

LA RED DE DESASTRES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS Y LA ATENCIÓN DE LOS PROBLEMAS NACIONALES ESTRATÉGICOS

Coordinadores:

Enrique González Sosa

Luis Felipe Pineda Martínez



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO

LA RED DE DESASTRES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS Y LA ATENCIÓN DE LOS PROBLEMAS NACIONALES ESTRATÉGICOS



Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca

RECTORA

Dr. Javier Ávila Morales

SECRETARIO ACADÉMICO

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y POSGRADO

Dr. Manuel Toledano Ayala

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

MDI. Jorge Javier Cruz Florín

COORDINADOR DEL DESPACHO DE PUBLICACIONES

FACULTAD DE INGENIERÍA

Lic. Diana Rodríguez Sánchez

DIRECTORA DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

EDITOR RESPONSABLE

Ing. Soid Lazlo Ruiz Ramírez

CORRECCIÓN DE ESTILO

Lic. Cristian Emanuel Tovar Navarro

DISEÑO EDITORIAL

Diana Carolina Cruz Becerril

Xochiquetzalli Varela Cervantes

DISEÑO DE PORTADA

Primera edición: 2023

D.R. © DE LOS AUTORES

D.R. © UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

CERRO DE LAS CAMPANAS S/N

CENTRO UNIVERSITARIO, 76010

SANTIAGO DE QUERÉTARO, MÉXICO

ISBN DEL VOLUMEN: 978-607-513-696-7

ISBN DE LA COLECCIÓN: 978-607-513-633-2

La presente edición de *La red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos y la atención de los problemas nacionales estratégicos* forma parte de la colección “Ingeniería y sociedad” y es una publicación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Todos los capítulos que conforman este libro fueron arbitrados por el sistema de doble ciego.

LA RED DE DESASTRES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS Y LA ATENCIÓN DE LOS PROBLEMAS NACIONALES ESTRATÉGICOS

Coordinadores

Enrique González Sosa
Luis Felipe Pineda Martínez



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DESPACHO DE PUBLICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍA

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1	16
Aportes para la agenda de reducción de riesgos de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México	
CAPÍTULO 2	40
Calidad de los datos para la creación de índices de cambio climático de temperatura para Veracruz	
CAPÍTULO 3	54
Variación de precipitación y su relación con ENSO y PDO en un fragmento de la llanura costera de Nayarit	
CAPÍTULO 4	86
Medidas reactivas de adaptación ante inundaciones en la zona conurbada de Nacajuca, Tabasco, México	
CAPÍTULO 5	108
Dendrogeomorfología: un enfoque en el análisis de peligros naturales	
CAPÍTULO 6	148
Desarrollo de capacidades para la adaptación al cambio climático del sector cafetalero	

CAPÍTULO 7	168
Análisis histórico de los extremos climáticos del estado de Zacatecas	
CAPÍTULO 8	188
Caracterización del riesgo por ciclones tropicales en México	
CAPÍTULO 9	214
Desastres hidrometeorológicos extremos y cambio climático en el estado de Veracruz	
CAPÍTULO 10	234
Factores que modulan la temperatura superficial. ¿nos pueden ayudar a identificar el inicio de una sequía?	
CAPÍTULO 11	256
Impacto de sistemas convectivos y actividad eléctrica en la población del noroeste de México	
CAPÍTULO 12	274
El cambio climático en Emiliano Zapata, Tabasco. Un acercamiento entre las ciencias sociales y atmosféricas	
CAPÍTULO 13	300
Reconstrucción de eventos de desprendimiento de rocas mediante técnicas dendrogeomorfológicas en una zona de escalada en Canadá	
CAPÍTULO 14	328
Revisión sobre aplicación de técnicas dendrocronológicas en la estimación de peligros asociados a grandes precipitaciones pluviales en zonas de montañas	

PRESENTACIÓN

La novena Reunión Anual de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM), celebrada en modalidad mixta en la ciudad de Zacatecas, tuvo como producto esta obra. Sus páginas integran los esfuerzos colectivos de estudiantes, docentes, investigadores y colegas del sector público, y muestran parte de la tarea científica de cada una de las instituciones donde nuestros integrantes se desempeñan.

La reunión tuvo como marco la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Zacatecas; no obstante, debido a las condiciones de distanciamiento social y pandemia que aún prevalecían, se desarrolló en una modalidad híbrida. Contó con la participación de más de veinticinco asistentes presenciales y cerca de un centenar de colaboradores mediante las plataformas digitales de la REDESCLIM. Durante el evento se presentaron cuarenta y cinco trabajos de ochenta y cinco autores pertenecientes a veinticinco instituciones de México, Canadá, Colombia, Cuba y Ecuador.

Para llevar a cabo esta complicada tarea respetando las condiciones sanitarias vigentes, fue esencial el respaldo de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Asimismo, resultó invaluable el total apoyo de la rectoría a cargo del Dr. Rubén Ibarra Reyes, quien siempre ha impulsado eventos nacionales, con especial énfasis en las temáticas que aborda la Red.

Cada año, la Reunión de la REDESCLIM ha indagado y enriquecido las cuestiones de gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos; como resultado, ofrece alternativas en la mejora del conocimiento científico a los tomadores de decisiones, a fin de que desempeñen su labor con la seguridad del respaldo científico. Así pues, la presente obra no solo goza de pertinencia social, sino que permite seguir cultivando la colaboración académica entre los miembros de la Red e instituciones nacionales, a pesar de las dificultades impuestas por la pandemia de covid-19.

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Docente-Investigador
Universidad Autónoma de Zacatecas

INTRODUCCIÓN

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM) es un grupo temático de investigación afiliado al Conacyt establecido en 2011. Su intención es fomentar la colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales, privadas y sociales, así como otras redes interdisciplinarias nacionales e internacionales dedicadas al desarrollo urbano y la investigación, prevención y mitigación de desastres.

La novena Reunión Nacional, celebrada los días 13, 14 y 15 de octubre de 2021 en la Universidad Autónoma de Zacatecas, se enfocó a temas directamente relacionados con los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces) del Conacyt. Desde la perspectiva de cada grupo de trabajo, se discutió la investigación, gestión y apoyo técnico que fortalecen las áreas temáticas de la Red y persiguen soluciones vinculadas con los Pronaces; se prestó especial atención en materia de agua, cambio climático, cultura y sistemas socioecológicos.

La presente obra compila trece investigaciones que muestran el enfoque metodológico de los grupos de trabajo, así como sus resultados en la búsqueda por enriquecer el conocimiento de desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climáticos. Se incluye la autoría de catorce mujeres y dieciocho hombres, quienes representan a diecinueve instituciones de México y el extranjero.

En el primer capítulo, Juan Manuel Rodríguez Esteves describe la problemática nacional derivada de los desastres asociados a inundaciones y lluvias intensas y cómo estas causan el 80 % de las pérdidas económicas registradas en México. Analiza los alcances de la REDESCLIM en los últimos años, y pone el énfasis en el ámbito de las políticas públicas vinculadas con la reducción del riesgo de desastres.

El capítulo 2, “Calidad de los datos para la creación de índices de cambio climático de temperatura para Veracruz”, de Carolina Ochoa Martínez y Antonio Luna Díaz Peón tiene por finalidad obtener indicadores de cambio climático a escala regional, específicamente de los eventos extremos. Los autores detectaron evidencia de un incremento térmico en numerosos sitios de esa entidad; hay que resaltar que los hallazgos se dieron a pesar de la considerable reducción del universo de estaciones en los últimos años, condición limitante en el análisis a profundidad de las tendencias observadas.

El tercer apartado, de Areli Nájera González y Fátima Maciel Carrillo González, muestra la relevancia de la variabilidad climática local en relación con fenómenos de variación global en el contexto de cambio climático para prevenir impactos sobre las comunidades. Analiza los fenómenos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) como controladores de procesos de variación natural y sus efectos sobre la precipitación de la llanura costera de Nayarit.

En “Medidas reactivas de adaptación ante inundaciones en la zona conurbada de Nacajuca, Tabasco, México”, expuesto por María de los Ángeles Pérez Villar, Felipa Sánchez Pérez y Sofía Ruíz Liévano, se muestran los resultados de estrategias enfocadas a la seguridad humana implementadas ante las inundaciones por los habitantes y autoridades de la zona conurbada del municipio de Nacajuca, Tabasco. Las autoras abordan la naturaleza improvisada de las medidas reactivas de los habitantes y la impotencia de las autoridades ante la emergencia; además, destacan la vulnerabilidad intensificada de las mujeres, resultado de su posición de desventaja social.

En el capítulo 5, Manuel E. Mendoza, Teodoro Carlón Allende y Rick Giardino ofrecen un estudio del crecimiento de anillos arbóreos y su relación con la precipitación o la escorrentía; su examen favorece la comprensión y reconstrucción retrospectivas de patrones climáticos en ubicaciones específicas. Asimismo, detallan la relación entre el clima y los deslizamientos lentos o rápidos de laderas. De esa manera muestran la relevancia de la dendrogeomorfología en el análisis de peligros naturales.

Por su parte, María Isabel Hernández Sánchez y Ana Cecilia Travieso Bello, abordan en la sexta colaboración el desarrollo de capacidades adaptativas del sector cafetalero al cambio climático. La investigación describe las repercusiones del cambio climático en la dinámica territorial de la industria cafetalera como sistema socioecológico. Enumeran las condiciones óptimas para la producción de café, y vaticinan una reducción de la aptitud climática de las actuales áreas de producción. Al final, reiteran cuán importante es la colaboración entre todos los eslabones en la cadena productiva del café para desarrollar sus capacidades de adaptación al cambio climático.

El capítulo séptimo, desarrollado por David Romero y José Francisco León-Cruz, caracteriza el riesgo por ciclones tropicales en México a través del análisis de tres componentes: peligro, vulnerabilidad y exposición. Propone que los altos niveles de riesgo por exposición se asocian a condiciones de marginación y pobreza en regiones como Veracruz, Guerrero, Michoacán y Jalisco. El cálculo de índices como unidades municipales de muestreo exhibe la distribución espacial del riesgo a gran escala, facilitando la identificación de regiones donde el nivel de peligrosidad y vulnerabilidad por ciclones tropicales resulta elevado.

Ofelia Andrea Valdés Rodríguez y Denise Soares muestran en su propuesta que, en el estado de Veracruz, los fenómenos hidrometeorológicos y las declaratorias por desastres —lluvias, ciclones e inundaciones— se concentran en los extremos sur y norte de la entidad. Según su análisis, la temperatura promedio desde 1985 hasta la fecha ha incrementado en 0.02 °C por año; por otro lado, la lluvia presenta un comportamiento oscilatorio. Concluyen que la tasa de declaratorias de daños catastróficos por fenómenos hidrometeorológicos desde el año 2000 aumentó 2.3 % al año y la temperatura incrementó en 0.88 °C.

El capítulo 9, de la autoría de Luis Brito Castillo, Mayra Guadalupe Gaxiola Morales, Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho, presenta un análisis interesante sobre los factores que modulan la temperatura superficial. Se aprecia cómo las sequías, ya de por sí recurrentes en la historia de México, pueden agudizarse debido al incremento de la temperatura global. Con base en valores umbrales de NDVI como indicadores del estrés hídrico en la vegetación, se expone una metodología para determinar el inicio de sequías dentro del desierto de Sonora.

En el décimo aporte, Luis M. Farfán, Luis Brito Castillo, María Z. Flores López y Jorge Cortés Ramos se enfocan en la región de Nayarit, Sinaloa, Sonora, Durango, Chihuahua y la península de Baja California. Su objeto de estudio es el desarrollo de los sistemas convectivos para identificar las características de nubosidad y los patrones de lluvias mediante valores mensuales. Igualmente investigan la distribución espacial y temporal de las descargas eléctricas en el interior de los sistemas convectivos. Sus resultados detallan el peligro que las descargas eléctricas representan para la población e infraestructura en el noroeste mexicano, particularmente el asociado a las actividades en espacios abiertos, así como el tráfico marítimo y aéreo.

