contexto del riesgo de desastres.

Sin embargo, el reconocimiento de valores intrínsecos de la naturaleza es un requisito previo a considerar en el centro del quehacer de la GIRD. Tal reconocimiento no sólo es viable a la luz de distintos ordenamientos que la protegen, sino, también, con base en las prácticas observadas en los pueblos originarios o comunidades indígenas en las que ésta no representa un riesgo porque sus manifestaciones son consideradas como un proceso cíclico que da soporte a la vida y las actividades que la sostienen. Nociones

como el buen vivir, de los pueblos andinos, sugieren formas de desarrollo que no trasgreden el bienestar de la naturaleza, incluso las constituciones políticas de Ecuador y Bolivia ya reconocen a la naturaleza como sujeto de derecho.

La importancia de ese reconocimiento, para la GIRD, es que brinda la base jurídica de obligatoriedad para la salvaguarda de la naturaleza de cara a potenciales desastres, antes que contemplarla como origen de éstos. Sin embargo, el reconocimiento de los derechos de la naturaleza no es un asunto sencillo puesto que, a excepción del hombre, ninguna de sus especies podría reclamar sus derechos sin la intermediación humana y éstos se reconocerían en virtud de la valoración que el mismo ser humano haga de ella, que siempre será antropogénica, aunque no necesariamente tiene que ser antropocéntrica.

Mientras los ordenamientos jurídicos se preparan para ese tránsito, la normatividad en materia de riesgos de desastres puede valerse de marcos analíticos que permitan concebir los territorios como un sistema socio-ecológico, y que, en esa medida, posibiliten reconocer que la vulnerabilidad no sólo tiene una dimensión social, sino también ecológica. Esto permitiría el reconocimiento de la naturaleza como sujeto de protección para transitar hacia una GIRD menos antropocentrista, ya que existe evidencia fáctica suficiente de que poner los intereses humanos por encima de las necesidades de la naturaleza simplemente robustece el proceso social de construcción del riesgo.

» Referencias bibliográficas

Alcántara-Ayala, I., Garza Salinas, M., López García, A., Magaña Rueda, V., Oropeza Orozco, O., Puente Aguilar, S., Rodríguez Velázquez, D., Simone, L., Ruiz Rivera, N., Tena Núñez, R., Urzúa Venegas, M., & Vázquez Rangel, G. (2019). Gestión Integral de Riesgo de Desastres en México: reflexiones, retos y propuestas de transformación de la política pública desde la academia. *Revista Investigaciones Geográficas*, 98, 1–17.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Callicott, J. B. (2004). Teoría del valor no antropocéntrica y ética ambiental. In *Naturaleza y valor: una aproximación a la ética ambiental* (pp. 99–118). Fondo de Cultura Económica. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2596943

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2020). *Ley General de Protección Civil*. https://www.gob.mx/indesol/documentos/ley-general-de-proteccion-civil-60762

Cardona, O. (1996). Manejo ambiental y prevención de desastres: Dos temas asociados. In M. Fernández (Ed.), *Ciudades en riesgo. Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres* (pp. 57–74). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina & Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo.

Cardona, O. (2009). Medición de la gestión del riesgo en América Latina. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 3.

Cardona, O. (2015). *Indicadores de riesgo de desastres y de gestión del riesgo*. Banco Interamericano de Desarrollo.

CICR. (1977). *Protocolo I adicional a los Convenios de Ginebra de 1949 relativo a la protección de las víctimas de los conflictos armados internacionales, 1977*. https://www.icrc.org/es/document/protocolo-i-adicional-convenios-ginebra-1949-proteccion-victimas-conflictos-armados-internacionales-1977#:~:text=Protecci%C3%B3n%20y%20asistencia-,1.,m%C3%A9dicos%20que%20exija%20su%20estado

Depietri, Y. (2019). The social–ecological dimension of vulnerability and risk to natural hazards. *Sustainability Science*, 15, 587–604. https://doi.org/10.1007/s11625-019-00710-y

EIRD. (2001). *Marco de acción para la aplicación de la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres*. ONU.

Foladori, G. (2005a). Una tipología del pensamiento ambientalista. In H. Cámara de Diputados, Universidad Autónoma de Zacatecas, & M. Á. Porrúa (Eds.), *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (pp. 83–136). Miguel Ángel Porrúa.

Foladori, G. (2005b). Una tipología del pensamiento ambientalista. In G. Faladori & N. Pierri (Eds.), *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (pp. 83–136). Miguel Ángel Porrúa.

Gudynas, E. (2010). Imágenes, ideas y conceptos sobre la naturaleza en América Latina. In L. Montenegro (Ed.), *Cultura y naturaleza* (pp. 268–293). Jardín Botánico José Celestino Mutis.

Gudynas, E. (2014). *Derechos de la Naturaleza: Ética biocéntrica y políticas ambientales*. Programa Democracia y Transformación Global.

Hernández, M. A., Frausto, O. M., & López, M. G. (2021). Desafíos de los sistemas locales de la gestión integral del riesgo de desastre, sistemas socio-ecológicos y cambio climático. In J. Morales, E. Gonzáles, C. Welsh, & O. Frausto (Eds.), *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos*. CLAVE Editorial.

Herrero-Cabrejas, A. (2017). Navegando por los turbulentos tiempos del Antropoceno. *Ecología Política*, 53, 18–25. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6063826

Herrero-Jáuregui, C., Arnaiz-Schmitz, C., Reyes, M. F., Telesnicki, M., Agramonte, I., Easdale, M. H., Schmitz, M. F., Aguiar, M., Gómez-Sal, A., & Montes, C. (2018). What do we talk about when we talk about social-ecological systems? A literature review. *Sustainability*, 10(8), 1–14. https://doi.org/10.3390/su10082950

Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. In M. Fernández (Ed.), *Ciudades en riesgo. Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres* (pp. 12–42). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina & Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo.

Lavell, A. (2000a). *Desastres urbanos: una visión global*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales.

Lavell, A. (2000b). *Desastres urbanos: una visión global*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales.

Marco de Acción de Sendai. (2015). *Marco de Acción de Sendai*. ONU.

Martínez, P. (2018). *El impacto de los desastres naturales sobre los derechos humanos: Un análisis del caso del terremoto de Ecuador de 2016*. Universitat Oberta de Catalunya.

Oberreuter-Olivares, R. (2016). *Análisis comparativo entre Marcos de Acción de Hyogo y Marco de Acción de Sendai*. Diplomado En Reducción Del Riesgo de Desastres: Prevención y Gestión.

Wilchex-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. In A. Maskrey (Ed.), *Los desastres no son naturales* (pp. 11–41). La Red.

5.3 Gestión integral de riesgos en México y cambio climático ¿cómo vamos?

Dra. Ma. De Lourdes Romo Aguilar
El Colegio de la Frontera Norte, México

Dra. Ana Cecilia Travieso-Bello
Universidad Veracruzana, México

Palabras Clave: Gestión Integral de Riesgos, Cambio Climático, acuerdos internacionales.
ODS: 13 Acción por el Clima.

Introducción

De acuerdo con Naciones Unidas, el año 2019 fue el segundo más caliente de todos los tiempos y con ello se marcó el final de la década más calurosa registrada (2010-2019), lo cual es evidencia del Cambio Climático (CC) que impacta a todos los países del mundo (NU, 2019). Ante esta situación, cobra relevancia el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 13 de acción por el clima, que tiene el propósito de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, que en afectaciones extremas resulta en desastres naturales (UNDRR, 2015). En este contexto, en el Acuerdo de París de 2015, para reforzar la respuesta ante la amenaza del cambio climático, México se comprometió a limitar el aumento de la temperatura de la Tierra a menos de 1.5º C, a reducir 22% de los gases de efecto de invernadero (GEI) y a generar 35% de energía de fuentes limpias para 2024 y 43% para 2030, así como disminuir a la mitad el número de municipios más vulnerables al CC (IMCO, 2016).

Pese a los acuerdos consignados, en el año 2020 desaparecen el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) y el Fondo de Prevención de Desastres (FOPREDEN). Además, en el mismo año se propuso la Ley General de Gestión Integral del Riesgo de Desastres y Protección Civil, que considera la sustitución de dichos fondos por programas sociales.

Por ello es necesario observar la operacionalización del ODS 13 en las capacidades de México para enfrentar los efectos del cambio climático, a través de su normativa y sus instrumentos, particularmente los financieros. Es así que el objetivo de este trabajo es analizar la normatividad y los instrumentos presupuestarios de México ante la amenaza del cambio climático y los acuerdos internacionales firmados.

Contexto histórico-conceptual

De acuerdo con la Unión Europea (UE *et al.*, 2018), México está entre los 10 países con alto riesgo de desastres y crisis humanitarias, a lo que se agrega el constante y acelerado ritmo de crecimiento poblacional (ONU, 2019) y la localización de parte de la población en sitios de riesgo a estos desastres. ¿Pero cuál ha sido la actuación del país ante dicha situación? Es a partir del terremoto de 1985 cuando, en octubre de ese año, se estableció la Comisión Nacional para la Reconstrucción y en 1986 se creó el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), coordinado y supervisado por la Secretaría de Gobernación (SEGOB), que, desde su creación hasta la evaluación de la OCDE al menos, se observó que el trabajo de este organismo ha sido más de tipo reactivo que

preventivo (OECD, 2013). En 1988 se creó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) como órgano administrativo desconcentrado subordinado a la SEGOB, a través de la Coordinación General de Protección Civil.

Los trabajos, planes y programas de atención al tema de los riesgos se manejaban en la categoría denominada "gestión integral de riesgos" y para la atención de este tema se requería la reasignación de recursos por parte de las dependencias relacionadas con el tema, ello retrasaba los trabajos y la entrega de fondos para la recuperación posdesastre. La medida para resolver esa problemática fue la creación del FONDEN en 1996, con carácter interinstitucional y siendo operativo en 1999. Con éste se trató de asegurar el acceso a los recursos de manera inmediata posterior al desastre, sin comprometer los trabajos y programas públicos vigentes. Las reglas de este fondo se publicaron hasta 2010, y sus lineamientos de operación en 2011, ello clarificó y simplificó los procedimientos para acceder al mismo. Por su parte, el FOPREDEN, instrumento financiero complementario del FONDEN, para cumplir con su propósito, contemplaba el financiamiento de acciones relacionadas con la evaluación y reducción del riesgo, así como iniciativas para generar capacidades en materia de prevención. Ambos funcionaron hasta el año 2020 en que fueron extintos, habiendo sido, desde 1996, los principales instrumentos financieros para atender el tema de riesgos de desastre.

En dicho contexto, el propio concepto de atención al riesgo ha evolucionado en cuanto a su objeto, procurando avanzar en el conocimiento de los riesgos y sus causas. En este proceso hay momentos de coyuntura como el impacto del huracán Mitch en América Central en 1998, que obligadamente condujo a la reflexión y al debate sobre los factores que dieron como resultado los altos niveles de devastación e impacto social en todas las áreas y actividades de las poblaciones afectadas, dando paso formal al concepto gestión integral del riesgo (GIR) e incorporándolo, en 2012, a la Ley General de Protección Civil en México. En este contexto, se reconoce que el riesgo de desastre no es natural, que es socialmente construido y sus componentes son: peligro, vulnerabilidad y exposición (Lavell, 2010; Narváez *et al.*, 2009).

Actualmente el reconocimiento de las características recién mencionadas y otras se integran en un concepto más amplio, la gestión integral del riesgo de desastre (GIRD), que involucra planeación, participación, evaluación y toma de decisiones, que debe resultar en una intervención gubernamental específica para la atención, prevención y disminución del riesgo de desastre, centrándose en la persona humana (CENAPRED, 2020).

A la GIRD hay que incluir de manera efectiva el tema del CC, que es un enorme desafío y una prioridad estratégica que se requiere para lograr la coherencia en la política pública sobre el tema, unido a la innovación tecnológica y al financiamiento para responder de manera exitosa a los compromisos adquiridos a nivel internacional para lograr el ODS 13.

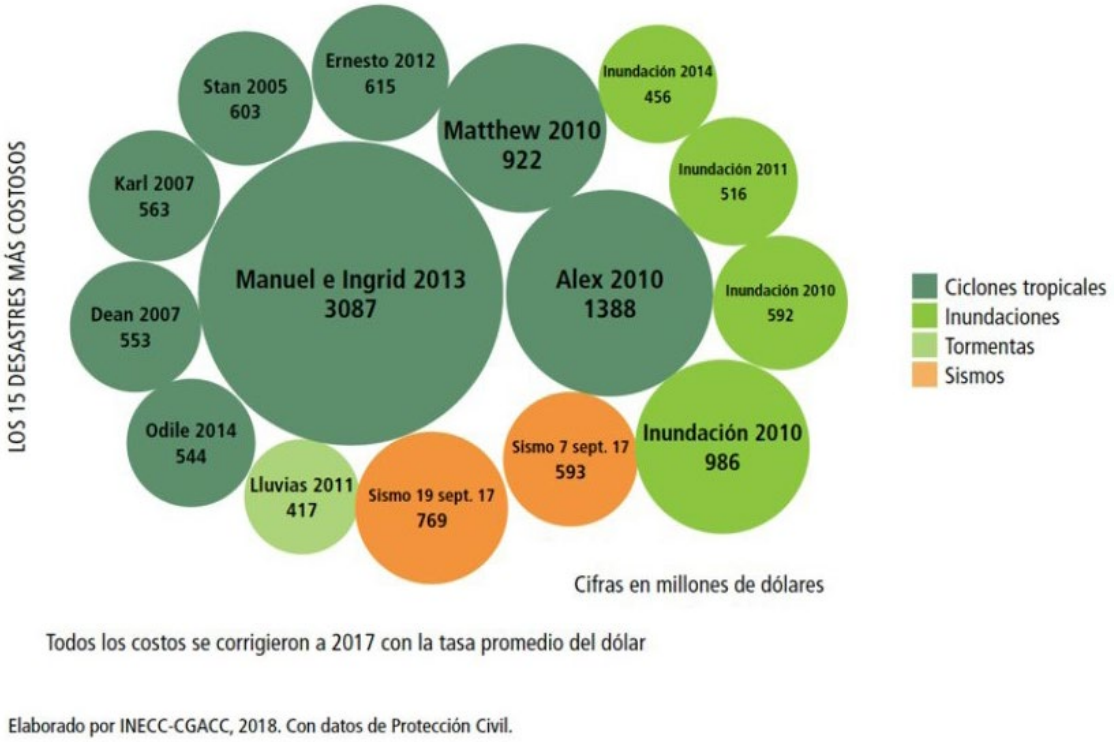
Prácticamente desde el comienzo de la discusión a nivel internacional sobre el problema del CC, que bien puede remitirse a la Convención Marco de las Naciones Unidas ocurrida en 1992, se veían escenarios con las graves consecuencias de éste sobre los seres humanos, particularmente en las regiones con mayor pobreza, colocando el acento desde entonces en el incremento de las desigualdades, la fragilidad de los ecosistemas naturales, la pérdida de la biodiversidad, el incremento de temperatura, el mayor número de ocurrencia de lluvias extremas en algunas regiones y de sequía en otras (Botero, 2015), estos y otros efectos ya han ocurrido, el destino nos alcanzó y estos temas pasaron de ser escenarios a convertirse en realidad.

La postura de las autoras es que los desastres no son naturales, sino socialmente construidos, por lo que es importante aclarar que cuando en el texto se utilice "desastres naturales" es porque la fuente consultada así lo denomina, por ello se incluye la referencia como en el caso de UNDRR (2015) que utiliza esta categoría.

De acuerdo con el sitio oficial del país denominado "México ante el Cambio Climático" (Vidal, 2020), en los últimos 50 años la temperatura promedio se ha incrementado en 0.85 °C por encima de la normal climatológica, correspondiendo con lo reportado por expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En consecuencia, en el país se registró un mayor número de noches cálidas y una disminución de noches frías. Según este sitio, se espera que, en un horizonte al 2039, el promedio de temperatura anual suba 1.5 ºC y 2 ºC en el norte del territorio. En este mismo sitio oficial se señala que el sólo incremento en temperatura de 1ºC puede reducir el crecimiento del PIB *per cápita* nacional entre 0.77% y 1.76%.

México ante el Cambio Climático, op. Cit. también señala que la distribución de la precipitación pluvial ha variado de manera significativa en el territorio nacional, lo que impacta en los sistemas ecológicos y productivos como en la agricultura, donde ha disminuido el rendimiento de cultivos como maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo, arroz y soya, todo ello con sus consecuentes pérdidas económicas.

Hacia el año 2039, la precipitación podría disminuir de un 10 hasta un 20 % y ello resulta en aumento de sequías intensas y prolongadas, principalmente en los estados norteños. También se ha visto una mayor intensidad en ciclones tropicales, que han afectado 60% del territorio mexicano, observándose lluvias torrenciales, inundaciones y deslaves. Esto se puede constatar mediante la revisión de las declaratorias sobre desastres, donde se han destinado, entre 1999 y 2017 el 91% de los recursos previstos para su atención. Llama la atención en este rubro que, según el sitio oficial sobre cambio climático ya mencionado, por cada desastre geológico como los sismos, se contabilizaron 13 desastres relacionados con el clima y su costo fue 10 veces mayor (Figura 1).



► **Figura 1.** Los 15 desastres originados en el medio natural más costosos entre 1999 y 2017.
Fuente: Elaborado por INECC con datos de Protección Civil (2018); Vidal (2020).

El impacto del CC también se ha sentido en los océanos, donde la elevación del nivel medio del mar la elevación del nivel medio del mar ha sido de 19 cm a nivel global de 1901 a 2010. El sitio oficial ya referido establece que las zonas con mayor riesgo son las zonas costeras del Golfo de México, del Pacífico y la península de Yucatán, a lo que se suma la acidificación de los océanos provocada por la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, cuya consecuencia se manifiesta en la afectación de corales y la red trófica marina.

La crisis ambiental global ha llevado a plantear, desde la NU (2019), los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Los problemas del CC, en este marco, serán atendidos por el ODS 13, que busca adoptar medidas urgentes para combatir el CC y sus efectos, planteándose como metas:

- Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.
- Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.
- Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional en relación con la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.
- Poner en práctica el compromiso contraído por los países desarrollados, que son parte en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, con el objetivo de movilizar conjuntamente 100,000 millones de dólares anuales para el año 2020, procedentes de todas las fuentes, a fin de atender a las necesidades de los países en desarrollo, en el contexto de una labor significativa de mitigación y de una aplicación transparente, y poner en pleno funcionamiento el Fondo Verde para el Clima capitalizándolo lo antes posible.
- Promover mecanismos para aumentar la capacidad de planificación y gestión eficaces en relación con el cambio climático en los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo, centrándose en particular en las mujeres, los jóvenes y las comunidades locales y marginadas.

En esta panorámica de consecuencias que ya ocurren en el país, ¿a qué nos hemos comprometido para lograr el ODS 13? ¿Qué acuerdos internacionales hemos firmado? ¿Con qué herramientas normativas y financieras realmente se cuenta?

Para responder estas interrogantes se hizo una revisión documental, sistematizando y analizando la información obtenida en publicaciones, plataformas oficiales sobre el tema en cuestión, normatividad y reportes[1]. La herramienta utilizada para el análisis fue la matriz de contenido construida a partir de las siguientes categorías de análisis: compromisos de México en relación el ODS 13, acuerdos internacionales firmados por México, instrumentos normativos e instrumentos financieros en relación con la GIRD y el cambio climático.