El capítulo 11, de Denise Soares y Martin José Montero Martínez, explora la percepción del cambio climático en actores sociales del municipio de Emiliano Zapata, Tabasco, en la parte baja de la cuenca del río Usumacinta. La investigación compara el discurso oficial de cambio climático a nivel internacional, nacional y estatal con el nivel local, donde el concepto es ambiguo. Concluye que, más allá de la escasa conceptualización sobre el cambio climático a nivel local, los pobladores reconocen el impacto a causa de las variaciones en los periodos de lluvia y del incremento del calor. Señala además que esas percepciones reafirman la tendencia observada: una disminución de precipitación durante las últimas décadas.

El capítulo "Reconstrucción de eventos de desprendimiento de rocas mediante técnicas dendrogeomorfológicas en una zona de escalada en Canadá" nace de los autores mexicanos Manuel E. Mendoza, Orlando Lemus, Teodoro Carlón Allende y Erna M. López Granados, junto con los canadienses John Clague, Rick Giardino y Pierre Friele. Ofrece una aproximación a la gestión de riesgos por desprendimiento de rocas y deslizamientos en laderas, tema de interés a nivel mundial. Se exponen los resultados del trabajo de un grupo de investigadores de Stawamus Chief en la Columbia Británica, Canadá, quienes aplican una metodología actualmente en uso dentro de algunas regiones mexicanas. Los autores analizan la caída de rocas en zonas montañosas como un fenómeno geomorfológico que representa una amenaza a los elementos sociales y ecológicos. Su investigación, la primera evidencia de reconstrucción de eventos en el parque provincial de Stawamus Chief, resulta de suma utilidad para la toma de decisiones en la gestión del peligro en el Parque.

La sección final, de Dagne Boudet Rouco, Manuel E. Mendoza, Teodoro Carlón Allende y José Villanueva Díaz, ahonda en la bibliografía relativa a las técnicas dendrocronológicas de estimación de peligros por precipitaciones pluviales en zonas montañosas.

Este libro presenta una buena parte de los objetivos de los Pronaces, para brindar al lector un panorama del trabajo de los miembros de la Red y los esfuerzos científicos por encontrar respuesta a problemáticas relacionadas con la gestión de riesgos, análisis de redes de monitoreo y el entendimiento de procesos en los sistemas socioecológicos.

Cada uno de los capítulos contiene elementos interesantes de análisis que invitan a la reflexión profunda sobre los grandes problemas que nos atañen en la gestión de los riesgos, en escenarios de cambio climático. Sin duda, un ejercicio de tal naturaleza tendrá efectos sobre todos los sectores de la sociedad.

1

CAPÍTULO

APORTES PARA LA AGENDA DE REDUCCIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS EN MÉXICO

Juan Manuel Rodríguez Esteves

RESUMEN

Los eventos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos intensos pueden desencadenar desastres que comprometen el desarrollo de los asentamientos humanos, las actividades productivas, los ecosistemas y, en general, el bienestar de la sociedad. En México, las devastaciones asociadas a inundaciones y lluvias intensas son responsables del 80 % de las pérdidas económicas registradas en las ciudades, vías de comunicación, transmisión, actividades económicas e infraestructura hidroagrícola (Cenapred, 2020:3).

Las investigaciones sobre monitoreo, diagnóstico, pronóstico meteorológico, modelaje climático, bases de datos, políticas públicas y estrategias de comunicación son insumos necesarios para la reducción del riesgo ante eventos hidrometeorológicos y climáticos en México. La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM), red temática del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), ha contribuido al desarrollo nacional en los últimos once años mediante la investigación básica y aplicada de los principales fenómenos hidrometeorológicos recurrentes y sus consecuencias económicas, sociales y ambientales.

El objetivo de esta investigación es analizar los alcances de REDESCLIM en los últimos años, poniendo especial énfasis en el ámbito de las políticas públicas vinculadas con la reducción del riesgo de desastres. De igual forma, se busca profundizar en algunos elementos, tanto generales como particulares, para elaborar una agenda de política pública orientada a construir y desarrollar asentamientos humanos más seguros, y orientados hacia el desarrollo sostenible en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: desastres, fenómenos hidrometeorológicos, política pública, REDESCLIM.

ABSTRACT

Events associated with intense hydrometeorological and climatic phenomena can trigger disasters that compromise the development of human settlements, productive activities, ecosystems and, in general, the welfare of society. In Mexico, disasters associated with floods and intense rains are responsible for 80% of the economic losses registered in cities, communication routes, transmission, economic activities and hydro-agricultural infrastructure (Cenapred, 2020:3).

Research on monitoring, databases, diagnosis, weather forecasting, climate modeling, public policies and communication strategies are necessary inputs for risk reduction in the face of hydrometeorological and climate events in Mexico. The Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESclim), a thematic network of the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), has contributed to national development over the last eleven years through basic and applied research on the main recurrent hydrometeorological phenomena and their economic, social and environmental consequences.

The objective of this research is to analyze the scope of REDESclim in recent years, with special emphasis on public policies related to disaster risk reduction. It also seeks to deepen in some elements, both general and particular, to elaborate a public policy agenda aimed at building and developing safer human settlements, and oriented towards sustainable development in a context of climate change.

Keywords: disasters, hydrometeorological phenomena, public policy, REDESclim.

INTRODUCCIÓN AL TEMA DE LOS DESASTRES

El estudio de los desastres ha sido un campo de investigación desarrollado de manera sistemática desde la segunda mitad del siglo xx. En un inicio, se delimitaban al conocimiento de la amenaza desde el enfoque tecnocrático. Hoy en día, son numerosos los análisis que relacionan las causas de los desastres a la vulnerabilidad social; es decir, aquellas debilidades tangibles (infraestructura) e intangibles (percepción del riesgo de desastres) que impiden a la sociedad enfrentar eventos naturales extremos de manera adecuada (Hewitt, 1983:5; 1996:27-32). Es prudente advertir que se requiere diferenciar los términos básicos en los que se sustenta.

Desde el enfoque de la gestión del riesgo de desastres, la amenaza se asocia a cualquier "fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la

pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (NU, 2009:5). Para su estudio, se dividen, por sus orígenes, en natural o humana (estas últimas se asocian, por ejemplo, a desastres tecnológicos). En este sentido, una amenaza hidrometeorológica se refiere a:

[...] un proceso o fenómeno de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. (NU, 2009:6-7)

Con esta definición, se busca acotar que, para efectos del presente trabajo, se prestará mayor énfasis en las amenazas asociadas con el agua en la atmósfera, los océanos o la superficie terrestre¹. La amenaza es un fenómeno de intensidad variable, por lo que el riesgo de desastres hace referencia a:

[...] las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de vidas, las condiciones de salud, los medios de sustento, los bienes y los servicios, y que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un período específico de tiempo en el futuro. (NU, 2009:30)

El cálculo del riesgo es complejo, ya que intervienen factores de índole física y social o de ambos tipos, como el cambio climático, por lo que es común la relación del riesgo con la amenaza o el peligro. En este sentido, varios de los atlas de riesgo en México adoptan esta connotación, pero en realidad solo se presentan los peligros a los que está expuesta la población en su territorio.

Por otro lado, la amenaza y el riesgo son factores que pueden magnificarse en contextos específicos, pero sobre todo en las condiciones socioeconómicas de la población. La vulnerabilidad puede entenderse como “las características y las circunstancias de una comunidad, sistema... que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza” (NU, 2009:35). Esta susceptibilidad está referenciada a las diversas dimensiones que conforman la vulnerabilidad: debilidades físicas, ecológicas, sociales, económicas, culturales, institucionales, etc. (Wilches-Chaux, 1993; Cardona, 2001). La combinación de estas responde, en gran medida, a la magnitud que un desastre puede alcanzar en una comunidad.

1 El término de *amenaza siconatural* permite entenderlo en un contexto más particular, ya que se asocia al “fenómeno de una mayor ocurrencia de eventos relativos a ciertas amenazas geofísicas e hidrometeorológicas, tales como aludes, inundaciones, subsidencia de la tierra y sequías, que surgen de la interacción de las amenazas naturales con los suelos y los recursos ambientales explotados en exceso o degradados” (NU, 2009:8).

El conjunto de la amenaza, el riesgo y la vulnerabilidad, como elementos básicos, interviene en la concreción de daños potenciales a una comunidad. Si bien, en estas condiciones, el desastre es:

[...] una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (NU, 2009:13-14).

La mayoría de las personas comprenden la noción de desastre al relacionarla con los efectos perjudiciales de este fenómeno. Sin embargo, los especialistas aún no coinciden en los límites que lo definen, por ejemplo: ¿qué número de personas fallecidas y afectadas puede considerarse como un desastre? Delimitar los perjuicios que construyan esta definición es una tarea pendiente que se aborda en estudios de caso, por lo que pueden existir desde mínimos hasta colosales desastres. Por su parte, la reducción del riesgo de desastres engloba:

[...] un concepto y la práctica... mediante esfuerzos sistemáticos dirigidos al análisis y a la gestión de los factores causales de los desastres, lo que incluye la reducción del grado de exposición a las amenazas, la disminución de la vulnerabilidad de la población y la propiedad, una gestión sensata de los suelos y del medio ambiente, y el mejoramiento de la preparación ante eventos adversos. (NU, 2009:27).

Por lo tanto, la reducción del riesgo de desastres debe incorporar planes y programas elaborados de manera concurrente entre la autoridad regional o local, organizaciones sociales e incluso empresas cuya actividad esté directa o indirectamente relacionada con el uso del territorio, por ejemplo; las desarrolladoras de vivienda o infraestructura civil. Con base en el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por su acrónimo en inglés), la adaptación al cambio climático como tal es:

[...] proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar los daños o aprovechar las oportunidades. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos. (IPCC, 2018:180)

La adaptación cumple un papel vital en el contexto actual, ya que son evidentes las consecuencias del clima sobre los asentamientos humanos, las actividades productivas

y los ecosistemas. A su vez, los expertos coinciden en que la intensidad con la que se presentan los huracanes, inundaciones y demás fenómenos es evidencia del cambio climático antropogénico.

Por su parte, la resiliencia se define como la “capacidad de un sistema socioecológico de afrontar un suceso o perturbación respondiendo o reorganizándose de modo que mantenga su función esencial, identidad y estructura, se conserve al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación” (Consejo Ártico, 2013, tomado de IPCC, 2018:195). La vulnerabilidad y resiliencia son las dos caras opuestas de una misma moneda, ya que al disminuir una, la otra aumenta, y viceversa. Con base en los términos antes mencionados, surgen las siguientes cuestiones: ¿por qué siguen ocurriendo desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México?, y ¿qué se requiere para lograr una verdadera reducción del riesgo de desastres a partir de los logros alcanzados en los últimos diez años en México? y, por lo tanto, ¿qué puede ofrecer REDEDECLIM para reducir el riesgo?

LOS DESASTRES EN MÉXICO

La ubicación geográfica de México es uno de los mayores factores responsables de la manifestación de un gran número de fenómenos hidrometeorológicos: huracanes, lluvias intensas, olas de calor, sequías, tornados, etc. Cada año se registran estos eventos que, si bien no todos son desencadenantes de desastres, la mayoría sí logra perturbar la cotidianidad de las comunidades, y por consiguiente, reduce sus niveles de bienestar. Ante la incidencia de un desastre es común el daño de la infraestructura civil, las viviendas, vías de comunicación y transmisión, así como el equipamiento urbano. En general, las condiciones de “normalidad” de las personas están sujetas a las amenazas de origen hidrometeorológico, también responsables de más del 80 % de los costos por desastres asociados a fenómenos naturales (Cenapred, 2020:3).

El acontecimiento de amenazas hidrometeorológicas tiene una correspondencia tanto espacial como temporal. El Gran Norte de México, caracterizado por sus bajos niveles de precipitación, se contrapone con la región sur, que registra mayores volúmenes acumulados anualmente. Mientras que el norte presenta mayor número de ondas de frío durante los meses de invierno, es el sur quien manifiesta una cifra superior de inundaciones pluviales durante el verano. La Figura 1 muestra el impacto de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos en México entre los años 2010 y 2020: el número total de afectados ha aumentado en los últimos once años, mientras se mantiene un promedio de 144 fallecimientos por año para el periodo (Cenapred, 2020:3).

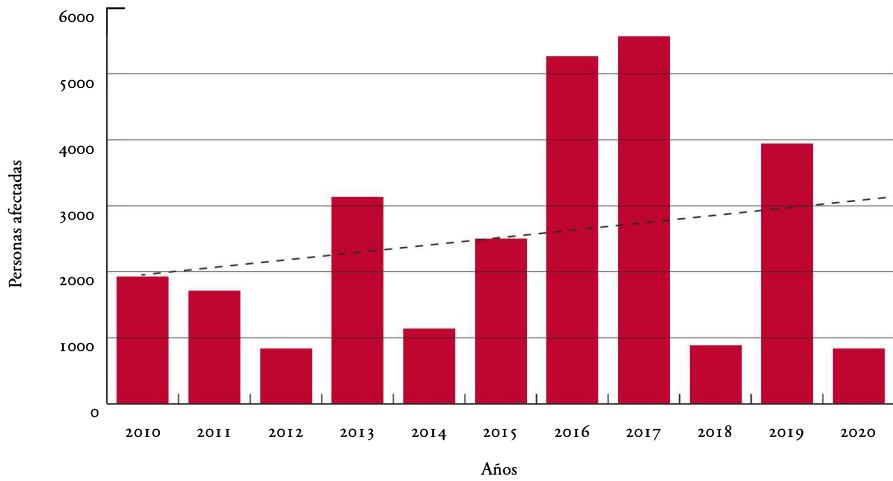


Figura 1. Número de afectados por desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos (2010-2020). Fuente: Cenapred, varios años.

Como lo indica la Figura 1, los efectos de los desastres sobre la población tienden a variar año con año, lo cual se debe al número variable de fenómenos hidrometeorológicos que se desarrollan, aunque los niveles de exposición y vulnerabilidad se mantengan estables. Por otro lado, en algunos casos estos últimos aumentan debido a la ocupación de zonas susceptibles a las amenazas y al incremento de condiciones de vulnerabilidad, por ejemplo, el cambio de uso del suelo, déficit de servicios públicos urbanos, deterioro ambiental, crecimiento demográfico, etc. Por lo tanto, los efectos de los desastres están sujetos a dos rubros: el primero corresponde a los niveles de exposición y de vulnerabilidad, mientras que el segundo a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos intensos que exponen las condiciones de inseguridad de las comunidades frente a las amenazas.

El gobierno federal creó el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) para atender los efectos negativos asociados a fenómenos naturales de tipo geológico e hidrometeorológico, asimismo, este fue el instrumento financiero que predominó en el periodo analizado. Lo anterior es debido a que México se estima como una de las regiones sísmicas más activas en el mundo, con un registro superior a noventa sismos; con respecto a la escala de Richter, se marca una magnitud de 4 o superior a esta. De igual modo, aproximadamente el 40 % de su territorio y más de una cuarta parte de su población están expuestos a tormentas, huracanes e inundaciones (Banco Mundial, 2012:1).

El FONDEN fue reconocido a nivel mundial como una iniciativa para el desarrollo de la gestión, atención y recuperación de los efectos producidos por fenómenos naturales, particularmente del riesgo de desastres, orientado a un mecanismo de financiamiento

del riesgo y aseguramiento para manejar el riesgo fiscal derivado de los desastres (Banco Mundial, 2012:1). Desde finales del siglo XX, el FONDEN evolucionó de un instrumento presupuestario a uno con reglas de operación que incrementaron su eficacia, dirigido desde finales de los noventa a la rehabilitación de la infraestructura federal y estatal afectada por desastres. En sus últimos años, se constituyó por dos módulos complementarios: el programa FONDEN para la Reconstrucción y el programa Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden). En cuanto a su importancia, el primero requirió los mayores recursos del presupuesto federal para su aplicación: atender las necesidades básicas de la población afectada, tales como la alimentación, salud y albergue durante la emergencia y días posteriores. El segundo se dedicó al estudio y análisis previos sobre la admonición del riesgo de desastres, así como la construcción de infraestructuras para evitar dichos eventos (Banco Mundial, 2012:4). La Figura 2 señala el incremento de las pérdidas económicas asociadas a los desastres, cuyos gastos se cubrieron, en su mayoría, con recursos del FONDEN.

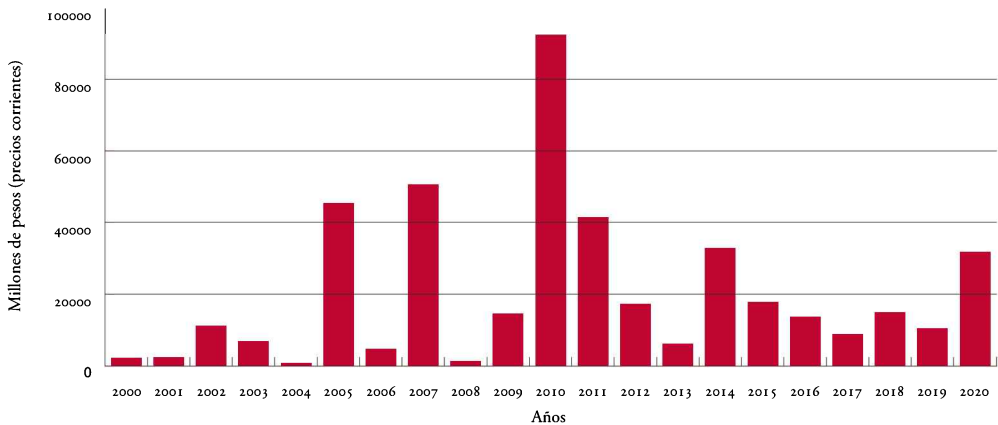


Figura 2. Evolución del costo de los desastres en México (2000-2020).

Fuente : Cenapred, 2020:3.

Al igual que el número de personas afectadas, los costos a precios corrientes han tenido una tendencia creciente, al maximizar los montos avalados por el FONDEN en el período 2000-2020. En dicho lapso, a excepción del 2017, el 84 % de los costos estuvo asociado a desastres de índole hidrometeorológica. Mientras tanto, en el año exceptuado los eventos geológicos encabezaron los costos, debido a los sismos de la Ciudad de México, centro y sur del país.

El cambio en la administración mexicana pública federal de 2018 originó una serie de transformaciones en la atención de los efectos de desastres. El 21 de octubre de 2020, el Senado de la República aprobó la desaparición de 109 fideicomisos, entre los

que uno correspondía al FONDEN (Rodríguez, 2022:6), por lo que parte de sus funciones pasaron a cargo del Programa para la Atención de Emergencias por Amenazas Naturales (PAEN, DOF, 16/08/2021). El objetivo del programa es “asegurar que la población afectada por amenazas naturales reciba atención suficiente por parte del gobierno estatal y municipal ante emergencias”; asimismo, la unidad responsable de su implementación es la Coordinación Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC). Los objetivos específicos del PAEN son:

- a) Apoyar a las entidades federales cuyas capacidades operativas y financieras se encuentren rebasadas, para brindar suministros de auxilio a la población afectada por una amenaza natural.
- b) Fortalecer el marco normativo para la atención de emergencias por catástrofes naturales.
- c) Desarrollar el conocimiento del personal de protección civil de las entidades federativas en el acceso al programa presupuestario para la atención de emergencias.
- d) Fomentar contenidos y materiales para la capacitación de las Unidades Estatales de Protección Civil (PAEN, Art. 2).²

De esta forma, el programa se preocupa por los individuos y sus bienes en caso de que sean afectados por amenazas hidrometeorológicas: una vez emitida la declaratoria de emergencia, con los recursos se tiende a recuperar las necesidades básicas de alimentación, cobijo y salud de los habitantes. Al igual que el FONDEN, este programa se aplica una vez que las autoridades municipales y estatales son incapaces de atender a la población afectada. Sin embargo, hasta este momento el programa no contempla acciones preventivas contra el riesgo de desastres, sino que se dedica a atender sus efectos.

En lo que compete a la recuperación posterior a desastres, la Secretaría de Bienestar es el órgano responsable de entregar apoyos para la reconstrucción de zonas perjudicadas. Por ejemplo, a través del Plan de Apoyo a Personas Afectadas por el Huracán Grace en Veracruz, el 2 de octubre de 2020 se entregaron \$1,586 millones de pesos a 45 318 personas cuyas viviendas habrían sido afectadas por el huracán; cada familia recibió hasta \$35,000 pesos. Por otro lado, se entregaron \$4,500 pesos al sector agropecuario, para atender las pérdidas de ganado o unidades de producción agrícola. La inversión total fue de \$108,616,500 pesos hasta el 2021 (Secretaría de Bienestar, 2021). Como se puede observar, existe una visión “individualista” respecto al tema de la reconstrucción después de un evento catastrófico; esto último procede una vez levantado un

² Las amenazas de tipo hidrometeorológico contempladas en el Programa para la Atención de Emergencias por Amenazas Naturales (PAEAN) son: tormenta tropical, huracán, vientos fuertes, lluvia severa, mar de fondo, marea de tormenta, nevada o granizada severa, inundación fluvial, inundación pluvial, onda de calor y tornado (PAEAN, Art. 7).

censo de los afectados y la disponibilidad presupuestal en las arcas del gobierno federal. Hasta el término de este análisis, se ignoraba si se habían destinado recursos para la prevención del riesgo de desastres.

Por otro lado, “el municipio es [...] el otorgante primario de los servicios de protección civil y, por lo tanto, el primer responsable en términos de estructura gubernamental de prevenir, gestionar y mitigar los riesgos ante los peligros naturales y antropogénicos” (Ruiz, Casado y Sánchez, 2015:147). Según los autores, en el México del 2013 existían 192 atlas de riesgos municipales como parte del Programa de Prevención de Riesgos en Asentamientos Humanos (PRAH), dependiente de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (Ruiz, Casado y Sánchez, 2015:156). Ahora bien, para el 2020, se integraron al Atlas Nacional de Riesgos, dependiente del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), un total de 493 atlas de riesgos municipales (elaborados entre 2000 y 2020); es decir, un 32 % del total de municipios en el país (2 469 municipios).

Tabla 1. Total de atlas de riesgos municipales en México por regiones.

Entidad federativa	Total de municipios	Total de atlas	Porcentaje
Región Norte			
Baja California	6	4	67
Baja California Sur	5	4	80
Chihuahua	67	8	12
Coahuila	38	4	11
Durango	39	4	10
Nuevo León	51	6	12
Sinaloa	18	12	67
Sonora	72	10	14
Tamaulipas	43	8	19
Subtotales/promedio	339	60	32
Región Centro-Occidente			
Aguascalientes	11	4	36
Colima	10	8	80
Guanajuato	46	3	7
Jalisco	125	11	9
Michoacán	113	28	25
Nayarit	20	14	70

Entidad federativa	Total de municipios	Total de atlas	Porcentaje
Querétaro	18	5	28
San Luis Potosí	58	2	3
Zacatecas	58	4	7
Subtotales/promedio	459	79	29
Región Centro-Sur			
Ciudad de México	16	13	81
Guerrero	81	3	4
Hidalgo	84	25	30
Estado de México	125	125	100
Morelos	36	13	36
Oaxaca	570	37	6
Puebla	217	38	18
Tlaxcala	60	10	17
Subtotales/promedio	1,189	264	36
Región Sureste			
Campeche	12	3	25
Chiapas	124	21	17
Quintana Roo	11	8	73
Tabasco	17	6	35
Veracruz	212	38	18
Yucatán	106	14	13
Subtotales/promedio	482	90	30
Totales/promedio	2,469	493	32

Fuente: CENAPRED, 2020b.

De acuerdo con la Tabla 1, las cuatro regiones mantienen una cobertura similar en cuanto al número de atlas de riesgos municipales, ya que apenas cubren una tercera parte del número total de los municipios por región. La excepción se presenta en el Estado de México, que cuenta con un 100 %, y cuya región alcanza un porcentaje del 36 %, la más alta a nivel nacional.

Los atlas de riesgos municipales funcionan como una herramienta para la planificación física contra desastres naturales, cuyo objetivo es la búsqueda de prevención, atención y recuperación de la población y sus propiedades afectadas tras el embate de una amenaza hidrometeorológica. La poca cobertura nacional de los atlas de riesgos municipa-

les espejea un problema estructural en la política de reducción del riesgo; la ausencia de estos se traduce en deficiencias que impiden la elaboración y actualización de estos instrumentos de política pública, puesto que representan un gran esfuerzo para los municipios como desafíos metodológicos e institucionales (Ruiz, Casado y Sánchez, 2015:147). En este sentido, algunos municipios cuentan con vastos recursos: económicos, logísticos y de personal, para la coordinación y elaboración de sus respectivos atlas; por otro lado, la gran mayoría carecen de estos recursos, por lo que afrontan un gran obstáculo para prevenir el riesgo de desastres en sus respectivos territorios. Recordemos que, casi todos los municipios urbanos donde se asientan las capitales de los estados, así como sus áreas metropolitanas, cuentan con su atlas, mientras que en el resto de los municipios se mantiene un singular rezago.