Acuerdos internacionales y normatividad en México

En el Acuerdo de París de 2015 para reforzar la respuesta ante la amenaza del cambio climático, México se comprometió a limitar el aumento de temperatura de la Tierra a menos de 1.5º C, a reducir 22% de los gases de efecto de invernadero (GEI) y 51% de carbono negro, indicando que las emisiones de GEI llegarían a su pico en 2026 y

[1] En las siguientes secciones del documento se da cuenta de cada normatividad, publicación, plataforma oficial y reporte considerado para el análisis.

de ahí empezarían a disminuir. También a generar 35% de energía de fuentes limpias para 2024 y 43% para 2030, así como disminuir a la mitad el número de municipios más vulnerables al CC (IMCO, 2016).

El 21 de septiembre de 2016, el Senado mexicano ratificó este acuerdo suscrito por 195 países, lo que obliga a su cumplimiento, que también se alinea con el Marco de Sendai.

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) plantea cuatro prioridades, donde los Estados deben adoptar medidas específicas a nivel local, nacional, regional y mundial. Estas son: 1) la comprensión de los riesgos, 2) la gobernanza del riesgo de desastres para su gestión, 3) la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia y 4) la preparación para una respuesta eficaz en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción (UNDRR, 2015). Los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos pueden incrementar su frecuencia e intensidad de acuerdo con los escenarios de cambio climático (IPCC, 2014). Por tanto, para la atención de estas prioridades se requiere la coordinación de diversos actores clave como la academia, el gobierno, las organizaciones de la sociedad civil y las empresas, así como la disponibilidad de instrumentos financieros que permitan atender las consecuencias del cambio climático.

Respecto a la normatividad, se cuenta con al menos tres leyes que se relacionan con el CC, la Ley General de Cambio Climático, la Ley de Transición Energética y la Ley General de Protección Civil. Respecto a esta última, se ha tratado de actualizar para integrar la GIRD, habiendo un proyecto de decreto para expedir la Ley General de Gestión Integral del Riesgo de Desastres y Protección, aprobada por la Cámara de Diputados desde diciembre del año 2020, pero que a la fecha no ha sido aprobada por el Senado de la República.

Ley General de Cambio Climático (LGCC) se publicó en 2012 y su última actualización se realizó el 12 de mayo de 2022. Esta ley tiene por objeto garantizar el derecho a un medio ambiente sano, regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para México, así como las acciones para la mitigación y adaptación al CC. También considera reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas; desarrollar capacidades de respuesta al CC; fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación, así como la difusión en materia de adaptación y mitigación al cambio climático; establecer las bases para la concertación con la sociedad; promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable, de bajas emisiones de carbono y resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos asociados al CC; y establecer las bases que contribuyan al cumplimiento del Acuerdo de París. Dicha ley considera la expedición de Normas Oficiales Mexicanas (NOM), con el fin de establecer lineamientos, criterios, especificaciones técnicas y procedimientos para garantizar las medidas de adaptación y mitigación del cambio climático (Ley General de Cambio Climático, 2022). Sin embargo, a la fecha no se han expedido las NOM y el reglamento de esta ley (Reglamento de La Ley General de Cambio Climático En Materia Del Registro Nacional de Emisiones, 2014) se limita al registro nacional de emisiones, por tanto, no considera la adaptación.

La Ley de Transición Energética (LTE): "La LTE de 2015 mandata a la SENER a fijar metas para una participación mínima de las energías limpias en la generación de energía eléctrica: 25% para 2018, 30% para 2021 y 35% para 2024. Y tampoco se cumpliría el acuerdo de la SENER para la actualización de la Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios, de enero de 2020, que establece que para 2033 y 2050 las energías limpias deberán generar 39.9% y 50%, respectivamente, de la energía eléctrica total" (Vidal, 2020).

La Ley General de Protección Civil expedida en 2012, cuya última actualización es de mayo de 2021, "tiene por objeto establecer las bases de coordinación entre los distintos órdenes de gobierno en materia de protección civil. Los sectores privado y

social participarán en la consecución de sus objetivos. Las autoridades fomentarán la cultura en materia de protección civil entre la población, mediante su participación individual y colectiva y las políticas públicas en materia de protección civil priorizarán el fomento de la participación social". A través de sus artículos se busca la transparencia activa, la participación en asuntos ambientales, así como en planes, programas y políticas (Ley General de Protección Civil, 2021).

Instrumentos financieros, programas y proyectos para atender compromisos de México frente al cambio climático

Posterior al decreto de extinción del FONDEN en 2020, el gobierno federal se comprometió a atender las emergencias con el presupuesto proyectando para 2022, transferencias del Ramo 23 por 9.2 mil millones de pesos, que, aunque así sean clasificadas pueden no dirigirse al propósito de la GIRD, están como una especie de "caja chica" para reaccionar ante un desastre, pero no tienen lineamientos de operación y es incierto su manejo y asignación. Esos recursos dependerán de que el programa presupuestario cuente con dinero disponible el año en cuestión, esto es, ocurre si y sólo si los ingresos de la Secretaría de Hacienda estén bien respecto de los estimados, pero no prevé las eventualidades y la liquidez del gobierno. Alcántara-Ayala *et al*. (2019) proponen que el Sistema de Gestión Integral del Riesgo de Desastres se fundamente en los principios de eficiencia y equidad, integralidad, transversalidad, corresponsabilidad y rendición de cuentas. Sin embargo, no todos estos principios se consideraron en la reforma de la LGCC de 2022 y las nuevas disposiciones limitan el cumplimiento de algunos de ellos.

En agosto de 2021 se publicó el Programa de Atención de Emergencias por Amenazas Naturales que, en teoría, substituye las reglas de operación del FONDEN. La herramienta que contempla Hacienda para reemplazar al FONDEN es un seguro de daños ocasionados por desastres naturales, llamado Seguro Catastrófico, cuya vigencia al menos desde su nacimiento, es del 5 de julio de 2021 al 5 de julio de 2022 y es hasta por la cantidad de 5 mil millones de pesos. Además, funciona en desastres que malamente este seguro sigue llamando "naturales", cuando superen un mínimo de daños de 275 millones de pesos y un acumulable de 750 millones de pesos. Además, se considera un bono catastrófico por 485 millones de dólares para pérdidas ocasionadas por sismos y ciclones tropicales, vigente hasta marzo de 2024 y es contratado por el World Bank. Sin embargo, el uso de este tipo de bonos y seguros no es algo nuevo, realmente se han usado desde 2006 para complementar el FONDEN (México Evalúa, 2021). De tal manera que si estas herramientas (bonos y seguros) se usan hace tiempo como complemento del FONDEN, el usarlos ahora, por sí solos, lógicamente no podrían substituir el FONDEN en su totalidad.

El FONDEN, se consideró un ejemplo exitoso de esquema de gobierno que a la par apoyaba mecanismos para la asistencia de desastres y medidas de prevención. Además incorporaba mejoras continuas con base en las lecciones aprendidas a través del tiempo (GFDRR, 2019). De hecho, a decir del World Bank (2020), "el Fonden era uno de los vehículos más avanzados para gestionar desastres naturales, ya que contaba con reservas propias y se complementaba con Bonos Catastróficos contratados en 2006, 2009, 2012, 2017 y 2018".

El análisis del FOPREDEN destinado a proyectos hidrometeorológicos para el periodo 2004-2013, mostró que se autorizaron fondos fundamentalmente para la construcción y reconstrucción de obras viales, de drenajes y de control de inundaciones. También para estudios y monitoreo de riesgos hidrometeorológicos, la capacitación y el equipamiento del personal de protección civil, campañas para impulsar la cultura de prevención, así como sistemas de alerta (López-Cerdán & Travieso-Bello, 2018). Sin embargo, ante la extinción de este fondo en 2020, existe incertidumbre en el financiamiento de las accio-

nes de prevención. Por tanto, esta situación podría limitar el cumplimiento del Marco de Sendai, donde la gobernanza es una prioridad inaplazable para reducir el riesgo, ya que ésta implica la interrelación entre actores de los sectores social, privado, gubernamental y académico para deliberar y acordar asuntos de interés público y sin duda el riesgo es un tema de interés público. Se han realizado algunas acciones como la creación, en el año 2022, del Comité Nacional de Prevención, que se presenta como un mecanismo de gobernanza al plantearse como un espacio de consulta, coordinación, participación informada y toma de decisiones, tratando de transitar de una visión reactiva dominante, hacia un énfasis en la prevención, sin embargo en su decreto de creación no se presentan figuras y vías específicas de participación para la toma de decisiones (DOF, 2023.). Este panorama es un llamado para actuar de manera directa sobre las causas, los factores subyacentes y los impulsores del riesgo como lo señala la UNDRR (2021).

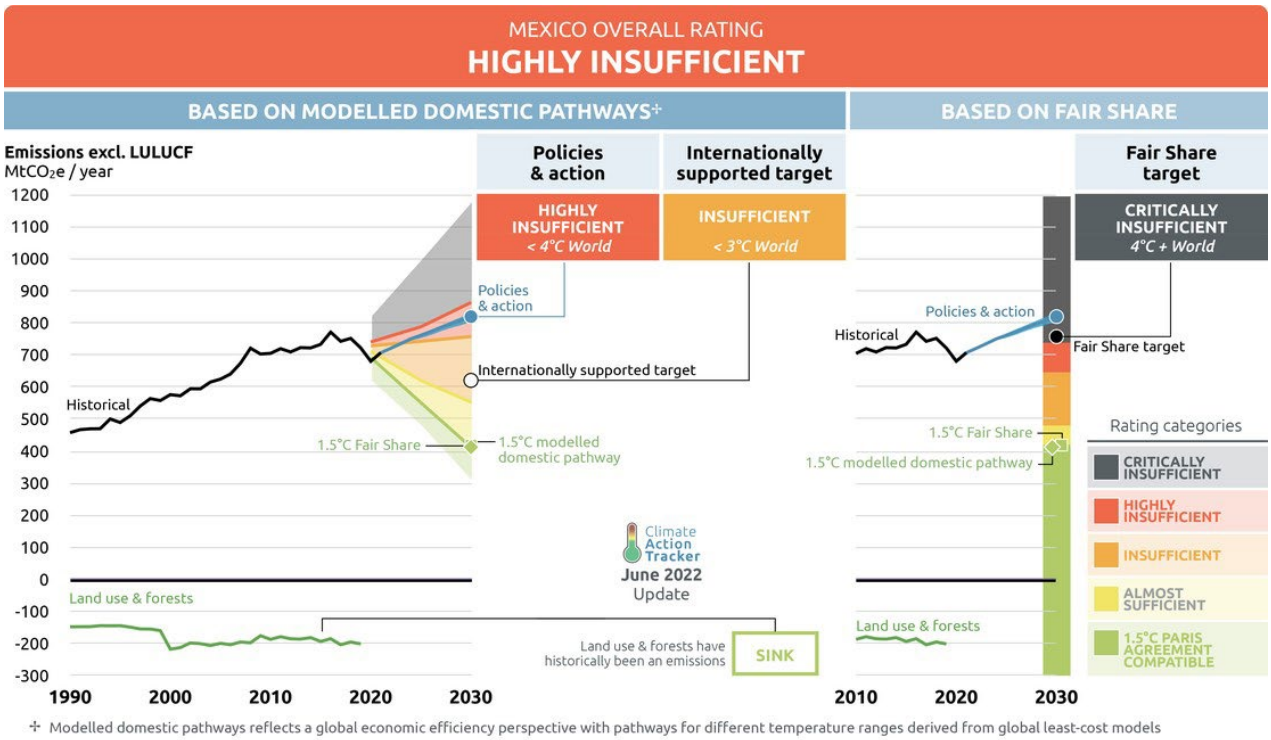
Entre las capacidades y herramientas con las que se cuentan están la Estrategia Nacional de Cambio Climático que contempla, entre otros, el Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024, el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático, la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), el explorador de cambio climático y Biodiversidad (ECCBio), el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y el Sistema de Información sobre el Cambio Climático (SICC). De estos, hay que señalar que, hasta agosto del 2022, Climático no se ha monitoreado, ni evaluado el cumplimiento del Programa Especial de Cambio Climático. Por otra parte, el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático, en su primera versión del año 2016, iba dirigido principalmente al sector agropecuario, sin embargo, en la edición de 2019 ya incorporó los asentamientos humanos en cuanto a vulnerabilidad por inundaciones, deslaves y dengue (INECC, 2018). Por su parte, La CICC, integrada por 14 secretarías de Estado, registra su última reunión en el año 2015.

En cuanto a los instrumentos referidos, el ECCBio, a cargo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), tiene datos de precipitación y temperatura hasta el año 2009 (CONABIO, 2023); el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero data del año 2015 (INECC, 2018) y el SICC, a cargo de INEGI, también tiene datos desactualizados, por ejemplo, datos sociodemográficos del año 2010, cuando ya se cuenta con información para el 2020. Esto muestra un SICC al que no se le está prestando la suficiente atención, como al resto de los instrumentos referidos, lo que tal vez es un signo de que no es un tema prioritario para la política pública de México (INEGI, 2024).

La decisión de favorecer la generación de energía a partir de combustibles fósiles en vez de energía renovable se evidencia en las estrategias que sobre el tema se desarrollan en el país. Cabe señalar que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) destinó sólo 2.8% para proyectos de energía renovable de su presupuesto total para programas y proyectos de inversión en el año 2021, pero se destinaron, desde la Secretaría de Hacienda a Petróleos Mexicanos (PEMEX), 45 mil 50 mdp para la construcción de la Refinería Dos Bocas en Tabasco, para la generación de combustibles fósiles.

En julio de 2022, El Climate Action Tracker (CAT, 2022), que realiza análisis científicos independientes, calificó como "muy insuficiente" el avance de México respecto al cumplimiento del Acuerdo de París y, con ello, cada vez más lejano el logro del ODS. Esto significa que lo que se está haciendo para atender los compromisos al 2030 no es consistente para lograr mantener la temperatura por debajo de 1.5 °C, sino que, por el contrario, las acciones actuales podrán conducir a un incremento de temperatura entre 3 ºC y 4 ºC. También señala que las políticas actuales del país continúan dirigiéndose en sentido contrario a lo comprometido, vamos en retroceso con la actual política que desdeña las energías limpias e invierte prioritariamente

una gran cantidad de recursos para la generación de combustibles fósiles. Además, prácticamente se están desmantelando instituciones que habían logrado avanzar en el combate a la crisis climática, como es el caso del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), regresándolo a un nivel inferior de actuación al reincorporarlo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), demeritando así los avances en la materia y, con ello, el cumplimiento de las metas al 2030 se observa cada vez menos probable (CAT, 2022) (Figura 2).



► **Figura 2.** México en el cumplimiento de compromisos firmados en el Acuerdo de París.
Fuente: CAT (2022).

Consideraciones finales

A pesar de que México está entre los países con alto riesgo de desastres, y que nuestra normatividad contempla leyes y reglamentos bien planteados para la atención de este tema, incluido lo que respecta al CC, las acciones que se están realizando distan del propósito de prevención y minimización de riesgos de desastre asociados al CC.

La teoría de la GIRD contiene los elementos necesarios para cumplir su propósito en lo conceptual y, una vez que la Ley General de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil se promulgue, se espera que también esto contribuya desde lo normativo. Sin embargo, actualmente en su operatividad no cuenta con los instrumentos que se requieren para ello y como resultado del análisis realizado se observa que hay diferencias importantes entre la teoría y la norma, las cuales avanzan a ritmos diferentes.

Otro aspecto relevante es la extinción de los principales instrumentos financieros (FONDEN y FOPREDEN), que se tratan de substituir con bonos y seguros que se usaban en el pasado para complementar el FONDEN y proponiéndolos ahora como algo novedoso, por lo que se considera un retroceso de al menos 20 años en cuanto a la GIRD. Esto pone en peligro la GIRD y el cumplimiento de los acuerdos internacionales signados por México para enfrentar el cambio climático.

Es evidente que la Ley General de Protección Civil vigente, que data del año 2012 y ha tenido algunas modificaciones, no incorpora la GIRD. Además, la propuesta de ley sobre la materia que sí incorpora elementos de la GIRD está en el limbo desde 2020 y no hay claridad sobre avances en su publicación.

De igual manera, el recorte en el presupuesto de egresos de la Federación de los años 2021 y 2022 a los esfuerzos de mitigación de gases de efecto invernadero y a la adaptación para atender la crisis climática, dificulta y hasta pudiera imposibilitar el cumplimiento de los acuerdos internacionales firmados por México. Actualmente no se cuenta con un fondo financiero objetivo, que prevenga y mitigue los riesgos de desastre.

Las capacidades y herramientas para enfrentar el impacto del CC, en cuanto a su conceptualización e integración, ciertamente son totalmente pertinentes y adecuadas, el problema es que no se están actualizando, no se les está prestando atención, lo que es un signo evidente de la poca importancia que se le está dando al tema.

La conclusión final es, entonces, que México está realmente rezagado en cuanto a la GIRD y la atención al tema de CC, con respecto a lo que nuestra propia normatividad indica y los compromisos contraídos a nivel internacional.

» Referencias bibliográficas

Botero, E. U. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina . In *Estudios del Cambio Climático en América Latina*. (pp. 15-20). CEPAL. https://repositorio.cepal.org/entities/publication/708d43a0-ef64-41f9-9ff7-ca8ae75d8c0e

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgcc.htm

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). Ley General de Protección Civil. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.gob.mx/ indesol/documentos/ley-general-de-proteccion-civil-60762

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2014). Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en Materia del Registro Nacional de Emisiones. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.gob.mx/inecc/documentos/reglamento-de-la-ley-general-de-cambio-climatico-en-materia-del-registro-nacional-de-emisiones?state=publishedhttps://www.gob.mx/inecc/documentos/reglamento-de-la-ley-general-de-cambio-climatico-en-materia-del-registro-nacional-de-emisiones?state=publishedhttps://www.gob.mx/inecc/documentos/reglamento-de-la-ley-general-de-cambio-climatico-en-materia-del-registro-nacional-de-emisiones?state=published

CENAPRED. (2020). Gestión Integral del Riesgo de Desastre. Nueva visión de la protección civil. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/605696/TEMA_2_GESTION_INTEGRAL_DEL_RIESGO.pdf

IMCO. (2016, April 22). México ratifica el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático. Centro de Investigación In *Política Pública*. https://imco.org.mx/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/

INECC. (2018, May 18). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero

IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014. Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.; Final). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Lavell, A. (2010). *Gestión Ambiental y Gestión del Riesgo de Desastre en el Contexto del Cambio Climático: Una Aproximación al Desarrollo de un Concepto y Definición Integral para Dirigir la Intervención a través de un Plan Nacional de Desarrollo*. https://www.desenredando.org/public/2013/2010-09-26_DNP_Lavell_DocumentoConceptual_GestionDelRiesgo.pdf

Narváez, L., Lavell, A., & Pérez-Ortega, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos* (Primera Edicción). Secretaría General de la Comunidad Andina.

NU. (2019). Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectoS. In *Objetivos Del Desarrollo Sustentable* . https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/

OECD. (2013). *Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264200210-es

ONU. (2019, July 17). *La población mundial sigue en aumento, aunque sea cada vez más vieja*. Noticia ONU. https://news.un.org/es/story/2019/06/1457891

UE, PC, AH, ONU, INFORM, & CEPREDENAC. (2018). Índice de Gestión de Riesgos para América Latina y El Caribe. In *Actualización INFORM-LAC 2018*. https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/Portals/0/InfoRM/2020/Subnational/LAC/LAC_INFORM_2020_v007_MainResults_Spa.pdf

UNDRR. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Naciones Unidas. Oficina de Las Naciones Unidas Para La Reducción Del Riesgo de Desastres. https://www.undrr.org/es/implementando-el-marco-de-sendai/que-es-el-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de

Vidal, O. (2020, November 14). México y el Acuerdo de París sobre cambio climático. *El Universal*. https://cambioclimatico.gob.mx/acuerdos-internacionales

5.4 Los ODS y los desastres hidrometeorológicos del 2019 en el estado de Veracruz: caso maíz en grano

Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez
El Colegio de Veracruz, México

Fernando Salas-Martínez
El Colegio de Veracruz, México

Palabras Clave: rendimiento, maíz, sequía.
ODS: 1 y 13 Fin de la pobreza y Acción por el Clima.

Introducción

Los ODS en el estado de Veracruz

Los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) fueron establecidos en 2015 por los estados miembros de las Naciones Unidas, como parte de la Agenda 2030. Su finalidad consiste en contribuir al fin de la pobreza, la protección del planeta y la mejora en la vida de todos sus habitantes. Los ODS son 17: 1) fin de la pobreza, 2) hambre cero, 3) salud y bienestar, 4) educación de calidad, 5) igualdad de género, 6) agua limpia y saneamiento, 7) energía asequible y no contaminante, 8) trabajo decente y crecimiento económico, 9) industria, innovación e infraestructura, 10) reducción de las desigualdades, 11) ciudades y comunidades sostenibles, 12) reducción y consumo responsables, 13) acción por el clima, 14) vida submarina, 15) vida de ecosistemas terrestres, 16) paz, justicia e instituciones sólidas y 17) alianza para lograr los objetivos (ONU, 2015).

México, como país firmante de la agenda 2030 y de los ODS, estableció el Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, el cual debe dirigir sus esfuerzos para el cumplimento nacional de los objetivos (SEGOB, 2022). A nivel estatal, para el estado de Veracruz, los ODS se plasman también en el Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024 (PROGOB, 2019), donde se menciona que el plan se alinea a la agenda 2030, considerando las metas nacionales y nueve ODS definidos para la entidad, los cuales son: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11 y 17.

En este sentido, los objetivos 1 y 11 (hambre cero y ciudades y comunidades sostenibles) se pueden ver comprometidos antes los desastres hidrometeorológicos que aquejan a la entidad.

Desde la perspectiva agrícola, si los sistemas agrícolas son afectados por desastres hidrometeorológicos, se pone en riesgo no sólo la alimentación, sino también la salud y el bienestar de los productores que contribuyen a las economías locales. Mientras que una comunidad no sostenible será más vulnerable a estos eventos. Además, se debe considerar que el plan debiera también incluir al ODS 13 (acción por el clima), ya que la ubicación del estado de Veracruz lo convierte en un territo-

rio que periódicamente es afectado por ciclones tropicales, como los más recientes ocurridos en 2007, 2011, 2013 y 2017; y sequías, como las registradas en 2003, 2011 y 2019 (De la Rosa *et al*., 2021; Salas-Martínez *et al*., 2021; Valdés-Rodríguez *et al*., 2021). Especialmente en el año 2019 se registró la mayor cantidad de declaratorias de emergencia o desastre por sequía y se alcanzó la categoría más alta para este fenómeno (sequía excepcional), de acuerdo con el Monitor de Sequía de México (SMN, 2023). Lo que coincide con que no reportó presencia de huracanes en la región (CENAPRED, 2023). Además de que, de acuerdo con estudios anteriores sobre estos fenómenos, se ha documentado que en Veracruz los niveles de sequía han aumentado considerablemente desde el 2003 hasta el 2019, mientras que las precipitaciones disminuyeron del 2015 al 2019 (Valdés-Rodríguez *et al*., 2021, 2023). Considerando las características especiales del 2019 y su marcado contraste con las registradas en el 2018, donde sí se registraron fenómenos con lluvias excesivas e inundaciones (CENAPRED, 2023). El objetivo de esta investigación es evaluar los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos sobre la producción agrícola de maíz en grano del estado de Veracruz durante los años 2018 y 2019, así como sus implicaciones en los Objetivos del desarrollo sostenible de la Agenda 2030.

Metodología

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde al estado de Veracruz, el cual se ubica geográficamente entre las latitudes 17°03´a 22°27´ norte y longitud 93°36´a 98°36´oeste, en el centro de la vertiente del Golfo de México. Colinda con los estados de Tamaulipas, Oaxaca, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y cuenta con 212 municipios (INEGI, 2021). En términos agrícolas, Veracruz es líder en diversos productos agrícolas y ganaderos. Específicamente, para el cultivo de maíz en grano, el estado es una de las entidades federativas con mayor número de hectáreas sembradas (586,174.99 ha) y uno de los 10 primeros con mayor producción nacional, de acuerdo con estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022) (Figura 1).

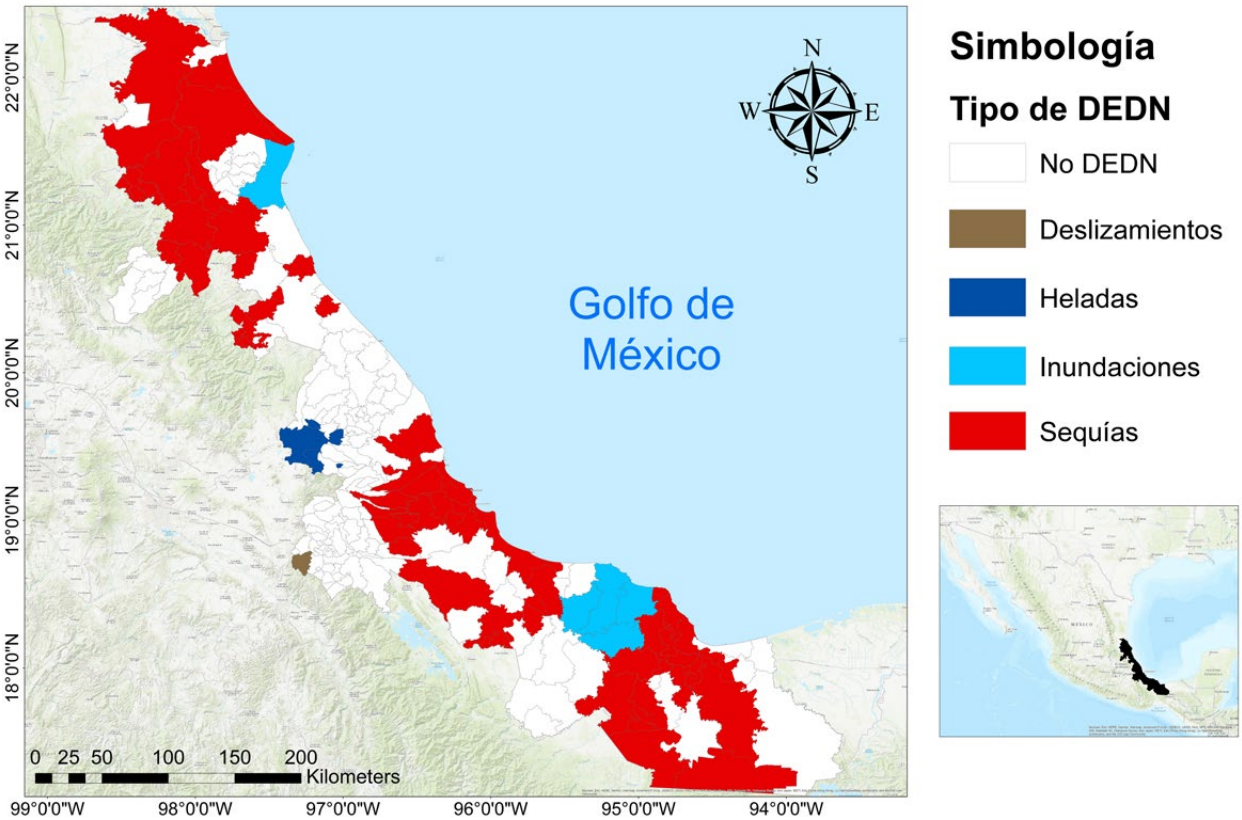
Declaratorias de Emergencia por Desastre Natural (DEDN)

La información de las DEDN se obtuvo de la base de datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la cual se encuentra a nivel nacional, por entidad federativa, para cada municipio y por tipo de fenómeno que origina la declaratoria. Esta información se comenzó a generar a partir del año 2000 y actualmente se encuentra vigente. Para este estudio sólo se tomó la información generada para el 2018 y 2019 (Tabla 1), por ser estos años dos extremos comparativos entre el mayor número de declaratorias por sequía y la nula declaración de las mismas (CENAPRED, 2023). Es importante mencionar que sólo se seleccionaron los municipios en donde la fecha de inicio del fenómeno que generó la DEDN estuviera dentro del 2019 y no presente en 2018.

Datos agrícolas

Los datos agrícolas se obtuvieron del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), a cargo de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), los cuales se encuentran disponibles para su manejo público. Dicha información se genera a nivel nacional, por entidad federativa, por cada municipio y tipo de cultivo (SIAP, 2022). De la información se seleccionó la variable de rendimiento (ton/ha) del cultivo de maíz en grano de temporal, para los ciclos agrícolas primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI). Lo anterior se debió a que se quiso determinar qué tipo de fenómeno afecta en mayor grado al rendimiento del maíz en grano y

en qué tipo de ciclo agrícola se reportan las mayores afectaciones. Se consideraron los años 2018 y 2019, el primero por ser un año sin DEDN y el segundo por tener DEDN para cada fenómeno. Lo anterior se hizo para tener una comparación de las afectaciones de los fenómenos en el rendimiento del maíz.



► **Figura 1.** Zona de estudio (estado de Veracruz). Los diferentes colores indican la presencia de una Declaratoria de Emergencia por Desastre Natural (DEDN) emitida en cada municipio en el año 2019.

Fuente: Elaboración propia con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (2020).

Tabla 1. Rendimientos de maíz en grano y declaratorias emitidas por fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Veracruz durante los años 2018 y 2019.

Año	Rendimiento de maíz	Lluvias	Ciclones	Inundaciones	Nevadas y heladas	Sequías	Deslizamientos
2018	2.2 ton/ha	103	0	17	1	7	0
2019	2.0 ton/ha	8	0	5	3	68	1

Fuente: Elaboración propia con datos compilados de estadísticas del CENAPRED (2023).

Análisis de los datos

Para poder estimar las variaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en grano en un año con DEDN (año 2019) y otro en donde no se mostrarán afectaciones por fenómenos climáticos (año 2018) y para cada ciclo agrícola, se propuso la siguiente fórmula:

$$Var = R2019 - R2018 \quad (1)$$

Donde *Var* representa la variación en el rendimiento del cultivo de maíz en grano (ton/ha), *R2019* indica el rendimiento de maíz en grano para el año con DEDN en 2019 y *R2018* indica el rendimiento del maíz en el año 2018. El procesamiento

de la información estadística del rendimiento fue analizado mediante el programa Excel 2019 de Microsoft Office. Los mapas de la distribución de los municipios que contaban con DEDN y donde se calculó *Var* se elaboraron mediante el sistema de información geográfico ArcGIS, del Environmental Systems Research Institute (ESRI, por sus siglas en inglés), en su versión 10.8.

Resultados

Afectaciones por sequía

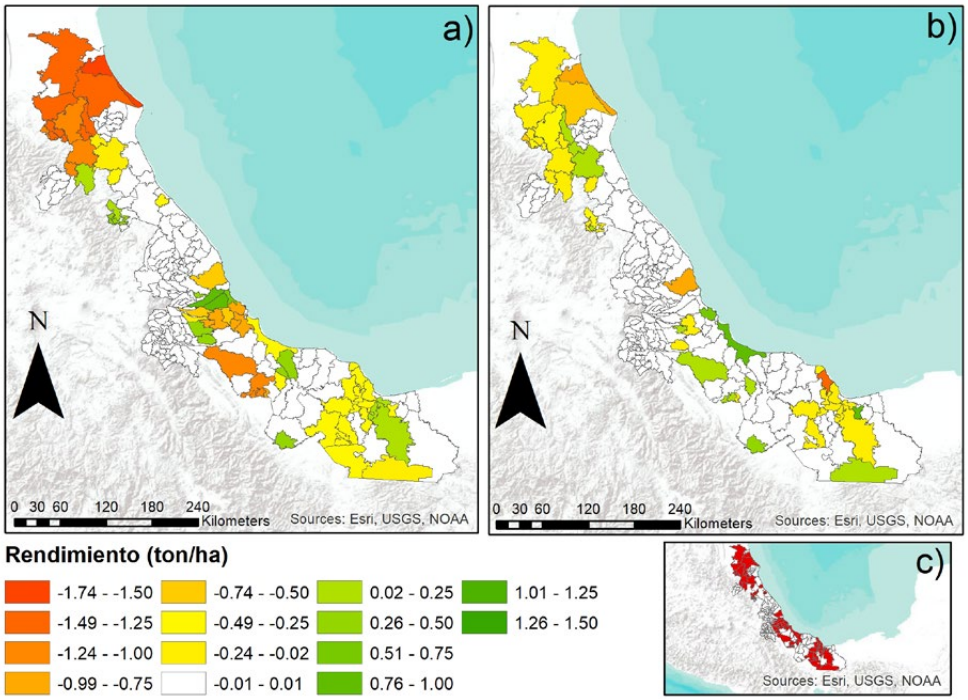
La Figura 2 describe el comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano para el fenómeno de sequía. En el caso del ciclo agrícola PV, se muestra que en todo el estado se registraron afectaciones por sequía, siendo la región norte y centro en donde se reportaron mayores reducciones en el rendimiento del maíz (-1.74 a -1.00 ton/ha). La región sur del estado también mostró reducciones, pero en menor grado en comparación con la zona norte y centro (-0.49 a -0.25 ton/ha). Adicionalmente, se reportó un número menor de municipios en los cuales se presentaron aumentos en el rendimiento del maíz (0.2 a 1.50 ton/ha). Estos municipios se encuentran distribuidos en mayor grado en la zona centro y sur del estado (Figura 2a). Con respecto al ciclo agrícola OI, se encontró que la zona norte y sur son las que presentaron mayores reducciones de maíz (-0.02 a -1.49 ton/ha). Aunque los municipios que presentaron aumentos (0.02 a 1.25 ton/ha) se distribuyeron en todo el estado (Figura 2b). Es importante resaltar que el ciclo agrícola PV es el que se vio mayormente afectado por la sequía en el rendimiento del maíz, con un decremento promedio de 0.32 ton/ha. La zona norte fue la más vulnerable al fenómeno de sequía, ya que en estos municipios se obtuvieron reducciones en el rendimiento de los dos ciclos productivos. En OI se registró un promedio de -0.24 ton/ha, mientras que en PV la producción decrementó 1.32 ton/ha.

Afectaciones por deslizamientos

La Figura 3 describe el comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano para los municipios con DEDN por deslizamientos. Se muestra que solo un municipio en todo el estado reportó afectaciones por el fenómeno y este fue Acultzingo. Dicho municipio se encuentra localizado en la zona central montañosa del estado y es colindante con el estado de Puebla. Se encontró que las reducciones en el rendimiento del maíz fueron de -0.02 a -0.24 ton/ha para el ciclo agrícola PV (Figura 3a). Por otro lado, para el ciclo de OI, el municipio no contó con producción para dicho periodo, por tal motivo no se pudo determinar el cambio en el rendimiento (Figura 3b).

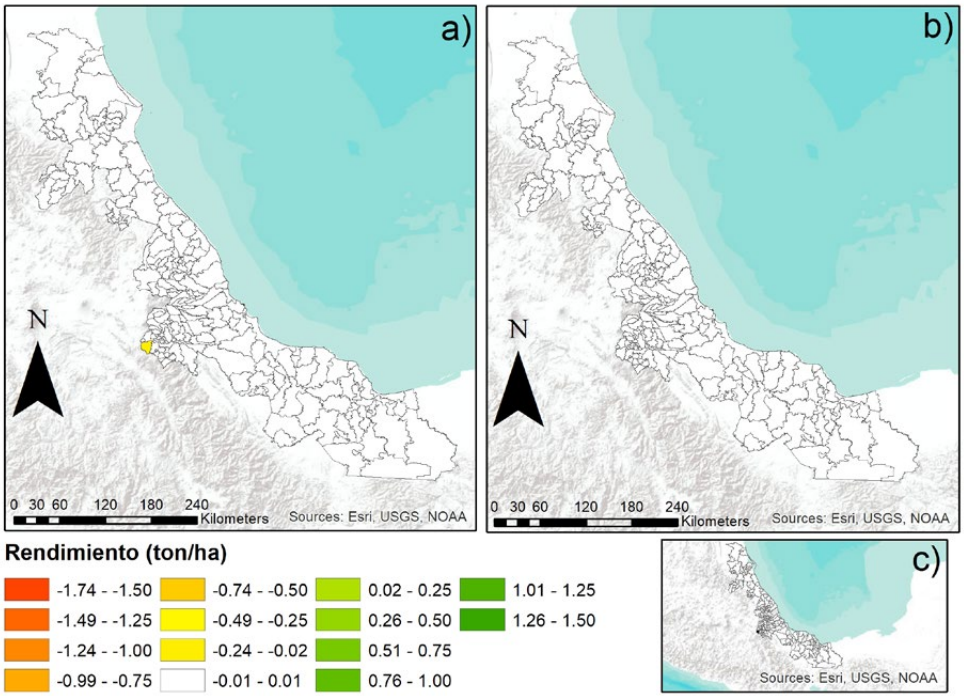
Afectaciones por heladas

La Figura 4 describe el comportamiento de los municipios con reportes de DEDN por heladas. En estas condiciones sólo cuatro municipios presentaron dicha declaratoria, estos fueron Ayahualulco, Acajete, Perote y Villa Aldama. Los anteriores municipios se localizan en las zonas más altas de la región central montañosa del estado y son colindantes con el estado de Puebla. Con respecto al ciclo agrícola PV, se muestra que en los municipios de Perote y Villa Aldama se presentaron aumentos en el rendimiento del maíz que van de 0.02 a 0.25 ton/ha. Adicionalmente, los municipios de Ayahualulco y Acajete reportaron reducciones en el maíz que van de -0.02 a -0.24 ton/ha (Figura 4a). Para el ciclo agrícola OI, sólo los municipios de Perote y Ayahualulco tuvieron producción de maíz para dicho ciclo y reportaron reducciones de maíz que van de -0.02 a -0.24 ton/ha (Figura 3b). Se puede considerar que las heladas sólo se presentaron en las zonas altas del estado de Veracruz, y que afectaron el rendimiento de maíz en los dos ciclos de producción.



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

► **Figura 2.** Comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano en un año con presencia de declaratorias por sequía (2019) y otro sin presencia de declaratorias por sequía (2018). El inciso **a)** indica el comportamiento de la variación para el ciclo agrícola primavera-verano, el **b)** para el ciclo otoño-invierno y **c)** las áreas rojas indican la distribución de las DEDN por sequía en el 2019.