Con todo y lo anterior, la mayoría de los atlas de riesgos municipales e incluso estatales carecen del análisis del riesgo. Si bien los atlas son considerados después de presentada una amenaza, ya que operan como una agrupación de mapas donde se reportan los eventos de emergencia o desastres, dejan de lado el componente social, representado por la vulnerabilidad. Debe quedar bastante claro que estos manuales deben ser dinámicos en una plataforma electrónica; manejada y actualizada por expertos, asimismo, deben ser un elemento necesario que las personas sujetas al riesgo conozcan y del que puedan formar parte en la toma de decisiones (González, B., 1 de octubre de 2021).

Ante el rezago que se presenta en México tanto de la prevención del riesgo, como del análisis de las causas que desencadenan los desastres, en 2011 se conformó la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM), como una forma de vincular el conocimiento académico y científico con la prevención de los desastres.

DESAFÍOS DE LA RED DE DESASTRES ASOCIADOS A FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS (REDESCLIM)

A partir del año 2008, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) apoyó la conformación de redes temáticas de investigación a nivel nacional. Estos grupos van encaminados a la solución de problemas nacionales mediante el desarrollo de la ciencia, tecnología, innovación y colaboración de la sociedad civil organizada. REDESCLIM es una red temática de investigación formalizada el 25 de febrero de 2011 entre el Conacyt y un grupo de diez investigadores nacionales de instituciones académicas: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), los centros de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y el de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y El Colegio de la Frontera Norte (El Colef).

El objetivo de REDESCLIM ha sido fortalecer el trabajo colaborativo entre sus miembros, quienes se desenvuelven en el medio académico como investigadores y estudiantes de posgrado; funcionarios públicos, en sus tres niveles, así como la sociedad civil organizada para la reducción del riesgo de desastres de origen climático e hidrometeorológico en el país. Para organizar estos esfuerzos, se conformaron cinco líneas con el propósito de cubrir las fases sobre la gestión del riesgo; es decir, la identificación de la amenaza, prevención, preparación, atención, recuperación y reconstrucción:

- 1) Monitoreo, bases de datos y disseminación de información.
- 2) Diagnóstico y análisis de procesos.
- 3) Pronóstico meteorológico y prevención de desastres.
- 4) Modelación climática y análisis de procesos.
- 5) Políticas públicas y estrategias de comunicación.

En los últimos once años, REDESCLIM ha organizado nueve reuniones nacionales en distintas sedes³ con la intención de arribar a los estados con mayor exposición a eventos hidrometeorológicos, entre ellos la Ciudad de México, e involucrar a los organismos locales de protección civil, planeación del desarrollo urbano, entre otros. Asimismo se ha tratado de cubrir las regiones expuestas a inundaciones, huracanes, sequías, entre otros. Los logros alcanzados hasta inicios de la segunda década del siglo XXI por REDESCLIM han cubierto una amplia gama de productos y actividades, entre los que destacan la elaboración de un Plan de Trabajo conformado a partir de las primeras dos reuniones en las que sus miembros discutieron los apoyos y acciones para desarrollar, en los años venideros, los proyectos semilla que estimulen el trabajo colaborativo entre los miembros. Durante la tercera reunión (2014), se obtuvo el Plan Estratégico 2015-2016, donde se esbozaron los objetivos y las metas de la red para esos años, además de las líneas de acción para cuatro ejes estratégicos.

Para la creación del Plan Estratégico Nacional 2015-2016 de REDESCLIM se tomó como base el esquema de un marco lógico y su congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (Eje 1 “México en Paz”). Además, se propusieron líneas de acción que complementaron las del Objetivo 1.6: salvaguardar a la población, sus bienes y entorno ante un desastre de origen natural o humano. En este sentido, la propuesta del Plan Estratégico pretendió abordar el riesgo de desastres asociados a fenómenos hidro-

3 Las reuniones nacionales de REDESCLIM se han realizado en Huatulco, Oaxaca (2012), Ciudad de México (2013-2014), Boca del Río, Veracruz (2015 y 2019), La Paz, Baja California Sur (2017), Querétaro, Querétaro (2018), Puerto Vallarta, Jalisco (2020) y Zacatecas, Zacatecas (2021).

meteorológicos y climáticos a partir de acciones a nivel nacional, estatal y municipal, entre las que destacan (REDESCLIM, 2014:7):

- Coadyuvar en mejorar y ampliar el monitoreo continuo y la calidad de los datos hidroclimáticos y socioeconómicos para la toma de decisiones.
- Aumentar la capacidad de predecir los fenómenos naturales con menos incertidumbre para mejorar las alertas tempranas.
- Entender las causas físicas y sociales asociadas al riesgo y la vulnerabilidad.
- Fortalecer y crear capacidades para mejorar la prevención y reducción de los riesgos.
- Contribuir a la elaboración de políticas, programas y toma de decisiones (REDESCLIM, 2014:8).

El Plan Estratégico identificó que se requieren respuestas eficientes y realistas a través de una mayor coordinación entre los tres órdenes de gobierno y la participación de los sectores público, social, privado y científico. La planeación promovió la aplicación transversal de una política nacional con lineamientos de corto, mediano y largo plazo, como se muestra en la Tabla 2 (REDESCLIM, 2014:8).

Tabla 2. Plan Estratégico Nacional 2015-2016 de REDESCLIM.

Ejes estratégicos	Objetivos	Líneas de acción	Metas
Monitoreo y bases de datos	Mejorar el monitoreo, la disponibilidad de datos y el entendimiento de las causas físicas y sociales de los desastres históricos, actuales y bajo condiciones de cambio climático	Fortalecer el monitoreo ambiental y geofísico en el continente y mares	Inventario de bases de datos, plataforma digital y convenio marco
		Diagnosticar las capacidades de los gobiernos estatales y municipales para la prevención y reducción de los desastres	Diseño y aplicación de instrumentos de capacidades de los gobiernos
		Integrar las bases de datos socioeconómicas asociadas a la vulnerabilidad municipal	Bases de datos socioeconómicas sobre vulnerabilidad municipal

Ejes estratégicos	Objetivos	Líneas de acción	Metas
Vulnerabilidad y difusión	Desarrollar y fortalecer las capacidades de los tomadores de decisiones para prevenir y reducir el riesgo y la vulnerabilidad en el corto, mediano y largo plazos	<p>Mejorar el análisis de la vulnerabilidad a eventos históricos y bajo condiciones de cambio climático y fortalecer la difusión de los resultados entre los tomadores de decisiones</p> <p>Fortalecer la colaboración científica y las órdenes de gobierno e instituciones dedicados a la prevención y atención de desastres</p>	<p>Guías metodológicas para el diagnóstico de la vulnerabilidad, talleres y fortalecimiento de capacidades</p> <p>Reuniones de trabajo, talleres, catálogo de capacidades entre REDESclim y tomadores de decisiones</p>
Comunicación social	Mejorar la comunicación con la sociedad para optimizar la capacidad de respuesta y la prevención de los desastres	<p>Crear un centro virtual de información para la divulgación y comunicación sobre riesgos de desastres en la página de REDESclim</p> <p>Desarrollar programas de información sobre riesgo de desastres asociados a eventos meteorológicos, climáticos y sobre el cambio climático</p> <p>Promover la difusión de información sobre riesgos de desastres, alertas tempranas y cambio climático en distintos formatos</p> <p>Fortalecer la imagen institucional de REDESclim</p>	<p>Centro virtual dirigido a normativos y tomadores de decisiones, su evaluación y seguimiento</p> <p>Sondear problemas de comunicación del riesgo e implementar talleres de capacitación sobre comunicación del riesgo</p> <p>Productos de comunicación del riesgo (radio local, tv, obras de teatro y redes sociales)</p> <p>Identificar de necesidades y creación de comisiones de trabajo</p>
Proyección de REDESclim	Fortalecimiento, permanencia y proyección de REDESclim a nivel nacional e internacional	<p>Gestionar financiamiento a través de proyectos grupales de gran alcance</p> <p>Fortalecer la vinculación de REDESclim con diferentes actores de la sociedad</p>	<p>Padrón de convocatorias, formato para asentar proyectos transversales y listado de proyectos potenciales</p> <p>Ampliación de la membresía, cartas de intención y convenios de colaboración</p>

Fuente: adaptado de Plan Estratégico Nacional 2015-2016 de REDESclim, 2014.

Los logros alcanzados en el marco del Plan Estratégico Nacional 2015-2016 poseen diferentes niveles de avance debido a factores tanto internos como externos. Para el primer caso, resalta la propia ventaja de la membresía de la red, ya que en 2012 existieron 58 miembros, y para 2015 ascendieron a 133. Sin embargo, esto no significó el cumplimiento de las metas programadas, ya que, al igual que otras redes académicas, las múltiples responsabilidades y compromisos institucionales (clases de posgrado, proyectos de investigación, dirección de tesis, etc.) los obligaron a desatender el trabajo en red. Por lo tanto, varias metas se alcanzaron de manera parcial o con poco avance, como fue el caso de las líneas “integrar las bases de datos socioeconómicas asociadas a la vulnerabilidad municipal” y “gestionar el financiamiento a través de proyectos grupales de gran alcance”. No obstante, las demás metas lograron progresos importantes, como la realización de cuatro reuniones nacionales (2012, 2013, 2014 y 2015); la impartición y asistencia a talleres y seminarios, como un coloquio de huracanes; la actualización de plataformas climáticas (CLICOM) y de cambio climático (Escenarios INECC). La edición de una revista de divulgación y un libro académico. Así como el diseño y presentación de la página electrónica de REDESclim, entre otros productos y actividades.

En lo que respecta a factores externos, la falta de financiamiento en el año 2016 representó un elemento que dificultó el cumplimiento del plan estratégico. El Conacyt había financiado, con constancia, las actividades de la red del 2011 al 2015, lo que permitió el trabajo colaborativo de sus miembros. Sin embargo, la ausencia del apoyo en el 2016 limitó el cumplimiento de los compromisos propuestos, pero todavía se realizaron reuniones virtuales, estrategia que en la actualidad cobra relevancia para reducir los costos de traslado y hospedaje de los participantes.

A partir de la cuarta reunión nacional en 2015, el formato de participación se modificó con el recibimiento de trabajos de investigación concluidos o en proceso que resumían los logros alcanzados en cada una de las cinco líneas temáticas. Si bien esta medida postergó el cumplimiento de algunas metas del plan estratégico de ese año, también impulsó una veta de colaboración que pocas veces se observa en las redes de investigación. Los trabajos presentados en la cuarta reunión nacional favorecieron los análisis realizados por dos o más miembros de la red, condición que fortaleció el trabajo colaborativo entre sus miembros y que aún prevalece. Con ello, se han alcanzado seis publicaciones arbitradas que plantean los temas de monitoreo, desastres (y sus riesgos), sistemas de alerta temprana y gestión del riesgo de desastres, para la comprensión de los eventos hidrometeorológicos extremos y la reducción de eventos negativos, temas que están contenidos tanto en las líneas temáticas de REDESclim como en el Plan Estratégico 2015-2016.

Por otro lado, y con el propósito de abarcar un mayor público, se han desarrollado actividades para los miembros de la red y el público en general, como el Seminario Nacional REDESclim, además de talleres y cursos de capacitación enfocados en el aprendi-

zaje para la reducción, gestión y conocimiento de la amenaza hidrometeorológica y del riesgo de desastres. Para el 2021, REDESCLIM contaba con 150 miembros distribuidos en la mayoría de los estados del país.