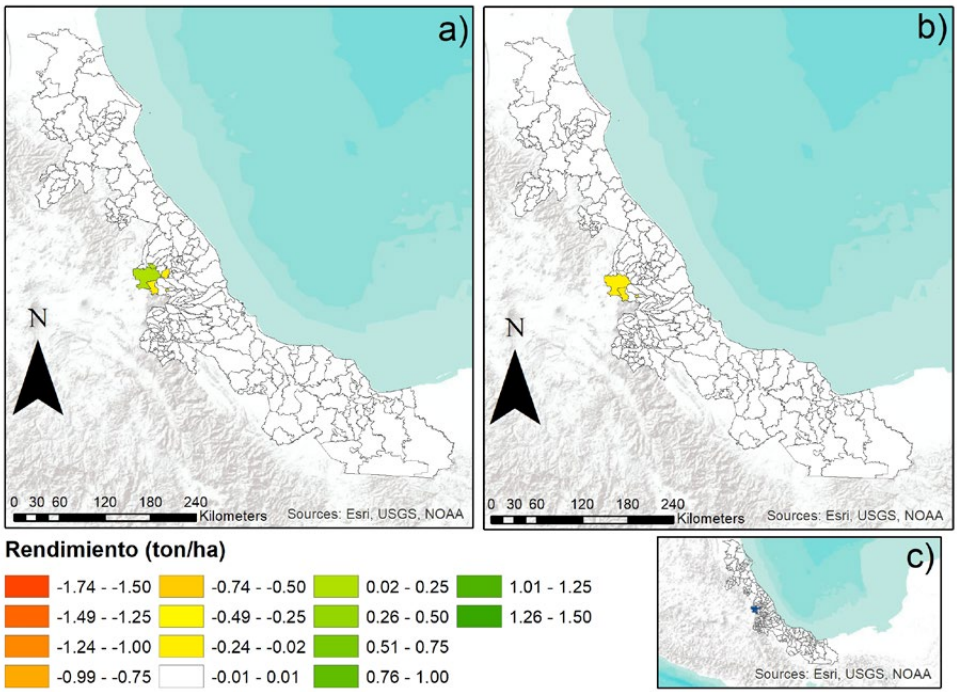
Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

► **Figura 3.** Comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano en un año con presencia de declaratorias por deslizamiento (2019) y otro sin presencia de deslizamientos (2018). El inciso **a)** indica el comportamiento de la variación para el ciclo agrícola primavera-verano, el **b)** para el ciclo otoño-invierno y **c)** las áreas negras indican la distribución de las DEDN por deslizamiento en el 2019.

Afectaciones por inundaciones

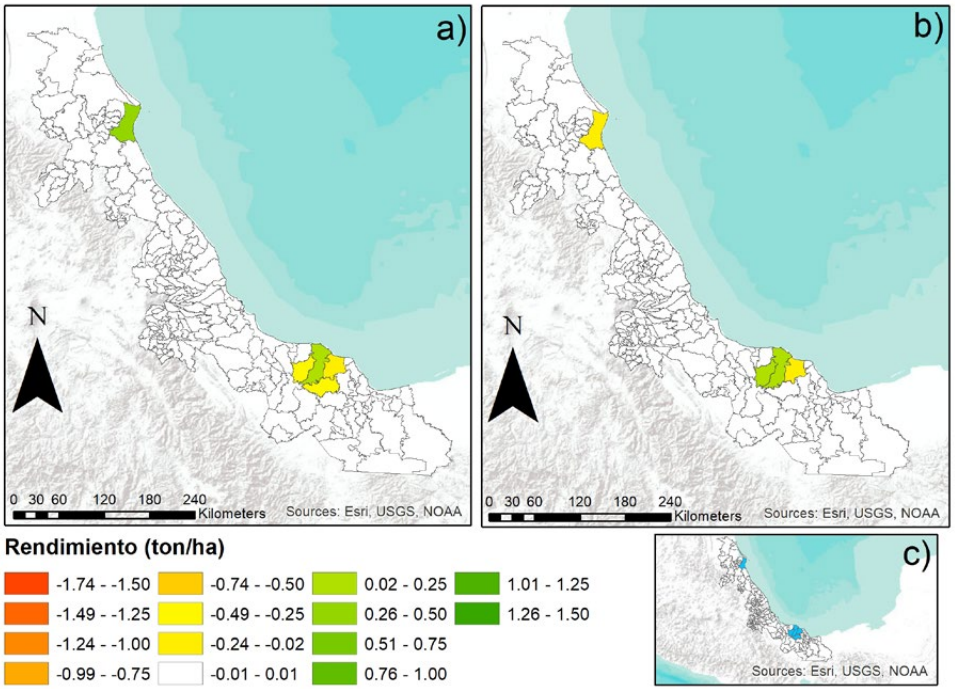
Con respecto a los municipios que contaron con reportes de DEDN por inundaciones, estos se muestran en la Figura 5. Sólo se contaron con cinco municipios afectados y estos se distribuyeron en el norte (Tamiahua) y en el sur (Catemaco, Santiago Tuxtla, Hueyapan de Ocampo y San Andrés Tuxtla) del estado. Con respecto al ciclo agrícola PV, los municipios con reducciones en el maíz se localizaron en la zona sur del estado, con decrementos desde -0.02 a -0.49 ton/ha. Sin embargo, los municipios de Tamiahua y San

Andrés Tuxtla reportaron aumentos en el maíz de 0.02 a 0.50 ton/ha (Figura 5a). Para el ciclo agrícola OI, las reducciones se localizaron en el centro y sur del estado y oscilaron entre -0.02 y -0.24 ton/ha (Figura 5b). Es importante mencionar que el municipio de Catemaco reportó reducciones para los dos ciclos agrícolas. Caso contrario sucedió con el municipio de San Andrés Tuxtla en donde se reportaron siempre aumentos en el maíz. Es importante mencionar que el fenómeno de inundación es de repuesta rápida, por lo que las afectaciones se dan al momento que se presentan el fenómeno.



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

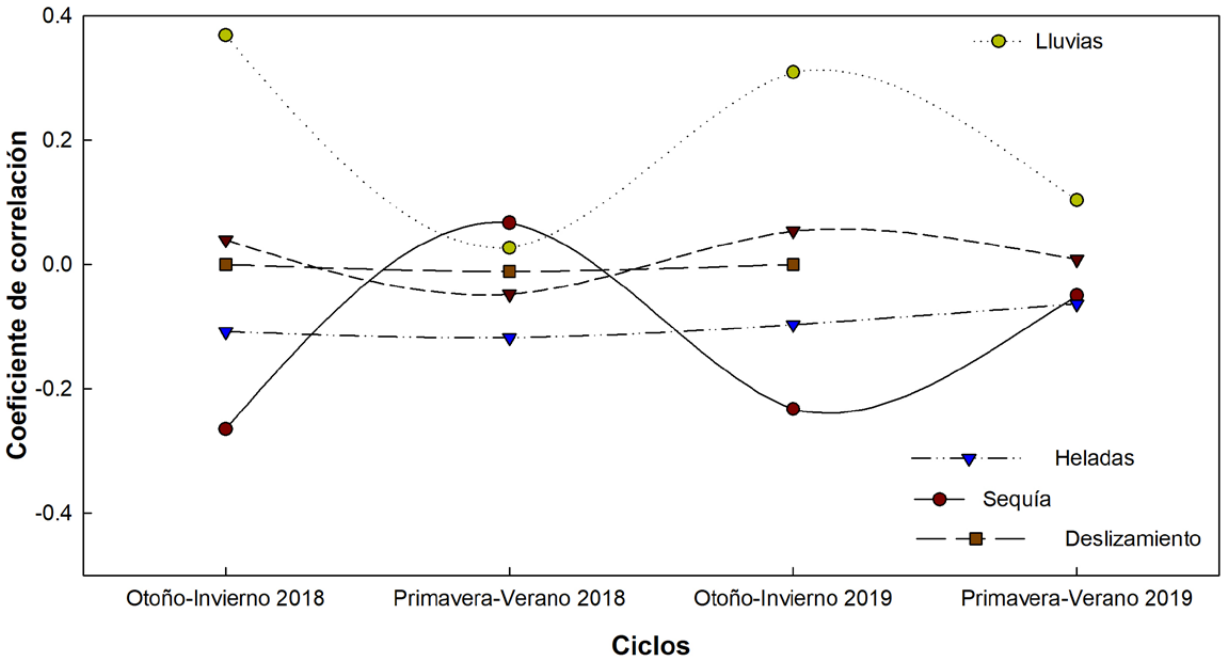
► **Figura 4.** Comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano para heladas entre el año 2018 y 2019. El inciso **a)** indica el comportamiento de la variación para el ciclo agrícola primavera-verano, el **b)** para el ciclo otoño-invierno y **c)** las áreas azul oscuro indican la distribución de las DEDN por heladas en el 2019.



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

► **Figura 5.** Comportamiento de la variación del rendimiento del cultivo de maíz en grano para inundaciones entre el año 2018 y 2019. El inciso **a)** indica el comportamiento de la variación para el ciclo agrícola primavera-verano, el **b)** para el ciclo otoño-invierno y **c)** las áreas azul claro indican la distribución de las DEDN por inundaciones en el 2019.

En la Figura 6 se muestra un compendio de las correlaciones entre las declaratorias por desastre emitidas en los municipios afectados y los rendimientos del maíz en grano por ciclo agrícola. En ella se aprecia que la sequía se correlaciona más negativamente durante los ciclos OI del 2018 y 2019, y en menor grado en el ciclo PV del 2019, mientras que las lluvias se correlacionan positivamente con la productividad agrícola del maíz durante ambos años y periodos, pero mayormente durante el ciclo OI del 2018 y 2019.



► **Figura 6.** Correlaciones entre rendimiento del maíz en grano y fenómenos que ocasionaron declaratorias de emergencia o desatre durante los años 2018 y 2019.
Fuente: Elaboración propia con datos del CENAPRED (2023) y del SIAP (2022).

Discusión

Afectaciones por sequía

De acuerdo con los resultados, de todos los fenómenos que impactaron el estado, las afectaciones por sequía fueron las que generaron el mayor número de declaratorias por desastre en el 2019. Los municipios afectados por este fenómeno ya antes han registrado situaciones similares durante los años 2003 y 2011 (CENAPRED, 2023). Los antecedentes históricos en estos municipios indican que las sequías severas, extremas y excepcionales son recurrentes en ellos desde que iniciaron los registros del Monitor de Sequía de México (SMN, 2023), aunque el 2019 fue el año que mayores niveles de sequía se han registrado desde 2003 (Valdés-Rodríguez *et al.*, 2021). Las declaratorias de desastre para 2019 se emitieron debido a las condiciones excepcionales ocurridas desde mayo hasta diciembre de ese año, cuando CENAPRED establece como criterio relevante el componente de atención al sector agropecuario (SEMARNAT, 2020). En este mismo año también se registraron decrementos de precipitaciones para el estado de Veracruz, que fueron desde -50 hasta -1000 m anuales, y ausencia de las mismas en rangos de entre 30 y hasta 90 días para los municipios afectados, de acuerdo con estadísticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021). Situaciones que afectaron diferentes cultivos que se sembraron en esa época. Específicamente para el caso del maíz, por ser este un grano de importancia alimentaria no sólo para los humanos, sino también para la ganadería

(CONABIO, 2020), las pérdidas de productividad generadas por los eventos de sequía son indicativo de que, a pesar del amplio rango de adaptabilidad de este cultivo (480 a 1500 mm acumulados), el rendimiento del mismo sí se puede ver afectado por precipitaciones menores a los 700 mm acumulados (SIAP & SADER, 2018). En este sentido, es importante notar que las sequías con intensidades severas, extremas y excepcionales pueden provocar afectaciones a los cultivos, que van desde una cierta cantidad hasta la pérdida total del producto (García-Jimenez *et al*., 2014; Salas-Martínez *et al*., 2021). Por lo que no es de sorprender que estas sequías ocasionaron que se siniestraran 63,705 ha de maíz en el estado durante este año, siendo Chicontepec y Tantoyuca, ambos municipios del norte de Veracruz, los que obtuvieron las mayores pérdidas con 10,186 y 7,740 ha, respectivamente (SIAP, 2022). Aunque también se registraron otros cultivos con pérdidas fuertes, como la soya (4,912 ha) y el sorgo (4,564 ha), ambos en Pánuco. Sin embargo, fue el maíz el que presentó las mayores pérdidas.

Por lo que tanto las hectáreas siniestradas como la disminución de la productividad del grano son indicativos de afectaciones en los sistemas agrícolas, con lo cual se afectan directamente el ODS 2 (hambre cero) y el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), ya que los sistemas agroalimentarios son básicos para la sobrevivencia y autosuficiencia alimentaria, así como también son medios de vida de quienes se dedican a las actividades agrícolas y pecuarias (ONU, 2015).

Afectaciones por deslizamientos

Las afectaciones por deslizamientos fueron las que menos municipios afectaron, con solamente uno en todo el estado. El municipio en cuestión, Acultzingo, es susceptible a deslizamientos debido a que se localiza en la zona montañosa correspondiente a la sierra Madre Oriental (INEGI, 2018). Mientras que para el año 2019 no se registraron hectáreas siniestradas en este municipio, por lo que se considera que este fenómeno es el que menor impacto tuvo en el cultivo y rendimiento del maíz en grano en el estado de Veracruz.

Afectaciones por heladas

Después de los deslizamientos, las heladas fueron las que menos afectaciones ocasionaron en el estado. Esto debido a que 94.5 % del territorio veracruzano posee clima cálido subhúmedo y cálido húmedo, y sólo el 5 % presenta climas templados o fríos (INEGI, 2021). Todos los municipios afectados por heladas (Ayahualulco, Acajete, Perote y Villa Aldama) se localizan por arriba de los 2,300 m sobre el nivel del mar (msnm), y poseen climas que van desde templado húmedo hasta semifrío subhúmedo (INEGI, 2018). Periódicamente estos municipios registran heladas, nevadas y granizadas, siendo Perote (4200 msnm) el municipio con mayores afectaciones y con el menor rango de temperatura promedio (CENAPRED, 2023; INEGI, 2018). Para el 2019 se registró el frente frio número 29 (17-21 de enero del 2019), el cual provocó descensos de temperatura de hasta -15°C, lo que combinado con la escasa humedad provocaron heladas sobre la zona montañosa central del estado, donde se ubican los municipios con declaratorias. Es importante mencionar que en enero del año 2019 se presentaron 12 frentes fríos, seis más que los reportados en la climatología de 1981-2010 (CONAGUA, 2020). No obstante, durante el 2019 no se registraron hectáreas siniestradas de maíz (SIAP, 2022), por lo que se puede establecer que las heladas sólo lograron disminuir el rendimiento del maíz.

Afectaciones por inundaciones

Después de las sequías, las inundaciones fueron las que mayores afectaciones causaron en el estado durante el 2019. Las declaratorias por inundaciones se registraron durante los meses de octubre y noviembre y fueron ocasionadas por el ciclón poten-

cial 17-E que afectó las costas de Oaxaca, pero que ocasionó lluvias en el estado de Veracruz con valores puntuales de entre 35 y 60 mm, que impactaron en municipios del sur de la entidad. Asimismo, en el mes de octubre se registró una onda tropical y un frente frio que ocasionó un acumulado mensual de hasta 239 mm en la estación de Tres Zapotes (ver CONAGUA, 2020). Al respecto, un municipio del norte (Tamiahua) registró 162 ha siniestradas de maíz, y por su ubicación este municipio se considera más susceptible a los frentes fríos, ondas y ciclones tropicales que ingresan por norte y por el Golfo de México (CENAPRED, 2023; Ruiz-Barradas *et al*., 2010).

En general, de todos los fenómenos registrados únicamente en el 2019, que no se presentaron en el 2018, se puede establecer que la sequía fue la que mayores afectaciones causó a la cosecha y productividad del maíz de grano. Este año se caracterizó por una fuerte y generalizada sequía, con un total de 68 declaratorias por el fenómeno, mismas que no se han repetido hasta el año 2022. Comparando los decrementos en el rendimiento del maíz en grano, para este año y entre todos los fenómenos presentados, también destaca que la sequía ocasionó los menores rendimientos en el maíz (1.74 ton/ha en relación con 0.24 a 0.25 ton/ha con los otros fenómenos) y la mayor cantidad de hectáreas siniestradas, con 63,705 ha, además de tener la mayor extensión en cuanto a cantidad de municipios afectados.

Por lo que se considera que la sequía fue el fenómeno hidrometeorológico más devastador para Veracruz durante el 2019. Los daños y deterioros causados al cultivo de maíz en grano pudieron impactar el cumplimiento del ODS 1 (fin de la pobreza), al generarse pérdidas de cosechas entre los campesinos de los municipios afectados; ODS 2 (hambre cero), por ser el maíz un grano alimentario y de gran relevancia en el país (CONABIO, 2020); ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ya que la sequías severas, extremas y excepcionales ocasionan déficit de agua; ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), ya que las pérdidas y decrementos en el rendimiento del maíz en grano afectan el trabajo y la economía de los productores afectados; y, por último, el ODS 13 (acción por el clima), ya que no se ha logrado aún reducir en el estado las afectaciones que se generan por los fenómenos hidrometeorológicos.

Conclusiones

En el año 2019 en el estado de Veracruz se presentaron cuatro fenómenos que no se registraron en los mismos municipios durante el año 2018: sequía, inundaciones, heladas y deslizamientos. De todos estos, la sequía fue la que afectó el mayor número de municipios y se presentó tanto en el norte como en el sur del estado. La sequía causó también el mayor número de hectáreas siniestradas de maíz en grano y los menores rendimientos del mismo. Por lo que se considera que este fenómeno fue el más catastrófico para el estado durante el 2019, con relación al cultivo de maíz. Los efectos de la sequía incidieron negativamente sobre los ODS 1, 2, 6 y 8 de la agenda 2030.

» Referencias bibliográficas

CENAPRED. (2023). *Sistema de Consulta de Declaratorias*. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/

CONABIO. (2020). *Maíces*. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices

CONAGUA. (2020). *Reporte Anual 2019*. Sistema Meteorológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/DiagnósticoAtmosférico/Reporte del Clima en México/Anual2019

De la Rosa, A., Valdés-Rodríguez, O. A., Villada-Canela, M., Manson, R., & Murrieta-Galindo, R. (2021). Caracterizando la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrológica: Caso de estudio Veracruz, México. *Ingeniería Del Agua*, 25(3), 187-203. https://doi.org/10.4995/ia.2021.15221

García-Jimenez, F., Fuentes-Mariles, O., & Matías-Ramírez, L. G. (2014). Fascículos sequias. In *Series Fascículos* (1st ed, pp. 1-39). CENAPRED.

INEGI. (2018). Aspecto geográficos y medio ambiente. In *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2018/702825107017.pdf

INEGI. (2021). *Clima Veracruz de Ignacio de la Llave*. Cuéntame: Información Por Entidad. http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=me&e=30

ONU. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

PROGOB. (2019). Plan Veracruzano de Desarrolo 2019-2024. *Gaceta Oficial. Órgano del Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave*, número extraordinario (Tomo II). https://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2019/06/Plan-Veracruzano-Desarrollo-2019-2024.pdf

Ruiz-Barradas, A., Tejeda-Martínez, A., Miranda-Alonso, S., & Flores-Zumbido, R. (2010). Climatología. In E. Florescano & J. Ortíz-Escamilla (Eds.), *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz* (1st ed.). Gobierno del Estado de Veracruz.

Salas-Martínez, F., Valdés Rodríguez, O., Palacios-Wassenaar, O., & Márquez-Grajales, A. (2021). Reducciones sobre el rendimiento del maíz en grano en la región central de Veracruz, México. In *Ciencia y tecnología para el campo mexicano: retos y oportunidades* (pp. 1530-1541). https://www.researchgate.net/publication/358445724_Reducciones_sobre_el_rendimiento_del_maiz_en_grano_en_la_region_central_de_Veracruz_Mexico (pp. 1530–1541).

SEGOB. (2022). *Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Agenda 2030. https://www.gob.mx/agenda2030/prensa/consejo-nacional-de-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible-256994

SEMARNAT. (2020). Declaratorias de desastre natural en el sector agropecuario, acuícola y pesquero, publicadas en el Diario Oficial de la Federación y número de municipios señalados por entidad federativa y tipo de fenómeno. Consulta Temática. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D1_DESASTRE00_08&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=*

SIAP. (2022). *Estadística de Producción Agrícola*. Datos Abiertos. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php

SIAP & SADER. (2018). Aptitud agroclimática del maíz en México. https://www.gob.mx/siap/prensa/aptitud-agroclimatica-de-mexico https://www.gob.mx/siap/prensa/aptitud-agroclimatica-de-mexico

SMN. (2021). Precipitación (nacional). CONAGUA. http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&ver=mapa&o=3&n=nacional

SMN. (2023). *Monitor de Sequía en México*. Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico

Valdés-Rodríguez, O. A., Salas-Martínez, F., & Palacios-Wassenaar, O. M. (2023). Hydrometeorological Hazards on Crop Production in the State of Veracruz, Mexico. *Atmosphere*, 14(2), 287. https://doi.org/10.3390/atmos14020287

Valdés-Rodríguez, O. A., Soares, D., & Vázquez-Aguirre, J. L. (2021). Encuentros y desencuentros en la evaluaciónde la sequía en Veracruz. In *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos* (1st ed., pp. 251–260). https://b6e4eff7-10bb-4ea2-a4f1-79086599e600.filesusr.com/ugd/70ca75_45e52bae8ecb4476abd4e777b2718e5d.pdf

5.5 Agricultura 4.0: Uso de índices espectrales para la productividad, sustentabilidad y la seguridad alimentaria

María Luisa Hernández Aguilar
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Bonnie Lucía Campos Cámara
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Dalia Siboney Romero Lara
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

Dennis Sanchez Casanova
Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, México

Palabras Clave: Agricultura 4.0, NDVI, SAVI, CWSI.
ODS: 2 Hambre Cero.

Introducción

Antecedentes

La evolución de las actividades agrícolas inicia en 1950 (Melgar, 2018), antes de este periodo la "agricultura 1.0" se caracterizaba por ser intensiva y de baja productividad. En ese año inicia la revolución verde; con el mejoramiento genético, utilización de pesticidas y fertilizantes sintéticos, así como maquinaria especializada, que resultó en incrementos de la productividad ("agricultura 2.0"). La "agricultura 3.0" o agricultura de precisión, inicia en 1990 con el uso de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) en monitores de rendimiento, biotecnología y desarrollo de software para aplicaciones agrícolas. La "agricultura 4.0" inicia después de 2010, llamada la cuarta revolución industrial, originada por el impacto de las tecnologías digitales y el procesamiento de datos. El término "industria 4.0 o Cuarta Revolución Industrial", conocida por las siglas 4RI, aparece por primera vez en la feria tecnológica de Hannover 2011, y es hasta 2013 que se detalla el concepto. El cual se define como un conjunto de procesos que conlleva a la automatización inteligente y a la interconexión de sistemas computacionales. El objetivo de la agricultura 4.0 recae en la incorporación de las tecnologías a la agroindustria. Se centra en recolectar, analizar, monitorear y aplicar datos digitales para el aumento de la eficiencia productiva, pasando por la producción primaria, la transformación, la distribución y la comercialización de productos con valor agregado en el marco de negocios agroalimentarios (Flórez-Martínez & Uribe-Galvis, 2020). Emplea redes de sensores, drones, procesamiento de imágenes de satélites, aplicaciones móviles, procesos computacionales en la nube; por lo tanto, representa el progreso de una agricultura conectada y basada en el conocimiento tecnológico (Melgar, 2018).

Aplicación

La aplicación de las tecnologías digitales en la actividad agrícola trae como beneficios el aumento y eficiencia en el rendimiento de los cultivos, de acuerdo con el potencial de los ecosistemas. Permite identificar áreas optimas de cultivos, prevenir riesgos de inundación y sequía, además de detectar humedad del suelo, monitorear plagas, estrés hídrico, entre otras variables físico-biológicas. En el sector agroalimentario, en la actualidad, se habla de la agricultura 4.0 y 5.0. La primera integra los últimos desarrollos basados en tecnologías digitales. La segunda (prevista inicie en 2025) se basará en la robótica y en la inteligencia artificial, impresión 3D y 4D, biotecnología, biología sintética (por ejemplo, carne artificial), agricultura vertical para las "ciudades inteligentes" y modificación del clima (Melgar, 2018; Vargas-Canales, 2022).

Problemática

Actualmente el sistema alimentario mundial se encuentra en crisis. Es necesario llevar a cabo un cambio profundo en el sistema agroalimentario mundial. La pandemia de COVID-19 afectó el acceso a los alimentos para la población mundial que habita zonas de alta y muy alta marginación. El aumento de la productividad agrícola y la producción alimentaria sostenible son cruciales para ayudar a aliviar los riesgos del hambre (Objetivo 2 ODS: Poner fin al hambre, 2022). En este sentido, se hace indispensable el monitoreo de los impactos que genera el cambio climático en la agricultura y seguridad alimentaria. Estos impactos son enfrentados por los países del mundo y México no está exento de ello. Entre los riesgos más evidentes se encuentran los vinculados a los fenómenos hidrometeorológicos:

- La reducción de precipitaciones que provoca estrés hídrico en los cultivos.
- Lluvias intensas en pocas horas, provocando inundaciones y pérdida de producción agrícola.
- La sequía y escasez de agua.
- Incremento de las temperaturas, que trae como consecuencia la proliferación de plagas y enfermedades en los cultivos.
- Aumento de ciclones tropicales, los cuales cada vez se presentan con mayor intensidad y recurrencia, provocando pérdidas y daños, no sólo productivos.

Un factor importante que puede limitar la seguridad alimentaria es el deterioro de la calidad de los suelos, que puede afectar a los pequeños agricultores de las áreas rurales, quienes dependen de su rendimiento para su autoconsumo pudiendo llegar a una crisis alimentaria y un aumento de la pobreza (Cotler *et al*., 2020). Un factor importante que puede limitar la seguridad alimentaria es el deterioro de la calidad de los suelos, lo cual afecta especialmente a los pequeños agricultores de las zonas rurales, quienes dependen de la productividad de sus tierras para el autoconsumo. Esta situación puede derivar en una crisis alimentaria y en el aumento de la pobreza (Cotler et al., 2020). Desde una perspectiva económica, alcanzar la seguridad alimentaria implica no solo el impulso de actividades productivas, sino también la implementación de intervenciones integrales en nutrición, salud y educación, complementadas con la incorporación de conocimientos e información sobre el cambio climático (Bautista-Roledo, et al).

La aplicación de las tecnologías digitales en este sector trae como beneficios monitorear y prevenir riesgos que comprometan la seguridad alimentaria de la región. Entre estos se encuentran la estimación de índices ambientales. Estos índices también son útiles para estimar el área foliar, la cobertura y dinámica vegetal, la deforestación y fragmentación de hábitats, evaluación del suelo y estado de la vegetación, así como

de cultivos, como una posible técnica para el aumento de la producción y contribuir a la seguridad alimentaria (Chamorro & Erazo, 2019; Cima-Ruiz, 2021; González *et al*., 2021; Guerrón *et al*., 2022; Huechacona-Ruiz, 2021).

Objetivo

Con el objetivo de contribuir a la presentación de las tendencias en la agricultura 4.0 para las zonas de cultivo de la Zona Maya de Quintana Roo, en este trabajo se evalúan: el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de estrés hídrico (CWSI, por sus siglas en inglés) a partir de imágenes de satélite SENTINEL 2A.

En ese sentido, el uso, adopción y aprovechamiento de las nuevas tecnologías en el sector agroalimentario genera buenas expectativas sobre el futuro de la producción de alimentos. Este marco de incorporación de la agricultura 4.0 en la cadena productiva, debe también incluir a los generadores de políticas públicas, así como organizaciones que controlan y dinamizan la gobernanza sectorial, garantizando la seguridad alimentaria de cada país (Melgar, 2018).

Materiales y métodos

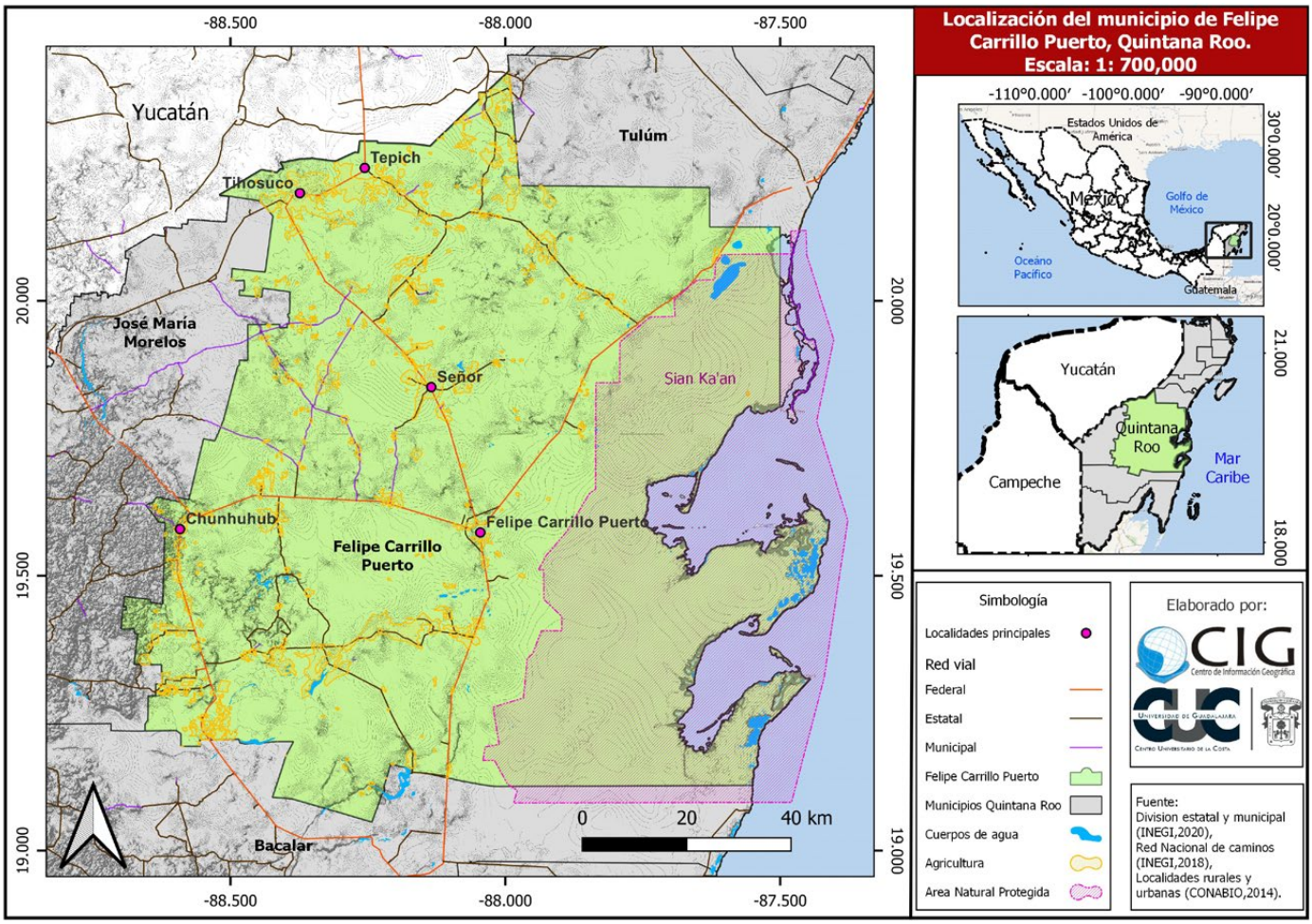
A continuación se detalla la metodología empleada para la obtención de los objetivos marcados. En primer lugar, se describirá el área de estudio, seguido de la descripción de las bandas de la imagen de satélite que han sido utilizadas y, finalmente, el software y los métodos específicos empleados.

Área de estudio

El municipio de Felipe Carrillo Puerto se localiza en la parte central del estado de Quintana Roo, entre las siguientes coordenadas: 19°35' de latitud norte, 88°33' de longitud oeste. Cubre una superficie aproximada de 13,191 km². Es el más extenso de la entidad, representando casi un 30% de la superficie estatal. Con una altitud media de 20 m s. n. m. Colinda al norte con el municipio de Tulum, al oeste con el municipio de José María Morelos, al sur con el municipio de Bacalar y al este con el mar Caribe (Figura 1). Cuenta con una población de 83,990 habitantes (INEGI, 2020). Sus principales actividades económicas se centran en el sector primario: agricultura y explotación forestal. La superficie de uso agrícola equivale a sólo 700 km² aproximadamente; es decir, un 5.31% de su territorio total (INEGI, 2022). La mayor parte de su territorio se encuentra cubierta por selva mediana (4,983.94 km²) y selva baja (4,638.07 km²) de donde se aprovechan los recursos maderables y no maderables. No obstante, la Plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) señala que de los 87 ejidos que lo componen, 5 son los que más han contribuido a la deforestación en el municipio (Tepich, X-Pichil, X-Yatil, Xmaben y Anexos y Tihosuco) localizados al norte y noroeste del municipio, dando paso al cambio de cobertura del suelo por la agricultura, pastizales para la ganadería y, en menor medida uso urbano (CONAFOR, 2021)

Materiales y métodos

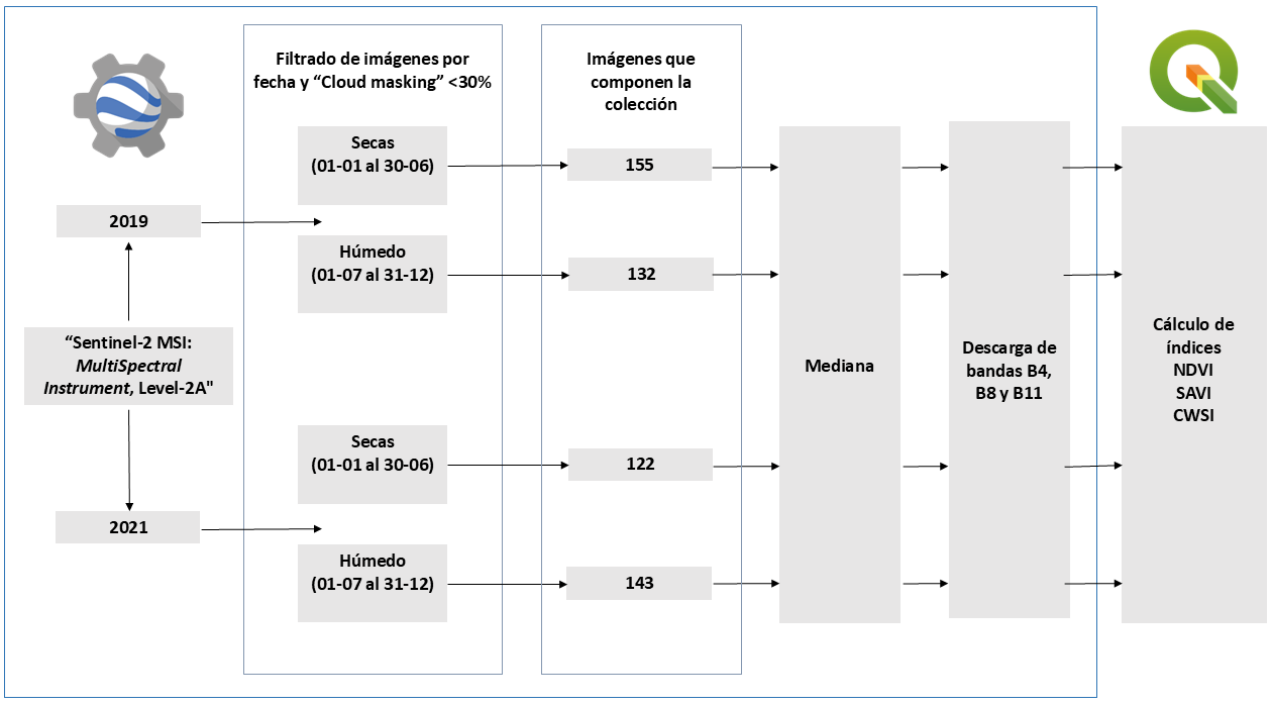
Para la selección y filtrado de las imágenes de satélite se utilizó la plataforma Google Earth Engine, plataforma de geomática que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite a nivel global desde una nube de datos, sin necesidad de realizar una descarga previa de dichas imágenes, optimizando tiempos de procesamiento y sin necesitar almacenamiento en equipos de cómputo (Google Earth Engine, 2022). Se utilizaron una combinación de imágenes de satélite "Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A" para los años 2019 y 2021. La cobertura de nubes fue menor al



► **Figura 1.** Área de estudio.
"Elaboración propia con datos del INEGI (2020)"

30%. También se les aplico una máscara de nubes (cloud masking), con una resolución espacial de 10 metros, cubriendo el territorio del municipio de Felipe Carrillo Puerto. La metodología se resume en la Figura 2.

Los años de análisis se dividieron en dos periodos: 1) secas, correspondiente del 01 de enero al 30 de junio de cada año, y 2) húmedo, del 01 de julio al 31 de diciembre. De este modo se obtuvieron las colecciones de imágenes para cada periodo de análisis. Posteriormente, se realizó una composición de imagen tomando en cuenta la mediana de las imágenes para generar una imagen de cada periodo y obtener capas de datos para el área de estudio por periodo (Phan *et al.*, 2020). Finalmente, para cada composición de Sentinel 2A, se descargaron las bandas: B4 (RED), que refleja fuertemente el follaje muerto, varios tipos de vegetación, suelo desnudo y áreas urbanas; banda B8 (NIR, Near Infrared Reflectance) que identifica el contenido de biomasa y vegetación; y, por último, la banda B11 (SWIR1, Short Wave Infrared) útil para medir el contenido de humedad del suelo y la vegetación, además proporciona un buen contraste entre diferentes tipos de vegetación. A partir de estas bandas se calcularon los siguientes índices ambientales: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI); Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI) e Índice de Estrés Hídrico (Crop Water Stress Index, CWSI).



► **Figura 2.** Metodología empleada para la obtención de imágenes de satélite.
Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se calculó el NDVI para Sentinel 2A, que se deriva de la ecuación definida por Rouse *et al.* (1974, citado en Huechacona-Ruiz, 2021). (Tabla 1). Para esto se emplearon las bandas B4 (RED) y B8 (NIR) en la calculadora raster del software QGIS 3.22 (Tabla 1). El rango de valores que puede alcanzar el NDVI va de -1 a 1.

En segundo lugar, se calculó el SAVI, este índice se emplea para corregir la influencia ejercida por el suelo durante el cálculo del NDVI (Cima-Ruiz, 2021). Debido a que puede corresponder a cubiertas vigorosas, pero poco densas o a cubiertas densas con poca vitalidad (Gonzaga, 2014, citado en Chamorro & Erazo, 2019). En este caso, el factor "L" es encargado de amortiguar la presencia del suelo a través de valores comprendidos entre 0 (para zonas con gran densidad vegetal) y 1 (para zonas con escasa densidad vegetal). Sin embargo, para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma L = 0.5 (Carvacho & Sánchez, 2010, citado en Chamorro & Erazo, 2019). Este último valor fue el empleado en este trabajo, la fórmula para el cálculo del SAVI se puede observar en la Tabla 1.

Finalmente, se calculó el índice CSWI, que de acuerdo con Chamorro & Erazo (2019), cuando se secan las hojas este índice aumenta su reflectancia a lo largo de todo el espectro, produciendo un incremento en las bandas rojas, en el infrarrojo medio y en las bandas de absorción de agua, además, citando a López *et al.* (2009), lo definen como la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. La ecuación para su estimación se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de los índices de vegetación.