Respecto a la incidencia de REDESCLIM en la agenda de la política pública para la reducción del riesgo de desastres, destaca el artículo “Apoyo técnico para el estudio de riesgos a inundaciones en el municipio de Atenango del Río, Guerrero”, donde algunos miembros de la red colaboraron entre sí: autoridades municipales, protección civil, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Universidad Autónoma de Guerrero, quienes lograron proponer medidas para evitar futuras inundaciones asociadas al río Amacuzac (Frausto y Guevara, 2021). Por otro lado, despunta el proyecto “Perfil de resiliencia urbana del municipio de Bahía de Banderas, Nayarit”, donde se establecen indicadores y propuestas para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia ante agentes perturbadores, eventos hidrometeorológicos y otras amenazas de origen sanitario (Implan, 2019). Los colaboradores pertenecían al cuerpo de REDESCLIM, autoridades municipales, el Centro Universitario de la Costa (Universidad de Guadalajara) y la Universidad de Quintana Roo.

AGENDA PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Los últimos años han estado caracterizados por una amplia producción de publicaciones, reportes e informes sobre el impacto de los desastres asociados a fenómenos naturales. Estos materiales están dirigidos hacia el conocimiento de la amenaza, particularmente los fenómenos hidrometeorológicos, los contextos de vulnerabilidad de las comunidades, la resiliencia de grupos sociales y de infraestructura expuesta, así como las características propias de los desastres, entre otros temas.

Ahora bien, de acuerdo con Renn y Klinke (2013), existen tres problemas que resultan del conocimiento del riesgo:

Complejidad: dificultad para identificar y cuantificar los afectados potenciales y los efectos negativos específicos.

Incertidumbre científica: limitación o ausencia de conocimiento científico que dificulta la evaluación de la probabilidad y los posibles resultados de los efectos del desastre.

Ambigüedad sociopolítica: situación de ambivalencia en la que existen interpretaciones diferentes y a veces divergentes sobre los fenómenos de riesgo y sus circunstancias.

Estos elementos dificultan la elaboración de verdaderos atlas de riesgo municipales cuya intención sea reducir el peligro, además de atender los efectos de los desastres.

La reducción del riesgo es un tema transversal a la planeación en un sentido amplio, ya que intervienen factores políticos, económicos, sociales, ambientales y culturales. Desde esta perspectiva, el riesgo es producto del incremento de la vulnerabilidad; entiéndase como la incapacidad de la sociedad para enfrentar el riesgo, pero también como el conjunto de contextos en que ocurre una amenaza, por lo que se requiere aplicar un enfoque integrador para conocer sus causas, las raíces del riesgo, reducir los efectos de los desastres y, mejor aún, reducir el peligro.

Adicionalmente, es necesario evitar el término *desastre natural*, y solo referirse a la *amenaza*, ya que se ha comprobado que la influencia de los procesos naturales (lluvias, granizo, calor, frío, etc.) se ve magnificada por la humana. Es decir, se exagera el deterioro ambiental debido a las altas tasas de urbanización y la ocupación de áreas altamente expuestas a las amenazas. Desde el enfoque integrador del riesgo, es necesario considerar algunos elementos que permitan su reducción a corto y mediano plazo:

1. Procesos estructurales, referidos al incumplimiento de los reglamentos de construcción, uso del suelo, etc., al momento de autorizar nuevos desarrollos urbanos.
2. Abatimiento del rezago urbano, social, económico y territorial, como línea base para la reducción de riesgo y enfoque de adaptación.
3. Orientación socioambiental para usar unidades analíticas integradoras entre los elementos naturales y sociales (las cuencas hidrográficas, por ejemplo).
4. Gestión del riesgo de desastres que involucre a los tres niveles de gobierno (el riesgo de desastre no obedece a límites administrativos).
5. Planes y programas de reducción del riesgo que garanticen la inclusión social, ya que se “deben contar con la participación organizada, informada y en igualdad de condiciones respecto a la participación en las decisiones, de los sectores, grupos o personas involucradas” (Chuaqui, Mally y Parraguez, 2016:184).
6. Fortalecimiento de la memoria a través del conocimiento de los desastres, para que el recuerdo de sus efectos prevalezca, y así evitar la reproducción del riesgo en el futuro (Saavedra, Rubio, Valenzuela y Balboa, 2019:13).
7. Entendimiento sobre los desastres como situaciones recurrentes, y algunos casos exacerbados por el cambio climático (Rodríguez, 2017:149).
8. Inclusión en la cultura del riesgo, ya que estos valores se actualizan al día, no solo en temporada de huracanes. Tanto mujeres como varones pueden poseer una perspectiva diferente sobre el riesgo (Douglas, 1996:57-71).
9. Fortalecimiento de una política de reducción del riesgo y sus causas, ya que, así como es importante atender los efectos de los desastres, también lo es minimizar

las causas del riesgo, cuyo enfoque se orientaría a erigir asentamientos humanos más seguros.

De igual manera, es menester replantear la política de reducción del riesgo a una de necesidades. Por ejemplo, la carencia de agua potable y electricidad en una comunidad se ven como disposiciones que deben ser cubiertas por las autoridades correspondientes, pero el riesgo se ve como un tema tangencial a este tipo de crisis, a pesar de que los servicios públicos se vean comprometidos o destruidos, durante el desastre. El riesgo, como necesidad a solucionar, tiene que superar su dimensión temporal, ya que solo se le da importancia cuando es inminente la ocurrencia de una amenaza: lluvias intensas, huracanes, sismos, por mencionar algunos.

Por su parte, es necesario fortalecer los mecanismos “traductores” o “mediadores” entre los que se generan conocimientos académicos-técnicos y las necesidades de las comunidades y de quienes deciden. Numerosas investigaciones que se han desarrollado por técnicos y científicos quedan en un plano “virtual”, sin aplicarse a la realidad para solucionar problemas existentes y actuales de la sociedad.

Los desafíos pendientes de REDESCLIM deben enfocarse la solución de los puntos anteriormente expuestos, además de la comprensión de los eventos hidrometeorológicos y climáticos, elaborar modelos climáticos y pronósticos más precisos, así como de proveer insumos para las políticas públicas. La historia de REDESCLIM ha abonado a estos y otros aspectos, pero debe consolidar su acción específica a través de los siguientes temas:

Actualización del Plan Estratégico Nacional, para lograr el cumplimiento de cada una de sus metas, así como los indicadores para medir sus avances.

Mantenimiento del sentido colaborativo del trabajo, ya que el beneficio de una red de investigación es la riqueza del conocimiento interdisciplinario, así como la comunicación del mismo.

Fortalecimiento de la transferencia cognitiva de sus investigaciones a la solución de problemas específicos. Una respuesta a ello es trabajar conjuntamente con los encargados de la reducción del riesgo a nivel local, como lo evidencian los casos del municipio de Atenango, Guerrero y de Bahía de Banderas, Nayarit.

Aseguramiento del financiamiento, para garantizar la operación de la red, elaboración de un proyecto estratégico nacional y la formación de recursos humanos especializados.

Finalmente, el gran desafío al que se enfrenta la reducción del riesgo de desastres es dar respuesta a cómo llevar dicha temática a un nivel de prioridad, tanto para las autori-

dades como para las comunidades bajo riesgo. Se sabe que la autoridad, en cualquiera de sus tres niveles, trabaja según sus prioridades de gobierno; es decir, las que están contenidas en planes de desarrollo social, urbano y económico. Por su parte, las prioridades de las personas para tener cierto nivel de bienestar, tales como empleo, vivienda, salud y esparcimiento, resultan importantes para determinar sus rutinas. Ante esto, se deben replantear las prioridades institucionales y comunales para formar una visión de largo plazo que persista y se renueve cada tres o seis años, dando por resultado un asentamiento humano más seguro ante fenómenos hidrometeorológicos.

COMENTARIOS FINALES

El cambio climático no es un fenómeno, sino la condición actual de los factores del clima (temperatura, precipitación, etc.), pero en la actualidad es común escuchar en los medios de comunicación que este afecta de manera significativa a la sociedad y los ecosistemas. Si bien, es cierto que en las últimas décadas la acción humana es responsable de las anomalías en la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, también es necesario decir que el acontecimiento de desastres se debe a una mayor exposición de la sociedad frente a la amenaza y aumento de su vulnerabilidad. El cambio climático no solo hace referencia a lo ambiental, sino que también se entiende y explica por los procesos sociales que lo originaron. La vulnerabilidad hace referencia a las debilidades de una comunidad o sector social ante una amenaza particular, por lo que, para reducir el riesgo de desastres, se debe disminuir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de los asentamientos humanos.

El impacto de los desastres en México se ha mantenido constante durante las dos últimas décadas. El acacimiento de estos eventos demuestra que se siguen construyendo contextos de vulnerabilidad, donde las comunidades son incapaces de reponerse después de que han sido impactadas por un fenómeno natural. En un contexto de cambio climático, estos fenómenos se presentarán con más frecuencia e intensidad.

La REDESCLIM surgió como una necesidad para conjuntar esfuerzos entre científicos de diferentes disciplinas, instituciones y campos de acción, y así resolver problemas complejos como los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos. A pesar de haber alcanzado algunas metas y conformar un grupo de investigación consolidado, aún se requiere del trabajo colaborativo para incidir en la reducción del riesgo de desastres. El reto futuro será cómo llevar los resultados de esa colaboración directamente a las comunidades afectadas por los desastres y reducir su riesgo. Los casos citados del municipio de Atenango en Guerrero y de Bahía de Banderas, Nayarit, son solo dos ejemplos recientes de cómo REDESCLIM aporta soluciones para la reducción del

riesgo, pero todavía son demasiados los casos a nivel nacional que requieren del trabajo conjunto entre expertos. Ante esto, las publicaciones de la red presentan casos de estudio que pueden aplicarse o tomarse como referencia para otras regiones.

El reto actual para incidir en las políticas públicas de reducción del riesgo de desastres es convencer a los actores involucrados de que el peligro es atemporal, y no solo se debe considerar ante la inminencia de que ocurra un fenómeno natural intenso, sino que se va construyendo socialmente debido al uso del territorio, en contra de sus propias dinámicas naturales, como la deforestación, modificación de laderas, etc. El riesgo debe ser visto como un proceso, donde intervienen factores sociales, naturales y políticos. REDESClim entiende este tipo de desarrollos; sin embargo, todavía se debe dar seguimiento a las investigaciones referentes, involucrar a los tomadores de decisiones, los encargados de la reducción del riesgo y la sociedad, pero en particular a las comunidades más expuestas a eventos hidrometeorológicos extremos.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2012). FONDEN. *El Fondo de Desastres naturales de México-Una reseña*. Banco Mundial, Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, Swiss Confederation, Secretaría de Gobernación, México. Recuperado de <http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/FONDEN/imagenes/ResenaLibroFONDEN.PDF>
- Cardona, Omar D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesarias para la gestión*. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos, Bogotá. CEDERI, Universidad de los Andes.
- CENAPRED. (2020). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurrido en México. Resumen ejecutivo 2020*. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/455-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2020.PDF>
- CENAPRED. (2020b). *Cobertura de atlas municipales. Atlas Nacional de Riesgos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- CENAPRED. (2010-2020). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurrido en México*. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. Recuperado de http://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobmx/buscar_buscaSubcategoria.action
- Chuaqui, Jorge; Mally, David y Parraguez, Rubí. (2016). El concepto de inclusión social. *Revista de Ciencias Sociales*, núm. 69, ISSN 0716-7725, Universidad de Valparaíso. Recuperado de <https://revistas.uv.cl/index.php/rcs/article/view/927/890>