NDVI	SAVI	CSWI
NIR – RED/NIR + RED	((NIR – RED) / (NIR + RED + L)) * (1+L)	NIR- SWIR1 /NIR+SWIR1
B8 – B4 / B8 + B4	((B08 – B04) / (B08 + B04 + 0.5)) * (1+0.5)	B8-B11 / B8 +B11

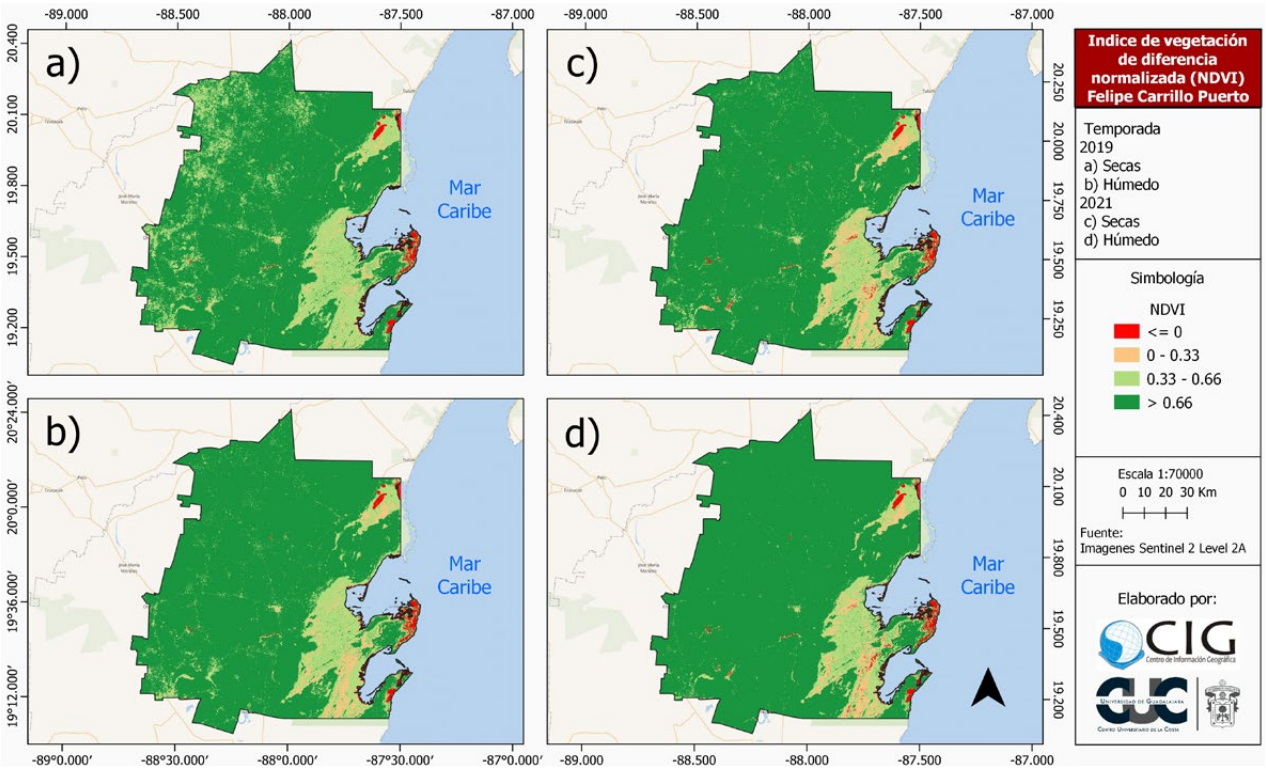
Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Los resultados se presentan a través de mapas. Se muestra la distribución espacial de los valores alcanzados para cada uno de los índices analizados dentro del territorio del municipio de Felipe Carrillo Puerto, entre los años 2019 y 2021 (Figuras 3, 4 y 5), en dos temporalidades: secas y húmedas. De la misma forma, y con la finalidad de observar la tendencia de los datos obtenidos por píxel, se exponen los valores mínimos (mín.), máximos (máx.) y medios (m) para cada año, índice y temporada analizada en las Tablas 2 y 3.

NDVI

Para especificar los rangos de valores para cada clase en los mapas obtenidos para NDVI, estos se dividieron en 4 clases: 1) -1 a 0 para identificar agua o vegetación muerta; 2) 0 a 0.33 para suelo arenoso o desnudo; 3) 0.33 a 0.66 para vegetación medianamente sana o arbustos y pastizales; y 4) 0.66 a 1 para vegetación densa y sana que corresponda a selva (Figura 3).



► **Figura 3.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de satélite Sentinel 2A (2019 y 2021).

Los resultados para el municipio de Felipe Carrillo Puerto registraron un índice NDVI cercano a la costa, con valores muy bajos correspondientes a zonas de humedales del Área Natural Protegida de Sian Ka'an o cuerpos de agua, como lagunas, por su baja reflectividad (Figura 3). En la siguiente clase, con valores entre 0 a 0.33, identifican zonas pantanosas, suelos arenosos y desnudos, como las áreas urbanas, observándose mejor para 2021 y sólo para la temporada húmeda de 2019 (Figura 3). La vegetación medianamente sana o correspondiente a arbustos o pastizales (0.33-0.66) se puede observar en la parte sureste del municipio, donde se localizan áreas pantanosas, y corresponden a áreas de pastizales y agricultura, observándose con mayor densidad para la temporada

de secas de 2019, lo que puede corresponder a un crecimiento lento de las plantas por el periodo de sequía que se vivió en ese año (Figura 3). Finalmente, la mayor parte de su territorio corresponde a selva y vegetación sana (>0.66), apreciándose mucho más para la temporada húmeda de 2021 (Figura 3).

De acuerdo con la carta de usos de suelo del INEGI (2021), los tipos de agricultura que se encuentran en este territorio corresponden a: 1) riego anual; 2) riego permanente; 3) riego semipermanente y permanente; 4) temporal anual; 5) temporal anual y permanente y 6) pastizal cultivado (Figura 2 y Tablas 2, 3 y 4), y en su totalidad abarcan aproximadamente 69,464.90 hectáreas. Se observa que la práctica de la agricultura se concentra en la agricultura de temporal, con 55,873.05 ha que equivalen al 84.43% del total (Tabla 2).

De acuerdo con Weier & Herring (2000), valores muy bajos de NDVI (< 0.1) corresponden a áreas estériles de roca, arena o nieve. Los valores medios representan arbustos y pastizales (0.2 a 0.3), mientras que los valores altos indican bosques templados y selvas tropicales (0.6 a 0.8). Para Felipe Carrillo Puerto, los valores mínimos para ambos años comparados (2019-2021) corresponden a la práctica de la agricultura de riego anual, temporal y pastizal cultivado; es decir, donde existe riego permanente o semipermante no alcanzaron valores bajos (Tabla 2). Si observamos el promedio de los datos (M) en la Tabla 2, los valores correspondieron a la mayor parte de los tipos de agricultura. Sin embargo, para el riego anual se observan valores medios, asumiendo que no se tiene un control estricto en el riego, porque se trata de cultivos cíclicos y se puede ir cambiando de cultivo como se desee. El cultivo de maíz y de frijol pertenecen a este tipo de cultivo.

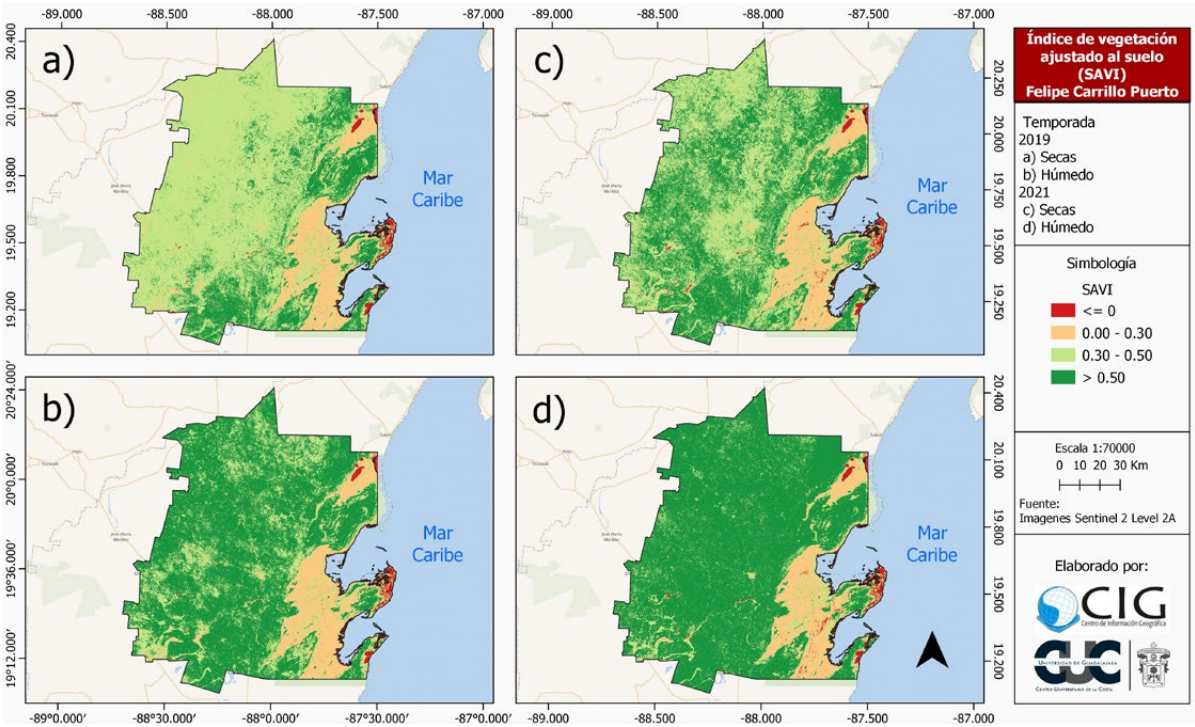
Tabla 2. Valores relativos extraídos de las imágenes para el cálculo de NDVI.

Tipo de Agricultura	Área (ha)	NDVI 2019						NDVI 2021					
		Secas			Húmedo			Secas			Húmedo		
		Mín.	Máx.	M	Mín.	Máx.	M	Mín.	Máx.	M	Mín.	Máx.	M
Riego anual	170.63	-0.08	0.82	0.35	-0.08	0.87	0.32	-0.09	0.84	0.42	-0.09	0.90	0.53
Riego permanente	847.73	0.09	0.88	0.69	0.13	0.91	0.75	0.07	0.89	0.75	0.11	0.92	0.82
Riego semipermanente y permanente	1,003.42	0.02	0.88	0.63	0.05	0.90	0.69	-0.03	0.88	0.69	-0.26	0.92	0.77
Temporal anual	55,873.05	-0.44	0.91	0.67	-0.12	0.92	0.78	-0.25	0.92	0.75	-0.20	0.94	0.85
Temporal anual y permanente	2,095.36	0.00	0.84	0.63	0.02	0.90	0.76	0.04	0.88	0.74	0.04	0.88	0.86
Pastizal cultivado	9,474.70	-0.29	0.91	0.59	-0.13	0.92	0.65	-0.09	0.89	0.68	-0.09	0.89	0.79

Fuente: Elaboración propia.

SAVI

El índice SAVI refleja datos de suelo y de cultivos. Castellanos, Moreno y Maldonado (2016) señalan que, cuando el índice NDVI se satura en sus valores altos, se recomienda el cálculo del SAVI, principalmente porque sucede en cultivos en suelos agrícolas. En este trabajo se utilizó el valor de L= 0.5. Se manejaron cuatro clases, la más baja corresponde a áreas de agua (valores negativos) la segunda (0 a 0.30) representó suelos desnudos, arenosos o suelo obscuro, en este sentido, y para Felipe Carrillo Puerto, corresponde a zonas pantanosas y poco profundas asociadas a agua (Figura 4); la siguiente clase va de 0.3 a 0.5 (valores medios), para identificar la presencia de suelos desnudos o con poca cobertura vegetal, y es la que se observa con más presencia para 2019 y 2021 en la temporada de secas, y representó zonas de agricultura de temporal anual (Figura 2). Finalmente, la última clase, con valores mayores a 0.5, perteneció a cobertura vegetal densa, sin suelo desnudo, correspondiente a áreas de selva virgen, siendo mayor en la temporada húmeda de 2021 (Figura 4).



► **Figura 4.** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).

Fuente 1: Elaboración propia con datos de la European Space Agency (ESA). (2019). Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo [Imagen satelital]. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu
Fuente 2: European Space Agency (ESA). (2021). Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo [Imagen satelital]. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu

Respecto al índice SAVI, si observamos los valores de la Tabla 3 para ambos años (2019-2021) y temporadas, los valores negativos asociados a algún tipo de agricultura se localizaron cercanos a cuerpos de agua o suelos claros, pero con poca extensión territorial. La clase de suelos desnudos, arenosos o suelos obscuros (0.0 a 0.30) se asoció con agricultura de riego anual, principalmente. Suelos con valores medios o escasa vegetación se encontraron asociados a la agricultura de riego permanente, semipermanente, temporal anual, permanente y pastizal cultivado, observándose un aumento de la vegetación para el periodo húmedo de ambos años (Tabla 3). Los valores altos asociados a vegetación densa se observaron en la agricultura de riego permanente, temporal anual y pastizal cultivado, sobre todo en el periodo húmedo de 2021 (Tabla 3).

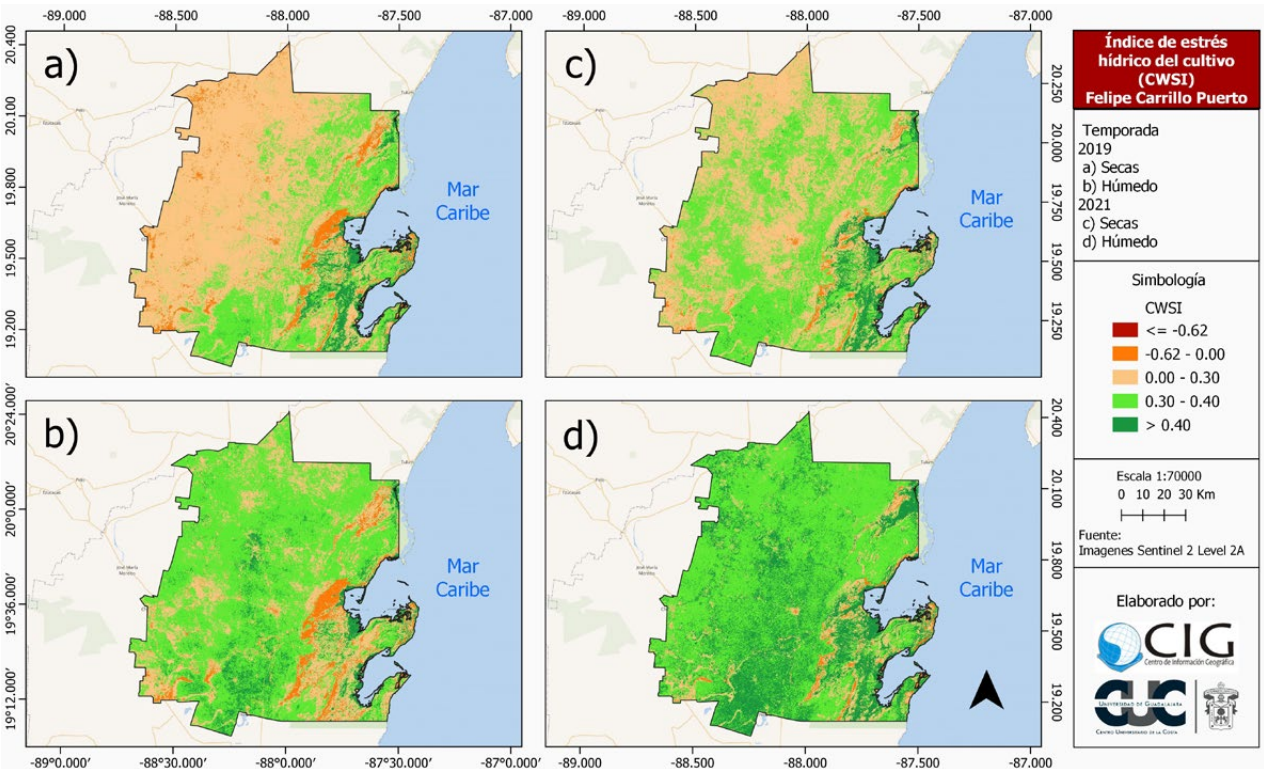
Tabla 3. Valores relativos extraídos de las imágenes para el cálculo de SAVI.

Tipo de Agricultura	Área (ha)	SAVI 2019						SAVI 2021					
		Secas			Húmedo			Secas			Húmedo		
		Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.
Riego anual	170.63	-0.08	0.54	0.23	-0.08	0.62	0.21	-0.10	0.70	0.47	-0.09	0.65	0.35
Riego permanente	847.73	0.07	0.63	0.43	0.11	0.67	0.49	0.07	0.66	0.47	0.09	0.70	0.53
Riego semipermanente y permanente	1,003.42	0.01	0.63	0.39	0.03	0.64	0.44	-0.03	0.70	0.43	-0.18	0.70	0.50
Temporal anual	55,873.05	-0.11	0.67	0.40	-0.04	0.69	0.50	-0.09	0.55	0.27	-0.05	0.72	0.55
Temporal anual y permanente	2,095.36	0.00	0.58	0.38	0.02	0.66	0.47	-0.03	0.65	0.43	0.02	0.71	0.56
Pastizal cultivado	9,474.70	-0.04	0.69	0.36	-0.04	0.68	0.41	0.04	0.62	0.46	-0.03	0.73	0.51

Fuente: Elaboración propia.

CWSI

En la Figura 4 se especifican cinco clases para los valores obtenidos del CWSI: 1) <-0.62; 2) -0.62 a 0; 3) 0 a 0.30; 4) 0.30 a 0.40 y 5) > 0.40. Donde valores negativos (valores muy bajos) pueden indicar que existe una pérdida de agua durante el día, los cuales corresponde a ambos periodos de 2019, debido a la sequía de ese año (Figura 5). Los valores bajos (segunda clase) se observan más en 2019 y en el periodo de secas de 2021 (Figura 5). Los valores medios se apreciaron con mayor extensión en el periodo de secas de 2019. Valores altos tuvieron más presencia en los periodos húmedos de 2019 así como secas y húmedo de 2021, notándose una gran recuperación de la humedad en el periodo húmedo de 2021 (Figura 5). Valores muy altos registraron poca presencia en el mapa: a), b) y c) de la Figura 5 y sólo en d) (2021 húmedo) se observó una estabilización de la temperatura y menos transpiración de la vegetación.



► **Figura 5.** Índice de Estrés Hídrico (CWSI).

Fuente 1: Elaboración propia con datos de la European Space Agency (ESA). (2019). Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo [Imagen satelital]. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu
Fuente 2: European Space Agency (ESA). (2021). Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo [Imagen satelital]. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu

Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice es 0 (López *et al.*, 2009). Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende más que la temperatura del aire; en este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo, el CWSI toma el valor de 1.