- DOF. (16/08/2021). *Acuerdo que establece los lineamientos del Programa para la Atención de Emergencias por Amenazas Naturales*. *Diario Oficial de la Federación*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. México.
- Douglas, Mary. (1996). *La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales*. Paidós. España.
- Frausto, Oscar y Guevara Cárdenas, Andrés. (2021). *Apoyo técnico para el estudio del riesgo a inundaciones del municipio de Atenango del Río, Guerrero*. REDESCLIM, Municipio de Atenango del Río, Guerrero.
- González Durand, Berenice. (1 de octubre de 2021). Desastres naturales: no sólo culpa del cambio climático. *El Universal*, Sección Ciencia y Salud. Recuperado de <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/desastres-naturales-no-solo-culpa-del-cambio-climatico>
- Hewitt, Kenneth. (1983). The idea of calamity in a technocratic age. En: Kenneth Hewitt (editor). *Interpretations of calamity* (pp. 3-33). Allen & Unwin Inc., EE.UU.
- Hewitt, Kenneth. (1996). Daños ocultos y riesgos encubiertos: haciendo visible el espacio social de los desastres. En: Elizabeth Mansilla (editora). *Desastres: modelo para armar. Colección de piezas de un rompecabezas social* (pp. 23-45). La Red, Perú.
- Implan. (2019). *Perfil de resiliencia del municipio de Bahía de Banderas, Nayarit*. Instituto Municipal de Planeación de Bahía de Banderas, REDESCLIM, Quintana Roo, México.
- IPCC. (2018). *Glosario de términos del IPCC*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_WGII_glossary_ES.pdf
- UN. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, Naciones Unidas. Recuperado de https://www.unisdr.org/files/7817_unisdrterminologyspanish.pdf
- REDESCLIM. (2014). *Plan Estratégico Nacional 2015-2016*. Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos, México. Recuperado de <https://www.redesclim.org.mx/archivo>
- Renn, Ortwin y Klinke, Andreas. (2013). A framework of adaptive risk governance for urban planning. *Sustainability*, vol. 5, 2036-2059. Doi: 10.3390/su5052036
- Rodríguez Esteves, Juan Manuel. (2017). Los desastres recurrentes en México: el huracán Pauline y la tormenta Manuel en Acapulco, Guerrero. *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social "Disertaciones"*, vol. 10, núm. 2, pp. 133-152. Doi: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/disertaciones/a.4778>
- Rodríguez Esteves, Juan Manuel. (2022). Desastres y Covid-19: dos modelos para reducir el riesgo en México. *Frontera Norte*, vol. 34, e-ISSN: 2594-0260. Recuperado de <https://fronteranorte.colef.mx/index.php/fronteranorte/article/view/2161>
- Ruiz Rivera, Naxhelli; Casado Izquierdo, José María y Sánchez Salazar, María. (2015). Los atlas de riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial. *Investigaciones Geográficas*, núm. 88, pp. 146-162. Doi: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.48326>.

- Saavedra, Juan; Rubio Carrasco, Casandra; Valenzuela Contreras, Karina y Balboa Jiménez, Víctor (2019). Memoria local y afrontamiento de desastres climáticos: el caso de liderazgos de mujeres en Nonguén. *Región y Sociedad*, año 31/e1240. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v31/1870-3925-regsoc-31-e1240.pdf>
- Secretaría de Bienestar. (2021). *Entregados más de mil 694 mdp a afectados por huracán Grace en Veracruz: May Rodríguez*. Comunicado de prensa, 2 de octubre de 2021. Recuperado de <https://www.gob.mx/bienestar/prensa/entregados-mas-de-mil-694-mdp-a-afectados-por-huracan-grace-en-veracruz-may-rodriguez>
- Wilches Chau, Gustavo. (1993). “La vulnerabilidad global”. En: Andrew Maskrey (compilador). *Los desastres no son naturales* (pp. 11-44). La Red. Recuperado de <http://www.desenredando.org>

Carolina Andrea Ochoa Martínez^{1 y 4}
Antonio Luna Díaz Peón^{2, 3 y 4}

¹Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana

²Facultad de Biología, Universidad Veracruzana

³Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica, A. C.

⁴RedesClim

2

CAPÍTULO

CALIDAD DE LOS DATOS PARA LA CREACIÓN DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO DE TEMPERATURA PARA VERACRUZ

RESUMEN

El uso de índices permite ilustrar de forma práctica un proceso complejo. En ese sentido, la Organización Meteorológica Mundial recomienda el cálculo de índices climáticos para determinar el clima de una zona o región, y así reconocer las señales del cambio atmosférico a escala regional. Específicamente, se buscan indicios en referente a los extremos; sin embargo, para que dichos índices posean validez, deben sostenerse sobre una base conceptual rigurosa. Para tal efecto, los datos climatológicos deben superar una serie de pruebas estadísticas y físicas.

El estado de Veracruz cuenta con una red de estaciones climatológicas que dependen de la Comisión Nacional del Agua; no obstante, algunas investigaciones han demostrado que dicha red carece de calidad y, en consecuencia, podría afectar los estudios del mismo. Como es necesario analizar la veracidad y precisión de la información que sustentan las investigaciones climáticas, se obtuvieron datos climatológicos vía Internet en la página del Servicio Meteorológico Nacional. Se construyeron las bases de datos en serie de tiempo, se realizaron las pruebas de calidad en búsqueda de cifras inexactas y pruebas de homogeneidad. Mediante el software `RHTESTSV4`, se identificaron saltos en la media, se buscaron valores de temperatura marcados como sospechosos (*outliers*) y, finalmente, se calcularon los índices relacionados con la temperatura.

Los resultados de las 354 estaciones existentes, muestran que: 163 son operativas, 90 cuentan con menos del 10 % de datos faltantes, 2 se encuentran completas y el resto se hayan suspendidas o carecen de más del 50 % de información. Se concluye que hay evidencia de incremento en la temperatura en lugares donde las estaciones climatológicas cumplen el requisito mínimo de calidad de datos, para determinar los índices de cambio de temperatura. Además, se encontró que el universo de estaciones es insuficiente para establecer dichos índices, puesto que las bases de datos en Veracruz presentan errores significativos. Por tal motivo, se recomienda la verificación de las estaciones antes de utilizarlas.

ABSTRACT

The use of indices provides a practical illustration of a complex process. In this regard, the World Meteorological Organization recommends the calculation of climate indices to

determine the climate of an area or region, and thus recognize signs of atmospheric change on a regional scale. Specifically, indications are sought with regard to extremes; however, for such indices to be valid, they must be based on a rigorous conceptual foundation. For this purpose, climatological data must pass a series of statistical and physical tests.

The state of Veracruz has a network of climatological stations that depend on the National Water Commission; however, some research has shown that this network lacks quality and, consequently, could affect meteorological change studies. Since it is necessary to analyze the veracity and accuracy of the information that supports climate research, climatological data were obtained via the Internet from the National Meteorological Service website. The time series databases were constructed; quality and homogeneity tests were carried out in search of erroneous data tests. Using the `RHTESTSV4` software, we identified jumps in the mean, searched for temperature values marked as suspicious (outliers) and, finally, calculated the temperature-related indexes.

The results show that, of the 354 existing stations, 163 are operational, only two are complete, 90 have less than 10% of missing data and the rest are suspended or lack more than 50% of the information. It is concluded that there is evidence of temperature increase in places where weather stations meet the minimum data quality requirement to determine climate change indices of temperature. In addition, it was found that the universe of stations is insufficient to establish such indexes, since the climatological databases for Veracruz present significant errors. Therefore, it is recommended to verify the climatological stations before using them.

Keywords: climate change, climate extremes, indices.

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2000 los estudios sobre el cambio climático han incrementado considerablemente. Dichas investigaciones han evidenciado la inferencia hacia un calentamiento global; sin embargo, este tema no es nuevo. Jean-Baptiste Joseph Fourier fue pionero en observar que los gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, retienen el calor atmosférico (Dufresne *et al.*, 2006).

En 1988 se creó el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), bajo la tutela de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con el objetivo general de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre los aspectos y el discernimiento del cambio climático. Con más de treinta años de existencia, el IPCC ha emitido reportes de valoración

en 1990, 1996, 2001, 2007, 2013 y 2021, considerados como descripciones actualizadas del conocimiento del sistema climático y sus factores. Tales reportes destacan la evidencia de un calentamiento global y en consecuencia la intensificación de los extremos climáticos. En 2013, el quinto reporte señaló que “no existía duda de que se estaba produciendo un cambio climático como una consecuencia de la influencia humana”, con un intervalo de certeza del 95-100 % (IPCC, 2021). Posteriormente, se evaluaron las capacidades y límites de la naturaleza y la humanidad para adaptarse ante los impactos del cambio climático (Pörtner *et al.*, 2022).

De esta manera, el cambio climático inducido por la actividad humana afecta los fenómenos y extremos meteorológicos en todas las regiones. En los últimos 200 años, el componente antropogénico detectado del calentamiento global, y los cambios en el sistema climático, no tienen precedentes. De acuerdo al quinto reporte de evaluación (IPCC, 2021), la evidencia de cambios en los eventos extremos se ha fortalecido. Además, ese documento señala que las emisiones de gases de efecto invernadero, desde 1850, se ha aumentado la frecuencia, y/o la intensidad de algunos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en particular la temperatura. Asimismo, ofrece por primera vez un análisis detallado del cambio climático a nivel regional y presta especial atención a la información que puede servir de base para la evaluación de riesgos, la adaptación y la toma de decisiones (IPCC, 2021). Por último, el mismo reporte especifica que este riesgo latente ha causado daños sustanciales, pérdidas irreversibles y que su alcance y magnitud son mayores que los estimados en informes anteriores (Pörtner *et al.*, 2022).

A fin de evaluar los cambios en el clima, el grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI) creó 27 índices como una herramienta que permite obtener señales de cambio climático a escala regional — en lo referente a los extremos—, así como facilitar su entendimiento e ilustrar un proceso complejo. Sin embargo, los índices deben tener una base conceptual rigurosa que les dé validez; es decir, los datos climatológicos deben cumplir una serie de pruebas estadísticas y físicas (IPCC, 2021; OMM, 2021).

En Veracruz, la información climática procede de la red de estaciones climatológicas que dependen de la Comisión Nacional del Agua; no obstante, la deficiente calidad de la red pone en riesgo la precisión de las conclusiones (Luna Díaz Peón y Valdés Rodríguez, 2019; Luna Díaz Peón *et al.*, 2018). Por otra parte, se ha demostrado un deterioro físico en los instrumentos de medición (Luna Díaz Peón, 2019). Sin embargo, se han realizado investigaciones sobre cambio climático en valores extremos de temperatura y precipitación, como la de Vázquez *et al.*, (2008) y de los índices de cambio climático y análisis de la variabilidad en el estado de Veracruz de Torres Alavez *et al.*, (2018) que pasaron por el proceso riguroso de la selección de información y control de calidad de la misma.

que consistió en pruebas estadísticas simples y una inspección visual mediante gráficos específicos. Por tal motivo, se revisó que las temperaturas máximas no fueran menores que las mínimas ni el promedio y viceversa (OMM, 2011). Se detectaron y corrigieron los errores de falta de continuidad en la serie de tiempo. Además, se analizaron inconsistencias en los datos, tales como fechas repetidas o faltantes, se identificaron las estaciones en operación y las suspendidas (estaciones actualmente inhabilitadas pero que en el pasado registraron datos), tal como lo recomiendan Luna Díaz Peón *et al.*, (2018).

Se inspeccionaron las estaciones que presentaban mayor cantidad de información y que tenían los requisitos mínimos para los índices de cambio climático según las normas de la OMM (2011). El reglamento estipula calcular cada 10 años, en un periodo de 30 años, las tendencias estadísticas de referencia del clima, por ejemplo: a partir del año que termina en dígito 1, como los valores del periodo 1981-2010, considerados los valores más actuales en virtud de que no se han recopilado los años 1991-2020. El uso de índices expresa la relación entre las condiciones observadas y las de referencia mediante un solo valor. La referencia suele ser el estado medio del clima o *normal climatológica*.

Mediante el software RHTestsV4 —un paquete computacional para detectar y ajustar puntos de quiebre en el promedio de una serie de datos—, se realizaron las pruebas de calidad en búsqueda de datos erróneos. Se identificaron saltos en la media, se identificaron valores de temperatura marcados como sospechosos (*outliers*) y se analizó la homogeneidad de la serie. Los exámenes se centran principalmente en el reconocimiento de quiebres mediante una prueba F de máxima penalización; este procedimiento permite ver los cambios en la serie aplicada a un modelo de regresión de dos fases y en la homogeneización a través del método Quantile Machine, donde la distribución empírica de todos los segmentos de una base es igual a cada segmento de la serie a ajustar (Wang y Feng, 2010). Finalmente, de los 27 índices de cambio climático estipulados por el IPCC (2021), se consideró aplicar los relacionados con la temperatura, descritos a continuación:

- Rango diurno de temperatura (DTR): sean TX_{ij} y TN_{ij} las temperaturas máximas y mínimas diarias, respectivamente, en el día i en el período j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (1)$$

- Índice temperatura máxima extrema (TXx): sean TXx las temperaturas máximas diarias en el mes k , periodo j . La temperatura máxima diaria de cada mes es:

$$TXx_{kj} = \max(TXx_{kj}) \quad (2)$$

RESULTADOS

Existen 354 estaciones climatológicas distribuidas en el estado de Veracruz; 46 % se encuentran en operación, mientras que 54 % están suspendidas (Figura 2).