Para el municipio de Felipe Carrillo Puerto, considerando el promedio de los valores registrados, los tipos de agricultura asociada o cercana a 0 (sin estrés hídrico), son riego semipermanente y permanente, pastizal cultivado (secas 2019) y riego anual

(secas 2021). Por otro lado, no se registraron zonas agrícolas con valores cercanos a 1; por lo tanto, en la región no se llega a identificar vegetación muerta. La mayor parte de los valores son más cercanos a 0.5 (estrés medio), en los que destacan la agricultura de temporal anual y permanente del periodo húmedo de 2021. Se espera que el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas vayan de una condición bien regada a una condición totalmente estresada, pero en el caso de la agricultura de temporal, tanto anual como permanente, está sujeta al ciclo de lluvias, por lo que no existe una infraestructura de irrigación para ella, lo que debería ser tomado en cuenta ya que cubre el 80% del área de cultivo del municipio.

Tabla 4. Valores relativos extraídos de las imágenes para el cálculo de CSWI.

Tipo de Agricultura	Área (ha)	SAVI 2019						SAVI 2021					
		Secas			Húmedo			Secas			Húmedo		
		Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.	Mín.	Máx.	M.
Riego anual	170.63	-0.35	0.29	-0.01	-0.33	0.41	-0.04	-0.29	0.38	0.02	-0.26	0.46	0.14
Riego permanente	847.73	-0.31	0.41	0.15	-0.25	0.521	0.26	-0.29	0.44	0.21	-0.27	0.50	0.31
Riego semipermanente y permanente	1,003.42	-0.39	0.45	0.07	-0.33	0.49	0.17	-0.32	0.43	0.13	-0.31	0.50	0.25
Temporal anual	55,873.05	-0.45	0.73	0.12	-0.48	0.62	0.28	-0.39	0.56	0.22	-0.50	0.74	0.36
Temporal anual y permanente	2,095.36	-0.36	0.38	0.11	-0.27	0.49	0.24	-0.32	0.45	0.20	-0.25	0.51	0.36
Pastizal cultivado	9,474.70	-0.43	0.54	0.04	-0.43	0.56	0.13	-0.38	0.50	0.14	-0.42	0.61	0.28

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El estado de Quintana Roo, localizado al sureste de la República mexicana, se divide en 11 municipios y, a su vez, en tres grandes zonas diferenciadas por sus actividades económicas: 1) la zona norte se distingue por una fuerte inversión de capital privado, la región turística; 2) la zona central o zona maya –la de mayor rezago y marginación- (donde se ubica el grueso de la población indígena maya) y 3) la zona sur donde existen grandes extensiones mecanizadas de cultivos comerciales y la capital del estado, la ciudad de Chetumal. La agricultura que predomina es "de subsistencia", seguido por la "de temporal" y una mínima parte "de riego", con un excedente modesto que ingresa al mercado local y regional (Ken *et al*., 2021).

El municipio de Felipe Carrillo Puerto pertenece a la zona maya de Quintana Roo. Caracterizado por su aislamiento geográfico, exclusión social y vulnerabilidad ante fenómenos naturales (huracanes, sequías, incendios). Las múltiples carencias en infraestructura impactan negativamente los servicios de salud, educación, comunicaciones y transporte (Suárez *et al*., 2021). En estos ejidos los campesinos dependen de las lluvias para producir. En la temporada 2019 hubo una sequía crítica, la cual se ha agudizado en años recientes a causa del cambio climático y el calentamiento global, lo que trajo consigo incendios y pérdidas de miles de hectáreas de cultivos (Xantomila, 2019, citado en Suárez et al., 2021).

El aprovechar los avances tecnológicos para evitar el impacto que tiene la agricultura en la biodiversidad, no implica desaparecer la agricultura convencional, sino en regresar a las prácticas tradicionales. Esta situación afecta a las comunidades indígenas que quedan solas con mínimos apoyos de programas gubernamentales. Sin embargo, las experiencias organizacionales y técnicas de estas comunidades son primordiales para conocer las estrategias ante los impactos de la sequía y también sus debilidades, y así poder esbozar cómo podrían los programas gubernamentales mitigar los impactos de la sequía y de la degradación del suelo, con el objetivo de mejorar

las condiciones de vida de los productores del campo. Debe existir una transferencia tecnológica para la agricultura, es decir, una transmisión de conocimientos y técnicas al agricultor, para producir bienes y servicios, asegurando mejores niveles de eficiencia económica y competitividad, de bienestar social y de sustentabilidad.

Los aspectos metodológicos y teóricos que han utilizado las diferentes formas como se ha expresado en los índices ambientales NDVI, SAVI y CWSI, se basan en el análisis de los valores de reflectancia de longitudes de onda en diferentes secciones del espectro electromagnético de imágenes de satélite, empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Lo que permitió generar nuevos datos sobre las características de la vegetación en función de la reflectancia. El producto final de esta automatización ayuda a identificar de manera rápida la distribución y el tipo de vegetación en imágenes aéreas o satelitales. Cada uno de estos índices son auxiliares para el aumento de la productividad, la conservación de la sustentabilidad y la seguridad alimentaria. Como ejemplo el CWSI puede ser utilizado para una calendarización y optimización del agua de riego en los cultivos agrícolas. Para el cálculo del SAVI se recomienda la extracción del "L" directamente de las imágenes calibradas y para cada uno de los periodos comparados, tanto el uso de NDVI como del SAVI pueden ser utilizados para el seguimiento del crecimiento de los cultivos en épocas con suelos húmedos o bajo irrigación, en zonas agrícolas.

Conclusiones

La autosuficiencia alimentaria depende de factores como la sostenibilidad de los suelos y la productividad de los pequeños y medianos productores, por lo que es necesario contar con un sistema alimentario con cuidado del medio ambiente, con ello podemos asegurar el abastecimiento de alimentos en comunidades indígenas de alta y muy alta marginación. De esta forma, estamos protegiendo al país de fluctuaciones de los precios de los productos agropecuarios, porque un sistema alimentario propio no sólo considera la producción de alimentos, sino también actividades inherentes a la transformación tecnológica y comercial, lo cual fortalece los servicios financieros e industriales del país.

Sin duda las nuevas tecnologías avanzan, pero no hay que perder la mirada de lo social, apoyando a las comunidades campesinas a través del conocimiento académico. Demostrando que estas nuevas herramientas tecnológicas son en beneficio de las buenas prácticas socioambientales y del desarrollo de sistemas agrotecnológicos. Se necesitan soluciones innovadoras que sean sostenibles y minimicen el impacto ambiental de la agricultura. Los avances científicos y tecnologías de la agricultura 4.0 y 5.0 permitirán alcanzar lo anterior. Al mismo tiempo, es pertinente diseñar nuevas políticas agroalimentarias en las que se considere la asesoría y capacitación de los campesinos en tecnologías digitales de acuerdo con las características regionales, lo que puede realizarse considerando enfoques innovadores para los sectores productivos y garantizar la seguridad alimentaria.

» Referencias bibliográficas

Bautista-Robles, V., Ken, C., & Keita, H. (2020). El papel de la agricultura en la seguridad alimentaria de las comunidades rurales de Quintana Roo: un ciclo autosostenido. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional,* 30(56), e20987. https://doi.org/10.24836/es.v30i56.987

Castellanos, G., Moreno, M., & Maldonado, F. (2016, November). Obtención de imágenes Índice de Vegetación SAVI a partir de imágenes milirreflectancia TOA. *Simposio SELPER*. https://www.researchgate.net/publication/311442359_OBTENCION_DE_IMAGENES_INDICE_DE_VEGETACION_SAVI_A_PARTIR_DE_IMAGENES_MILIRREFLECTANCIA_TOA

Chamorro, H., & Erazo, A. (2019). Estudio multiespectral del cultivo de tuna para determinar los índices NDVI, CWSI y SAVI, a partir de imágenes SENTINEL 2A, en el cantón Guano, provincia de Chimborazo, Ecuador. *Enfoque UTE*, 10(3), 55–66. http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/

Cima-Ruiz, M. I. (2021). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): análisis y mapeo de la deforestación en el municipio de Bacalar, Quintana Roo*. [Tesis de licenciatura].Universidad de Quintana Roo.

CONAFOR. (2021). *Infomapa de Zonas críticas de deforestación en Quintana Roo*. https://idefor.cnf.gob.mx/uploaded/documents/05_ZONASDEFORESTADASMUNICIPIOS_alta.pdf

Cotler, H., Corona, J., & Galeana-Pizaña, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*, 101, e59976. https://doi.org/10.14350/rig.59976

European Space Agency (ESA). (2019). Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu

European Space Agency (ESA). (2021. Sentinel-2A satellite image of Quintana Roo. Copernicus Open Access Hub. https://scihub.copernicus.eu

Flórez-Martínez, D., & Uribe-Galvis, C. (2020, July). Tecnologías de la cuarta revolución industrial para el sector agropecuario: un análisis de tendencias en la Agricultura 4.0. 18th *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*: "Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy". http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/meta/FP11.html

González, G., Toro, V., Dorado, E., & Ramírez, L. (2021). Evaluación de patrones temporales en la dinámica para el cambio de cobertura vegetal en zonas rurales tropicales durante el período 2013-2018. Caso de estudio Chaguaní-Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18. https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.eptd

Google Earth Engine. (2022). *Análisis a nivel planetario en la nube de Google*. https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/

Guerrón, A., Viera, W., Campaña, D., Vásquez, L., & Montufar, C. (2022). Aplicación de índices vegetales (banda roja e infrarrojo cercano) en plantaciones de aguacate. *Siembra*, 9(1), e3371. https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3371

Huechacona-Ruiz, A. A. (2021). *Caracterización y modelización de los patrones fenológicos de la vegetación en bosques tropicales secos de la Península de Yucatán* [Tesis de doctorado]. Centro de Investigación Científica de Yucatán. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/1892

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda* 2020. INEGI.

Ken, C., Rivero, B., & Ay, L. (2021). La situación agrícola de Quintana Roo ante los retos tecnológicos: un estudio de caso. *Economía Coyuntural*, 6(4), 105–144. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222021000400006&lng=es&tlng=es

López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., & Sánchez, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica En México*, 35(1), 97–111. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&tlng=es

Melgar, M. (2018). Agricultura Digital o Agricultura 4.0. *Sugar Journal*, 81(5), 33–37.

Phan, T., Kuch, V., & Lehnert, L. (2020). Land cover classification using google earth engine and random forest classifier-the role of image composition. *Remote Sensing*, 12, 2411. https://doi.org/10.3390/rs12152411

Suárez, R., Hermax, R., Gracia, M., Roldán, H., & Pat, J. (2021). Grupos y estrategias para la defensa biocultural del territorio en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. *Alteridades*, 31(61), 93–106. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcsh/alt/2021v31n61/roman

Vargas-Canales, J. (2022). El sector agroalimentario mexicano y las nuevas tecnologías. *Revista E-Agronegocios*, 8(2), 89-113. https://doi.org/10.18845/ea.v8i2.6156

Weier, J., & Herring, D. (2000). *Measuring Vegetation* (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation

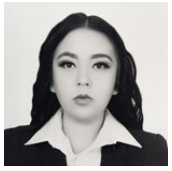
» Sobre los autores

Dr. Ángel Alberto Alfonso Martínez

Licenciado en Geografía por la Universidad de La Habana 1987, Cuba. Doctorado en Geografía por la Facultad de Geografía de la Universidad de la Habana 2015. Postdoctorado en Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México 2020-2022. Evaluador del proyecto y Coordinador Nacional de proyectos en la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura en Cuba. Líneas de investigación: Gestión Ambiental Territorial, Manejo en Humedales, Manejo Integrado Costero y Adaptación al Cambio Climático.

Dr. Christian M. Appendini

Licenciado en Oceanología y maestro en Oceanografía Costera por la Universidad Autónoma de Baja California. Doctor en ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador de la Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Yucatán. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel II. Sus líneas de investigación se centran en la ingeniería costera y oceánica y oceanografía física aplicada, con particular interés.



Biol. Alondra Cristina Barragan Nava

Licenciatura en Biología en la Universidad de Guadalajara en el Centro Universitario de la Costa. Desde el 2023 estudiante de la maestría en Ciudad Cambio Climático y Resiliencia, con habilidades en sistemas de información geográfica. Líneas de investigación enfocada a resiliencia en sector socioeconómicos.

Dr. Jorge Humberto Bravo Méndez

Licenciado en Ciencias atmosféricas por la Universidad Veracruzana, Maestro en Ciencias por la Universidad de Guadalajara, actualmente Estudiante de doctorado y asistente de investigación, en el Instituto Stevens de Tecnología. Tiene diez años de experiencia profesional tanto en el sector privado como público, en temas de modelación numérica atmosférica e hidrológica, implementación de modelos para pronóstico del tiempo, así como uso de datos de sensores remotos para vigilancia meteorológica.

Mtra. en C. Dagne Boudet Rouco

Licenciada y maestra en Geografía por la Facultad de Geografía de la Universidad de la Habana, Cuba, actualmente estudiante de doctorado del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Autónoma de México. Líneas de investigación: Climatología, peligros asociados a eventos extremos de precipitación, cambio climático, dendrocronología e hidrogeomorfología.

Mtra. en C. Myrna Leticia Bravo Olivas

Licenciado en Ciencias Biológicas, con orientación en Biología, Maestría en Ciencias con orientación en pesquerías, Doctorado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas con orientación a efectos ambientales derivados de las pesquerías. De 2016-2024 miembro del SNII "Nivel I". Actualmente pertenezco al Departamento de Ciencias Biologícas, profesor investigador Titular "A", por el Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara y miembro de la red de investigadores de la Universidad de Guadalajara.

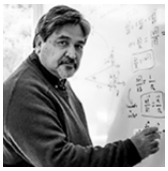
Dr. Luis Brito Castillo

Doctor en Ciencias en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, egresado del Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste, S.C., donde también es Investigador Titular 'C'. Es miembro fundador de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim-SECIHTI), y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 2. Sus áreas de interés son hidroclimatología, variabilidad climática e impacto ambiental.

Dr. José Manuel Camacho Sanabria

Licenciado en Geografía, maestro en Análisis Espacial y Geoinformática y doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Actualmente es cátedra SECIHTI en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UAEQROO). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel 1). Sus líneas de investigación son el análisis espacial territorial y las inundaciones pluviales urbanas.

Dra. Bonnie Lucía Campos Cámara
Profesora Investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana, Investigadora Nacional Nivel 1 del SNII-SECIHTI. Doctora en Geografía (sociedad y territorio) por UNAM. Línea de Investigación Formación y organización de espacios socioeconómicos Miembro del Comité Académico del Doctorado en Geografía. Libros de autoría y en coordinación y artículos en diferentes revistas y difusión de resultados de investigación en diversos congresos, seminarios de índole internacional, nacional y estatal.



Dr. José Noel Carbajal Pérez
Efectuó estudios de Física en la UASLP, de maestría en la Universidad de Kiel y de doctorado en la Universidad de Hamburgo ambos en Alemania. Actualmente labora en el Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas A.C. en temas de tormentas de polvo, de emisión de aerosoles por incendios forestales, de tornados, de climatología de nubes, de tormentas severas y algunos temas de oceanografía física.

Dr. Adrián Cervantes-Martínez
Biólogo por la UNAM, con Doctorado en Ecología y Desarrollo Sustentable. Miembro del SNII, Nivel I. Líneas de investigación, limnología y ecología de sistemas acuáticos continentales y costeros. Ha realizado estancias de investigación en Alemania, Bélgica, España, Francia, Estados Unidos. Profesor en la Facultad de Estudios Superiores FES-Iztacala (UNAM) en 1996-1998 y desde 2005 a la fecha, es profesor- investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Unidad Cozumel.

Dr. Jorge Cortés Ramos
Doctor en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Pertenece al SNII nivel Candidato (2021-2024). Desde 2017 está comisionado al CICESE, Unidad La Paz como Investigador por México del SECIHTI. Su línea de investigación es la climatología y dinámica de eventos extremos en el noroeste de México. Pertenece a la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim-SECIHTI) y representante de México ante el Comité Permanente de Información Geográfica Antártica (SCAGI) del Comité Científico sobre Investigaciones Antárticas (SCAR).

Dr. Bartolo Cruz Romero
Profesor Investigador Titular C de la Universidad de Guadalajara e integrante del Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad del Centro Universitario de la Costa, Puerto Vallarta, Jalisco, México. Miembro del SNII Nivel I del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México. Licenciado en Biología Marina, Maestro en Desarrollo Sustentable y Turismo, Doctorado en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas. Coordinación de proyectos relacionados con el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en la planeación y ordenación del territorio con un enfoque de cuenca.

Dra. Rosalía Chávez Alvarado
Doctora en Filosofía con Orientación en Asuntos Urbanos por la UANL. Actualmente Cátedra SECIHTI adscrita a la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Pertenece al SNII nivel I. Líneas de investigación en gestión del riesgo de desastre, vulnerabilidad social y, Envejecimiento y cambio climático.

Dr. Felipe de Jesús Escalona Alcázar
Doctor en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología. Actualmente docente-investigador de tiempo completo en la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Es parte del Comité de Ciencias Naturales y Exactas de los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior. Las líneas de investigación son geología estructural, tectónica, riesgo geológico y geomorfología.

Mtra. Aranely Wendolyne Estrada Porcayo
Es candidata a Doctora en Geografía por la Universidad Autónoma de Quintana Roo. Obtuvo el grado de Mtra. en Análisis Espacial y Geoinformática y de Licenciada en Geografía por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Su investigación está enfocada en el análisis espacial de la antropización de la cobertura vegetal y su impacto en la temperatura superficial mediante el uso de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica.

Dr. Luis Manuel Farfán Molina

Doctor en Ciencias Atmosféricas, Luis Manuel Farfán Molina realizó estudios de licenciatura en física (UNAM) y posgrado en ciencias atmosféricas (Universidad de Arizona, Tucson). En CICESE ha desarrollado investigación en eventos meteorológicos extremos (ciclones tropicales, tormentas convectivas y sistemas invernales) que afectan a varias regiones de América del Norte en particular el monitoreo de eventos que se desarrollan en las zonas costeras del Océano Pacífico y Golfo de México mediante el análisis de la red operativa de observaciones, productos de satélite geoestacionario y modelos numéricos tanto en tiempo real como en análisis históricos. Adicionalmente, ha dedicado parte de sus estudios a identificar los patrones de impacto que han tenido los eventos extremos en la población tanto en regiones densamente pobladas como en zonas rurales de México. Es miembro del SNII nivel II y de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos.

Dr. Ing. geógrafo Oscar Frausto – Martínez.

Licenciado y maestro en Geografía con especialidad en manejo y conservación de los recursos naturales. Doctor en análisis e investigación espacial por la Universidad Bauhaus – Alemania. Profesor investigador de la división de desarrollo sustentable de la Universidad de Quintana Roo. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, miembro de la Academia de Geografía de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística y representante del CTA de la REDESCLIM del SECIHTI 2021 - 2023. Sus líneas de investigación se centran en el diseño, uso y desarrollo de indicadores de sustentabilidad aplicados a diversos contextos territoriales.

Dra. María Z. Flores López

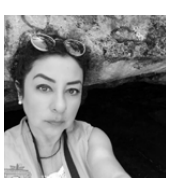
Doctora en Ingeniería del Agua y Maestría en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, con ambos posgrados por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es Ingeniera Civil por el Instituto Tecnológico de La Paz, México. Profesora-Investigadora del Departamento Académico de Ciencias de la Tierra, responsable de la Carrera en Gestión y Ciencias del Agua y el Programa de Manejo Integral del Agua (PAGUA) en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Miembro del SNII nivel Candidato (2024-2027). Integrante del Sustainable Development Solutions Network de las Naciones Unidas, la Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas, el Órgano Técnico del Comité de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de La Paz y Grupo Especializado de Trabajo en el Consejo de Cuenca de Baja California Sur, entre otros. Sus líneas de investigación comprenden la hidrología, el manejo integral de cuencas y acuíferos y el ordenamiento de los territorios.