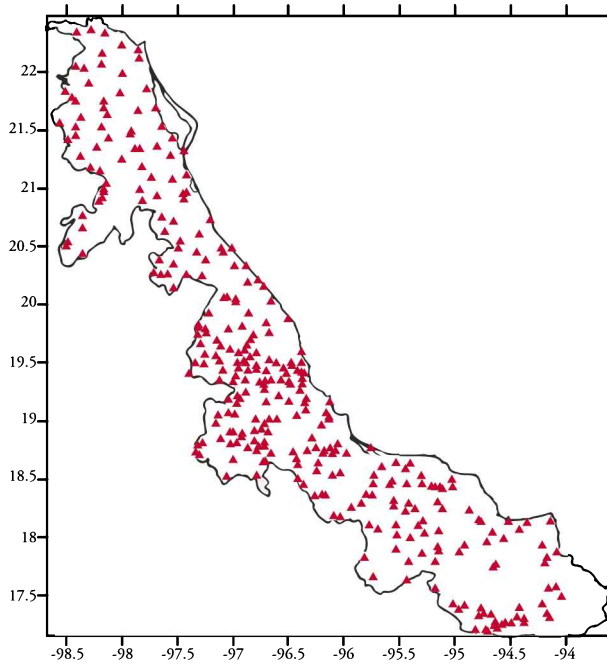


Figura 2. Ubicación de las 354 estaciones climatológicas del estado de Veracruz dependientes del Servicio Meteorológico Nacional. Fuente: SMN (2021).

Se ejecutaron las pruebas de calidad normadas y publicadas en la Guía de prácticas climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) a las estaciones que se encuentran en operación según el SMN. Solo 121 contaban con el 80 % de la información. Además, se aplicaron criterios para el manejo de datos, tales como tener menos de 10 días consecutivos de datos faltantes por mes y menos de seis años consecutivos de datos faltantes en la serie, por mencionar algunos; únicamente 109 estaciones cumplían con los criterios (Figura 3).

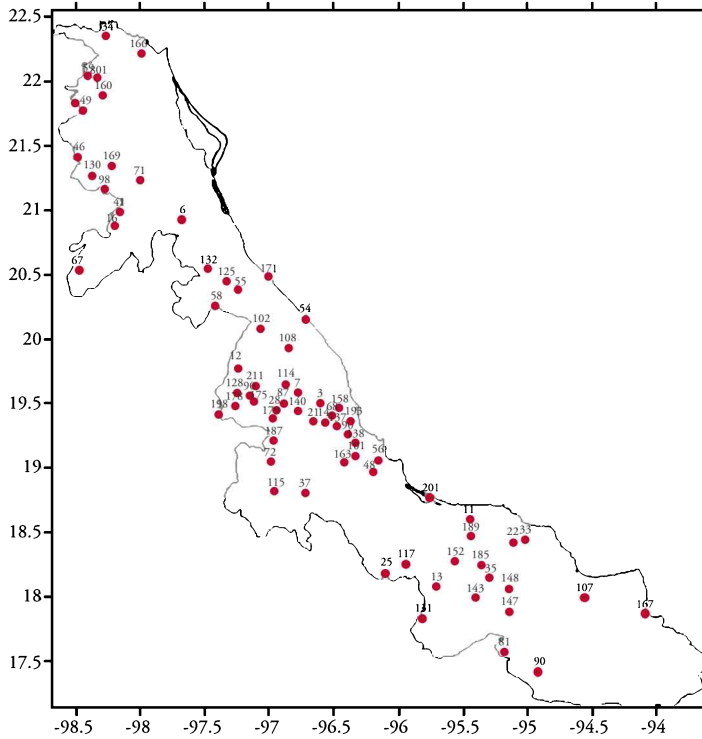


Figura 3. Ubicación de las 109 estaciones climatológicas del estado de Veracruz dependientes del Servicio Meteorológico Nacional que cumplen las normas de calidad de la OMM.
Fuente: SMN (2021).

A las estaciones resultantes se les asignaron pruebas de homogeneidad y calidad en búsqueda de datos erróneos. Posteriormente, se calcularon los índices climáticos ya mencionados en dos estaciones climatológicas: la de mayor y menor calidad.

Cabe señalar que la estación climatológica El Tejar (30056), se encuentra localizada en la zona costera central del estado de Veracruz, presenta el 100 % de la serie de tiempo. Se graficaron las variables de temperatura máxima y temperatura mínima registradas en esta ubicación (Figuras 4 y 5).

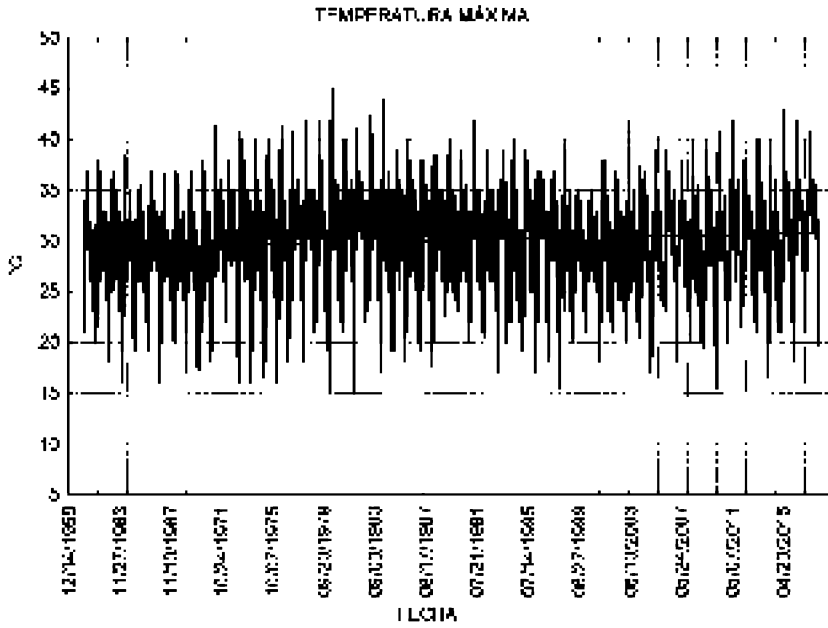


Figura 4. Temperatura máxima diaria de la estación climatológica El Tejar (30056).
Fuente: SMN (2021).

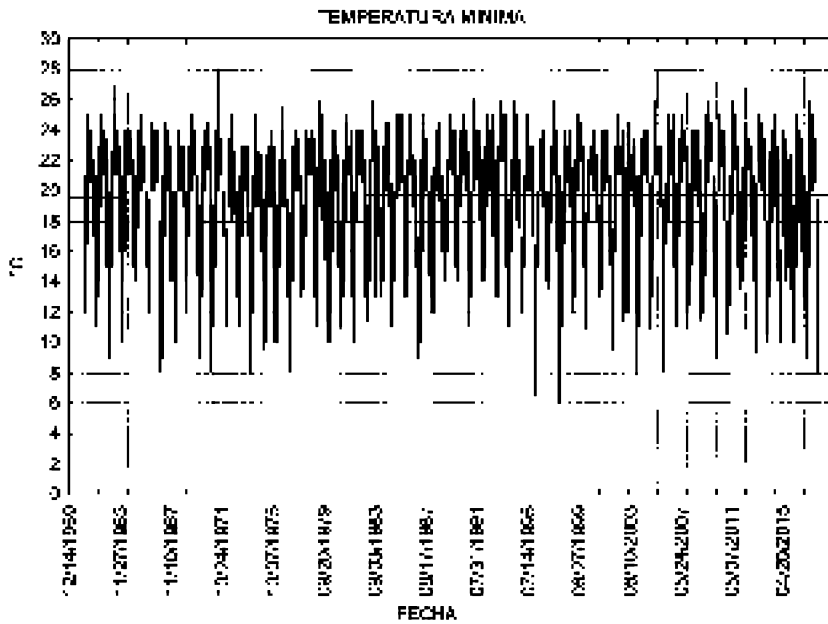


Figura 5. Temperatura mínima diaria de la estación climatológica El Tejar (30056).
Fuente: SMN (2021).

La estación climatológica Teocelo (30179), ubicada en la zona montañosa central del estado de Veracruz, presentó un 92.4 % de información de la serie de tiempo. De igual forma, se graficaron las variables de temperaturas máxima y mínima. En las Figuras 6 y 7 se pueden apreciar las lagunas de datos; además, se muestran algunas inconsistencias dentro de la serie. Para el caso de la variable de temperatura mínima diaria, se registró una temperatura inferior a los cero grados, que podría ser un dato aberrante.

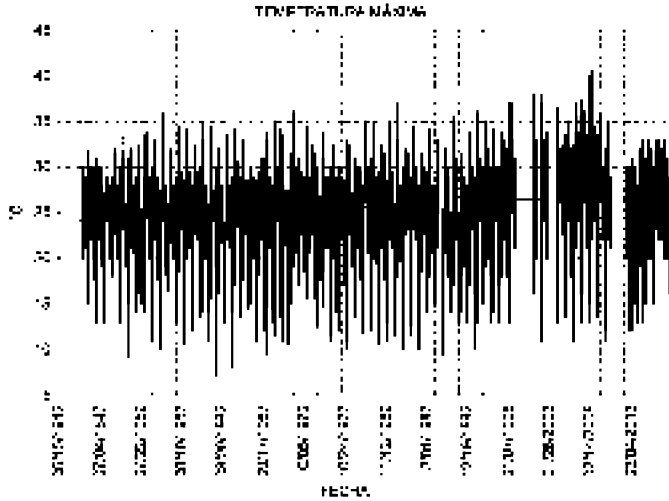


Figura 6. Temperatura máxima diaria de la estación climatológica Teocelo (30179).
Fuente: SMN (2021).

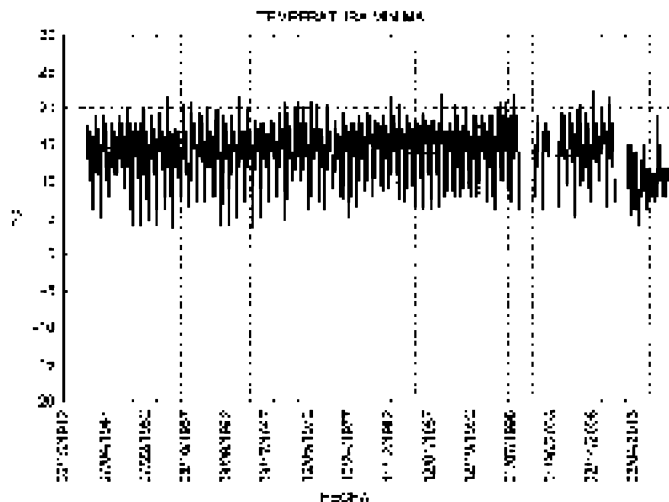


Figura 7. Temperatura mínima diaria de la estación climatológica Teocelo (30179).
Fuente: SMN (2021).

Se calcularon los índices climáticos de DTR y T_{x_x} para el periodo de estudio (Figura 8). En ambos casos se muestra un incremento en la temperatura, sin embargo, también se demuestra que la falta de datos puede dar resultados poco fiables.

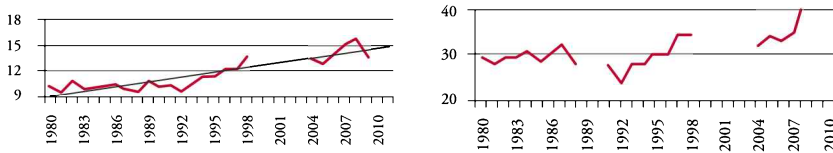


Figura 8. Izquierda: rango diario de temperatura (DTR); derecha: índice de temperatura máxima extrema (TXx).

CONCLUSIONES

El cambio climático representa uno de los grandes retos del presente siglo, pues tiene causas y consecuencias a escala global, aunque sus impactos se pueden presentar de forma heterogénea en una escala local. El clima constituye un factor que interviene en las actividades humanas, por tanto, entender su comportamiento pasado y presente resulta de vital importancia para el diseño de medidas eficaces de adaptación.