Dra. Leticia Gómez-Mendoza

Licenciatura, maestría y doctorado en Geografía por la UNAM, estancia posdoctoral en el Centro de Ciencias de la Atmósfera. Profesora de Tiempo Completo del Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía, UNAM. Coordinadora del Posgrado en Geografía, UNAM. Líneas de investigación en biodiversidad y cambio climático, vulnerabilidad a eventos extremos en sistemas costeros y bosques templados. Responsable de la Red Nacional de Fenología y del Seminario Clima Biodiversidad y Salud. Miembro del SNII, 1.

Mtro. en C. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Es egresado de la Universidad Autónoma Chapingo como ingeniero agrónomo especialista en Zonas Àridas en 1990. Maestría en Nutrición y doctorado en el Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste desde 2011. Profesor Investigador de la Universidad Estatal de Sonora desde 1991 y actualmente con reconocimiento de PRODEP y miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1.



Dra. María Luisa Hernández Aguilar

Doctora en Geografía por la Universidad de Quintana Roo, Maestra en Geografía Humana, por la Universidad Complutense de Madrid y Maestra en Ciencias en Planificación de Empresas y Desarrollo Regional e Ingeniera en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán. SNII Nivel 1 SECIHTI. Profesora de Apoyo Técnico Académico del Departamento de Ciencias Ambientales de la División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología y encargada del Área de SIG y Percepción Remota del Centro de Información Geográfica (UQROO). Su línea de investigación comprende la geografía del riesgo de desastre, amenazas naturales, vulnerabilidad, resiliencia y procesos geoespaciales aplicados al territorio.

Mtra. Rosalinda Islas García

Licenciada en hidrobiología por la Universidad Autónoma Metropolitana y Maestra en gestión Sustentable del turismo por la Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo. Becaria del SECIHTI. En el año 2022 recibió el premio a la mejor tesis del concurso nacional de posgrado de la REDESCLim del SECIHTI.

Bióloga Nubia Zoé Lara Rodríguez

Licenciada en Biología, Especialista en Métodos Estadísticos y pasante de la Maestría en Economía Ambiental y Ecológica, todas por la Universidad Veracruzana. Diploma de Estudios Avanzados en Biodiversidad por la Universidad de Alicante, España. Miembro de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos del SECIHTI. Desarrolla investigación en polinización, bioestadística y cambio climático.

Dr. José Francisco León Cruz

Realizó Maestría y doctorado en Geociencias Aplicadas en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Desde el 2020 es Investigador Asociado "C" de Tiempo Completo en el Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. Es Investigador Nacional Nivel 1 y miembro del Comité Técnico Académico la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim - SECIHTI).

Dra. Anita Martínez Méndez

Arquitecta (Tecnológico Nacional de México, 2007), Maestra en Construcción (Tecnológico Nacional de México, 2013), Doctora en geografía (UAQROO, 2020). Investigadora Posdoctoral del SECIHTI y miembro del SNII (Nivel candidata). Colabora con de La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) del SECIHTI Su línea de investigación: Resiliencia, sistemas de Infraestructura urbana y cambio climático.

Dr. Manuel E. Mendoza

Licenciado en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Maestro en Ecología y Manejo de Recursos Naturales por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores Monterrey y Doctor en Ciencias de la Tierra (UNAM). Actualmente es Investigador Titular C en el Instituto de Geofísica de la UNAM, y forma parte del Centre for Natural Hazard Research de la Universidad de Simón Fraser; es miembro del SNII nivel III. Su trabajo contribuye a resolver problemas de uso adecuado del territorio nacional a diversas escalas. Es miembro del Comité Técnico Académico de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), de la Red Mexicana de Estudios en Conectividad del Paisaje-(REMECP) y miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias.

Dra. Ana Teresa Mendoza Rosas

Es egresada de la Facultad de Ciencias y el Instituto de Geofísica de la UNAM, ha participado en diversos proyectos como: VUELCO (Volcanic Unrest in Europe and Latin America), SECIHTI, CIC-UMSNH, PAPIT-UNAM, USGS-USAID-CENAPRED, entre otros, mostrando integración multidisciplinaria en su trayectoria. También ha sido parte de comités de organización de eventos científicos a nivel nacional e internacional. En el ámbito de la docencia, la Dra. Mendoza ha impartido una amplia variedad de cursos a nivel posgrado y licenciatura, abarcando temas como Riesgo Volcánico, Geoestadística y Sismología Volcánica. Tiene amplia experiencia como evaluadora de proyectos científicos, revisora y editora asociada en revistas nacionales e internacionales. Actualmente es miembro del SNII con categoría 1 y labora en la UMSNH-Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Las líneas de investigación se centran en la evaluación de peligro y riesgo volcánico, la modelación de datos multiparámetros volcánicos, análisis de la identificación de precursores sísmicos para actividad volcánica, la modelación estocástica y geoestadística en campos volcánicos, y modelos de redes en medios porosos.

Mtra. en C. Daniela Monterde

Maestra y actual estudiante de Doctorado en Geociencias Aplicadas por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Las principales líneas de investigación son dinámica de la atmósfera, tornados y trombas marinas empleando modelación numérica.

Dr. Julio Cesar Morales Hernández

Licenciado en Ecología Marina y Doctorado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas con orientación a fenómenos hidrometeorológicos, especialista en Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en riesgos naturales. De 2016-2024 miembro del SNII "Nivel I". Miembro del CTA de REDESCLIM. Actualmente pertenezco al Departamento de Ciencias Exactas, profesor investigador Titular "A", por el Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara y miembro de la red de investigadores de la Universidad de Guadalajara.

Dr. Jorge Morán

Doctor en ciencia social con especialidad en sociología y maestro en estudios urbanos por El Colegio de México. Licenciado en economía por el Instituto Politécnico Nacional. Líneas de investigación: riesgos y desastres; tensiones, reconfiguración y metamorfosis del paisaje; y seguridad humana y protección civil. Adscrito al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, dentro del programa Investigadoras e Investigadores por México comisionado a El Colegio de San Luis (Colsan), dentro del Programa Agua y Sociedad, en el proyecto Agenda social del agua: Fortalecimiento de capacidades sociales frente a riesgos hidrometeorológicos. Miembro de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLim) y la Red Internacional para la Sostenibilidad de las Zonas Áridas (RISZA), ambas son redes SECIHTI. Miembro del SNII, nivel 1.

Mtro. en C. Bárbaro Moya

Ingeniero Agrónomo y Maestro en Ciencias Ambientales por la Universidad de Matanzas, Cuba, y en Educación bilingüe por Heritage University en Washington, E.U.A. Fue Investigador y director del Centro Meteorológico Provincial de Matanza en Cuba. Actualmente trabaja para el Distrito Escolar de Yakima, en Washington, E.U.A. Líneas de Investigación: climatología, bioclimatología, cambio climático y riesgos climáticos.

Dra. Carolina Andrea Ochoa Martínez

Doctora en Ingeniería por la Universidad Veracruzana. Académica de Tiempo Completo en el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana. Miembro del Comité Técnico Académico de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos del SECIHTI. Desarrolla investigación sobre los impactos del cambio climático en diversos sectores productivos, vulnerabilidad y adaptación.

Dra. Carmen Isela Ortega Rosas

Doctora en Geociencias del Medioambiente por la Universidad Paul Cezzane, Francia. Es profesor investigador Titular de la Universidad Estatal de Sonora con 14 años de experiencia. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII Nivel 1) y responsable del Cuerpo Académico en Recursos Naturales (Consolidado ante PRODEP). Ha publicado más de 20 artículos científicos en revistas indexadas de alto impacto varios capítulos de libro y reportes técnicos. Ha dirigido 12 tesis de licenciatura, 8 de Maestría y dos de Doctorado. Es asesor del gobierno del estado de Sonora en temas de Cambio Climático y medio ambiente. Forma parte de varios consejos consultivos municipales. Sus líneas de investigación son: cambio climático y calidad biológica del aire, vegetación y ecología urbana, paleoecología y paleoclimatología.

Dr. Wener Ochoa

Es un destacado experto en cambio climático y sostenibilidad, con una destacada trayectoria académica y profesional. Es miembro de la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de Guatemala, y actualmente ejerce como profesor investigador y asesor de tesis en los Postgrados de Ingeniería y Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Su trabajo se enfoca en diversas áreas de investigación clave, incluyendo el cambio de uso de la tierra, erosión hídrica, gestión ambiental, Hidrogeología e Hidrometeorología, Agrometeorología y Estrategias de adaptación al cambio climático. Su labor contribuye significativamente al avance del conocimiento científico y a la búsqueda de soluciones para los desafíos ambientales que enfrenta la región.

Dr. Luis Felipe Pineda-Martínez

Doctor en Geociencias Aplicadas y actualmente Docente-Investigador de la Unidad Académica de Ciencias Sociales y de Ciencias de la Tierra de la UAZ. Pertenece a Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1 y parte del Comité Técnico Académico de la REDESClim. Sus líneas de investigación incluyen modelos atmosféricos y análisis de tendencias de cambio y variabilidad climática.

Mtra. en Geog. Violeta Rangel Velarde

Licenciada en Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Maestra en Geografía con orientación al Manejo Integrado del Paisaje, UNAM. Actualmente cursa el Doctorado en Geografía, UNAM. Ha hecho colaboración técnica en el análisis espacial en restauración "replanishment" y cambios de cobertura (TNC; UNAM-UEA). Sus líneas de investigación con dendrogeomorfología, paleosismología y estudios del paisaje.

Mtra. Karen Rendón

Karen Viviana Rendón Osorio se encuentra realizando su doctorado en Estudios Urbanos y Ambientales en el Colegio de México. Posee una Maestría en Población y Desarrollo otorgada por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO), sede México, y es abogada por la Universidad Autónoma Latinoamericana, de Medellín. Es autora del libro "Derechos humanos y vulnerabilidad poblacional ante inundaciones en Ciudad de México", donde propone acercarse a la vulnerabilidad a partir del enfoque de derechos humanos como herramienta para poner la dignidad humana en el centro de la gestión integral del riesgo de inundaciones. Su experiencia y líneas de investigación se centran en la vulnerabilidad, el riesgo ambiental, la población y el territorio, así como en el análisis de los derechos humanos en estos contextos. Además, es miembro activo de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), red temática de investigación del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (SECIHTI).

Mtra. en C. Dalia Siboney Romero Lara

Maestra en Ciencias Sociales Aplicada a los Estudios Regionales (MCSAER) de la Universidad de Quintana Roo (UQROO). Estudiante del Doctorado en Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UAEQROO). Su línea de investigación se centra en la Geografía social (sistemas agroalimentarios, otras economías, soberanía alimentaria y género). Sus intereses expresan relación con el desarrollo y las críticas a ese desde perspectivas críticas, feminismos indígenas.

Dra. Mtra. de Lourdes Romo Aguilar

Geógrafa, con Maestría en Administración Integral del Ambiente por El Colef-CICESE y doctorado en Ciencias Sociales por la Universidad Autónoma Metropolitana. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 2. De 1996 a la fecha se desempeña como Profesora-Investigadora en El Colegio de la Frontera Norte (El Colef). Sus áreas de especialidad son: Gestión y política urbano-ambiental en relación con la vulnerabilidad a riesgos hidrometeorológicos y cambio climático, ordenamiento ecológico-territorial, así como planeación urbana y regional. Es miembro del Comité Científico Asesor en Ciencias Sociales del Sistema Nacional de Protección Civil. Participa en la la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) y en la Red Mexicana de Científicos (as) por el Clima (REDCiC).

LCA. Edgar Rodríguez Arellano

Licenciado en Ciencias Ambientales y actualmente estudiante de la Maestría en Ciudad, Cambio Climático y Resiliencia en el Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación son en las áreas de: medio ambiente, climatología y variabilidad climática.

Dr. Juan Manuel Rodríguez Esteves

Es geógrafo por la Universidad de Guadalajara, especialista en percepción remota por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Brasil), maestro en administración integral del ambiente por El Colegio de la Frontera Norte (El Colef) y doctor en ciencias sociales con especialidad en antropología social por CIESAS-Occidente. Es investigador nacional nivel 1 (SNII-1) y sus líneas de investigación son geografía del riesgo, antropología de los desastres y gestión del riesgo. Actualmente es investigador del Departamento de Estudios Urbanos y de Medio Ambiente de El Colef y su último libro se titula "De lluvias y desastres. Un modelo para manejar el riesgo en Tijuana, Baja California". Pertenece a la REDESClim desde 2011.

Dr. Baudelio Rodríguez González

Doctor en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Hidráulico por la Universidad de Sonora, Maestro en Planeación de Recursos Hidráulicos e Ingeniero Civil por la UAZ. Actualmente es Docente Investigador Titular "C" de Tiempo Completo en la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ. Líder del Cuerpo Académico en Formación "Estudios de Hidrosistemas y Cambio Climático UAZ-CA-240". Miembro de la Red Mexicana de Recursos Hídricos (REMERH-Cap-Net-Méx) y de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim - SECIHTI).

Dr. Paris Rivera

Es experto en Cambio Climático y Sostenibilidad, cuenta con una sólida formación académica y experiencia profesional. Es Ingeniero Civil y Máster en Recursos Hidráulicos opción Calidad del Agua en la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) y Meteorólogo de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET). Su trayectoria incluye participación en eventos internacionales, representando a Guatemala ante el Comité de Huracanes de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), así como en talleres y conferencias sobre temas climáticos. Fue jefe del departamento del Climatología y Meteorología del el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) en Guatemala. Actualmente, se desempeña como Investigador y catedrático en la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala (UMG).

Dr. Pablo Ruiz Salcines

Licenciado por la Universidad de Cantabria y maestro por el Instituto de Hidráulica de Cantabria. Doctor en ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Posdoctorante en Instituto de Ingeniería de la UNAM Profesor de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Mérida de la UNAM. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I. Sus líneas de investigación se centran en ingeniería costera y oceánica y oceanografía física aplicada, en análisis de peligro y riesgo por eventos extremos y cambio climático.

Dr. Fernando Salas Martínez

Doctor y Maestro en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz. Actualmente es profesor investigador en El Colegio de Veracruz e instituciones de educación superior del sector privado. Sus investigaciones se centran en la moderación numérica climática, así como, en estudios de afectaciones climáticas en aspectos sociales y ambientales.

Mtro. en C. Dennis Sanchez Casanova

Biólogo y Maestro en Ciencias en Geofísica por la Universidad de Guadalajara. Colaborador del laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad del Centro Universitario de la Costa (UDG). Sus líneas de investigación se enfocan en el análisis de riesgos ambientales con enfoque socioecológico. Monitoreo de fenómenos como sequía, inundaciones y degradación de la tierra y restauración ecológica.

Dr. Gabriel Sánchez-Rivera

Licenciatura y maestría en Geografía por la UNAM, Doctorado en Desarrollo Sostenible por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UAEQRoo), estancia posdoctoral en el Colegio de Geografía de la UNAM. Miembro del SNII, Nivel C. Profesor de la UAEQRoo. Líneas de investigación en análisis espacial, geografía ambiental, riesgos y resiliencia asociados a eventos hidrometeorológicos extremos, servicios ecosistémicos y sustentabilidad.

Dr. Romeo Alejandro Sánchez Zavalegui

licenciado en Biología, maestro en manejo de zonas costeras por el Tecnológico Nacional de México y doctor en Geografía por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Actualmente es profesor por asignatura en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UAEQROO) y consultor ambiental de ECOyDS. Sus líneas de investigación son ecología de reptiles, aves y mamíferos, sistemas de información geográfica aplicados a la Biología y Ciencias Sociales y vulnerabilidad social.

Dra. Herlinda del Socorro Silva Poot

Arquitecta (Tecnológico Nacional de México, 1994), Maestra en Planeamiento Urbano Regional (Universidad de Guanajuato, 2001), Doctora en Arquitectura (Universidad de Colima, 2011). Profesora de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Chetumal y miembro del SNII (Nivel candidata). Autor y coautor de artículos científicos, revisor de revistas y proyectos nacionales. Su línea de investigación: Planeación y Gestión Urbana.

Dra. Ana Cecilia Travieso Bello

Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Naturales por el Instituto de Ecología, A. C.
Profesora de Tiempo Completo de la Universidad Veracruzana. Cuenta con el Nivel I en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del SECIHTI. Miembro de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos. Desarrolla investigación en gestión integral de riesgos y cambio climático, así como en manejo integrado de recursos naturales.

Dra. Ofelia Andrea Valdés Rodríguez

Doctora en Ecología Tropical por el Centro de Investigaciones Tropicales de la Universidad Veracruzana, Maestra en ciencias por el Instituto Tecnológico de Chihuahua e ingeniería industrial por el Instituto Tecnológico de Veracruz. Actualmente es profesora investigadora de El Colegio de Veracruz, donde estudia cultivos regionales y los efectos de las variaciones climáticas sobre aspectos sociales y ambientales.

Dr. Alejandro César Valdés Carrera

Doctor en Geografía por el CIGA-UNAM Campus Morelia, Maestro en Gestión Integrada de Cuencas por la UAQ y Licenciado en Ciencias Ambientales por la UAEMéx. Profesor de asignatura en la licenciatura en Geociencias ENES-UNAM Morelia. Líneas de investigación: manejo de cuencas e hidrología, geomorfología, geopedología, paisaje físico-geográfico, planeación territorial, peligro por procesos geomorfológicos, restauración ecológica y cambio climático.

LCA. Itzallana Zestochova Valdez Pérez

Licenciatura en Ciencias Ambientales, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas. Líneas de investigación enfocadas a impacto ambiental asociados a eventos naturales.

Dr. Ricardo E. Vega Azamar

Ingeniero Civil (UADY, México, 1997), Maestro en Ingeniería (UNAM, México, 2001) y Doctor en Ingeniería (Universidad de Quebec, Canadá, 2013). Profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Chetumal y miembro del SNII (Nivel I). Autor y coautor de artículos científicos, revisor de revistas y proyectos nacionales e internacionales, responsable y colaborador de proyectos de investigación. Sus líneas son la evaluación de la sostenibilidad en entornos construidos, el análisis de ciclo de vida energético y la huella de carbono.

Dr. José Villanueva Díaz

Licenciado en Agronomía por la Facultad de Agronomía en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Maestro en Ciencias Agropecuarias y Marítimas en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores De Monterrey y Doctor en Manejo de Cuencas Hidrológicas de la Universidad de Arizona en Tucson. Líneas de investigación: estudios dendrocronológicos enfocados en la reconstrucción climática, la paleoclimatología, la hidrología y las ciencias ambientales y forestales.

Dr. Carlos Manuel Welsh Rodríguez

Coordinador e Investigador de tiempo completo de la Universidad Veracruzana, adscrito al Centro de Ciencias de la Tierra. Sus líneas de investigación son los impactos locales y regionales del cambio global. Postdoctorado sobre adaptación al cambio climático en Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) en Boulder, Colorado. Mediante beca SECIHTI. Doctor en Sostenibilidad por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Maestro en Gestión Ambiental por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Especialista en Climatología y Licenciado en Instrumentación Electrónica por la Universidad Veracruzana. Miembro de la Unión Geofísica Americana (AGU), de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), y desde 2012 Miembro de la REDESCLim.

REDESCLIM

La serie Monografías del Instituto de Geofísica evalúa el progreso global en el campo de todas las disciplinas de las geociencias, así como sus avances recientes. También, alienta las contribuciones concernientes a la pedagogía, filosofía y evaluación de la enseñanza y aprendizaje de las ciencias de la tierra.

www.geofísica.unam.mx