El uso de índices climáticos provee a la comunidad científica de una base teórica común, de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta para luego compararlos o integrar resultados regionales. Debido a lo anterior, contar con información de calidad resulta imprescindible.

En México existen serios problemas con la red de estaciones meteorológicas, las cuales son las proveedoras de elementos básicos para la modelación climática. Por lo tanto, las investigaciones de este tipo están sujetas a la escasa información que cubre los requisitos de control de calidad de los datos. Resulta de interés conocer los cambios que se den en el sistema climático para mejorar la calidad de los servicios y favorecer la planificación de estrategias y toma de decisiones.

Del ejercicio realizado en la presente investigación, se concluye que el conjunto de estaciones es demasiado reducido para calcular con precisión los índices de cambio climático. Puesto que las bases de datos para Veracruz presentan errores significativos, se recomienda verificar las estaciones antes de utilizarlas. Ante este panorama, se dificulta contar con estudios regionales que permitan evaluar los impactos de un fenómeno como el cambio climático.

Si bien la totalidad de estaciones climatológicas se encuentran distribuidas uniformemente en todo el estado de Veracruz, se encontró que, tanto en el norte como en el sur de la entidad, así como en la cuenca del Papaloapan, se aprecian demasiados espacios muertos.

Por último, para el caso de estudios regionales o locales sobre el cambio climático y, en particular, sobre el uso de índices climáticos, es indispensable utilizar una cantidad de puntos de observación mucho mayor que la disponible en Veracruz para describir el clima de manera precisa. Sin embargo, antes de implementar nuevas redes de información, debe asegurarse que los datos instrumentales permitan un adecuado manejo de la incertidumbre durante el proceso de medición.

REFERENCIAS

- Dufresne, J. L. y Joseph Fourier, J. B. (2006). *Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre*. Recuperado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00113200>
- IPCC. (2021). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/>
- Luna Díaz Peón, A. y Valdés Rodríguez, O. A. (2019). *Implicaciones de las Bases de Datos Climatológicas del Estado de Veracruz Sobre Investigaciones de Cambio Climático: Tres Estudios de Caso Quehacer Científico en Chiapas*, 14(2).
- Luna Díaz Peón, A. (2019). *Análisis de la red climatológica del estado de Veracruz y propuestas de estimación de precipitación para eventos por riesgos hidrometeorológicos*. El Colegio de Veracruz.
- Luna Díaz Peón, A., Valdés Rodríguez, O. A. y Villanueva Solís, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas*, (pp. 317).
- OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. Recuperado de https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf
- OMM. (2021). *Organización Meteorológica Mundial*. Observatorios Meteorológicos. Recuperado de <https://public.wmo.int/es>
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Tignor, M. M. B., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., y Rama, B. (2022). *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/>
- SMN. (2021). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Torres Alavez, J. A., Tejeda Martínez, A., Vázquez Aguirre, J. L., Brunet India, M., Ruiz Barradas, A. y Hernández Ávila, P. (2018). Índices de cambio climático y análisis de variabilidad en el estado de Veracruz, México. En J. P. Montávez Gómez, J. J. Gómez Navarro, J. M. López Romero, L. Palacios Peña, M. Turco, S. Jerez Rodríguez, R. Lorente, y P. Jiménez Guerrero (Eds.), *El Clima: Aire, Agua, Tierra y Fuego*, (p. 10).

- Vázquez, J., Brunet, M., y Phil, J. (2008). Cambios observados en los extremos climáticos de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz, México a partir de datos diarios. *Asociación Española de Climatología. Congreso, Tarragona, Catalunya*, 10. Recuperado de <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/8657>
- Vázquez, J. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*, 1ª Edición. Instituto Nacional de Ecología, (p. 88).

Areli Nájera González¹
Fátima Maciel Carrillo González²

^{1,2} Universidad de Guadalajara

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7773-2563>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9280-4476>

3

CAPÍTULO

**VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN
CON ENSO Y PDO EN UN FRAGMENTO DE LA
LLANURA COSTERA DE NAYARIT**

RESUMEN

Conocer la variabilidad climática local y su relación con los fenómenos globales de variación natural, es uno de los temas apremiantes en el contexto del cambio climático para prevenir impactos negativos sobre las comunidades humanas. Los fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) son los procesos de variación natural que más efectos tienen sobre la región del Pacífico mexicano. Entender los impactos de estas variaciones sobre la precipitación es fundamental para proponer medidas de adaptación, particularmente en zonas costeras donde los flujos de agua dulce mantienen el equilibrio de los ecosistemas que soportan la productividad agrícola y pesquera. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo analizar la variación de precipitación (decadal y estacional) y su relación con los índices ENSO y PDO en un fragmento de la llanura costera de Nayarit, la cual constituye un área importante de actividad agrícola, acuícola y pesquera del estado.

Palabras clave: adaptación, cambio climático, ENSO, PDO.

ABSTRACT

Understanding local climate variability and its relationship with global phenomena of natural variation is one of the most pressing issues in the context of climate change in order to prevent negative impacts on human communities. The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) are the natural variation processes that have the greatest effects on the Mexican Pacific region. Understanding the impacts of these variations on precipitation is fundamental to propose adaptation measures, particularly in coastal areas where freshwater flows maintain the balance of ecosystems that support agricultural and fisheries productivity. Therefore, this research aims to analyze the variation of precipitation (decadal and seasonal) and its relationship with the ENSO and PDO indices in a fragment of the coastal plain of Nayarit, which constitutes an important area of agricultural, aquaculture and fisheries activity in the state.

Keywords: adaptation, climate change, ENSO, PDO.

INTRODUCCIÓN

Para entender las implicaciones del cambio climático sobre una región, es necesario conocer primero las alteraciones de la temperatura y la precipitación a lo largo del tiempo

en dicha zona, y cómo se relacionan estas con las oscilaciones climáticas naturales del planeta (Lobato y Altamirano, 2017). Los fenómenos de variación natural se originan en la interacción del océano con la atmósfera y actúan sobre las variables climáticas a distintas escalas, ya sea en el transcurso de un año, una década o periodos más prolongados (Pavia *et al.*, 2006). A esta influencia de la variación climática sobre el clima local se le denomina *teleconexión* (Méndez *et al.*, 2007), es decir, el efecto de los fenómenos de variación natural se manifiesta a distancias lejanas de la zona donde se originan.

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es uno de los fenómenos más estudiados debido a su influencia sobre la precipitación en distintas regiones del mundo (Zebiak *et al.*, 2014). Como lo explican Méndez *et al.* (2007) y Carrillo *et al.* (2018), consiste en una oscilación de los patrones climáticos en la región 3.4 del Océano Pacífico Ecuatorial, específicamente de la temperatura superficial del mar y la presión atmosférica superficial. Se caracteriza por dos fases:

- 1) Positiva o de calentamiento, llamada *evento Niño*, cuando se registran anomalías de $+0.5$ °C.
- 2) Negativa o de enfriamiento, llamada *evento Niña*, cuando la anomalía es de -0.5 °C.

Dichas fases pueden prolongarse durante meses a periodos mayores a un año. El calentamiento o enfriamiento de esta zona del océano perturba la circulación normal de energía, causando cambios en la convección y, con ello, en los patrones de lluvia en las regiones tropicales del globo. Existen diferentes índices para medir el fenómeno ENSO; entre los más utilizados se encuentran el Índice Multivariado de El Niño (MEI) y El Niño Oceánico (ONI). El primero se calcula en periodos de dos meses por medio de cinco variables atmosféricas: temperatura del aire, nubosidad, viento zonal, viento meridional y presión a nivel del mar; y una variable oceánica (temperatura superficial del mar) (Wolter y Timlin, 1998); el segundo, de acuerdo a los criterios de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), se computa en periodos de tres meses en función de la temperatura superficial del mar de un sector del Océano Pacífico. Para México, se considera la región 3.4 (Carrillo *et al.*, 2018).

De acuerdo con los antecedentes en el país (Magaña *et al.*, 2003; Méndez *et al.*, 2007), la precipitación sostiene una estrecha relación con ENSO, y la influencia es más evidente a escala estacional. Generalmente, los eventos positivos Niño aumentan la precipitación cuando los regímenes pluviométricos son más bajos de enero a marzo, y la disminuyen durante los meses de verano entre junio a septiembre. Sin embargo, ENSO también se relaciona con un incremento de precipitación en los meses de otoño e invierno, par-

ticularmente durante noviembre, en las partes costeras del Pacífico. Al contrario, los eventos Niña se asocian a inviernos secos que pueden extenderse hasta el mes de mayo, provocando graves sequías y veranos con lluvias inusualmente abundantes. Otro fenómeno que influye es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Mantua *et al.*, 1997); se trata de una variación de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico que ocurre en periodos superiores a 10 años, es observable durante la estación de invierno y manifiesta una fase positiva y una negativa (Pavia *et al.*, 2006). La primera se relaciona con inviernos lluviosos y veranos secos; la segunda, con periodos invernales secos y veranos lluviosos (Méndez *et al.*, 2010). La literatura muestra que la influencia del PDO es mayor en la zona noroeste de México (Díaz *et al.*, 2007).

Distintas investigaciones sugieren que el cambio climático repercute a escala global sobre los fenómenos de variación natural (Méndez *et al.*, 2007; Lobato y Altamirano, 2017); por ejemplo, provocan más eventos extremos, apariciones acíclicas prolongadas de fases negativas y positivas de ENSO y menos periodos neutros (Wang *et al.*, 2019). Si bien aún no son claras las implicaciones del cambio climático sobre el PDO, la conjunción de sus fases positivas con eventos ENSO guarda una aparente relación con el incremento de la precipitación en la costa noroeste de México (Díaz *et al.*, 2008).

La precipitación juega un papel primordial en las zonas costeras. De ella depende la disponibilidad del agua dulce, la cual da paso a los procesos naturales que soportan las actividades económicas esenciales de producción agrícola y pesquera, así como el turismo (De la Lanza *et al.*, 2010). Por esa razón, los cambios en los patrones de lluvia y su relación con los fenómenos de variación natural son un tema de gran relevancia en el contexto del cambio climático (Magaña *et al.*, 2003; Pavia *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2010; Brito Castillo *et al.*, 2018); a partir de su estudio, se pueden anticipar impactos negativos a corto y largo plazo sobre las regiones costeras. En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo analizar la variación de precipitación decadal y estacional, así como su teleconexión con los índices ENSO y PDO en un fragmento de la Llanura Costera del Pacífico al oeste de México, en el estado de Nayarit. El estudio identifica cómo varía la precipitación a lo largo del tiempo y entre áreas de la región, y cuestiona si esta variación está relacionada con la influencia de fenómenos de oscilación natural ENSO y PDO.

La investigación se limita al tipo exploratorio y descriptivo; propone posibles explicaciones del comportamiento observado de la precipitación y allana el camino para continuar con el análisis en futuras investigaciones. Debido al reducido número de indagaciones al respecto, su relevancia recae en que se trata de un estudio pionero en el análisis de la precipitación de manera puntual en la zona de la llanura costera de Nayarit.

CONTEXTO DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Llanura Costera del Pacífico es una región fisiográfica al noroeste de México que se distribuye por las costas del Pacífico. De norte a sur, abarca los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. González *et al.* (2009) la describen como un paisaje geográfico llano, originado y determinado por dinámicas fluvio-marinas que dotan a la región de características únicas e importantes tanto para la conservación ambiental como para la producción agrícola, acuícola y la extracción pesquera del país. En el litoral de Nayarit, esta zona costera se caracteriza por paisajes de llanuras aluviales y humedales; y gran parte se encuentra declarada dentro de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales.

La presente investigación se centra en un fragmento al sur de la llanura costera de Nayarit (Figura 1). La superficie consiste en un área rural que comprende los municipios de San Blas y Santiago Ixcuintla. Nájera *et al.* (2020) mencionan que en la zona de San Blas predominan las coberturas de manglar y marismas de inundación derivadas del movimiento mareal, los patrones pluviales y la influencia fluvial de las escorrentías de la cuenca Huicicila y los afluentes del río Santiago (cuenca Lerma-Santiago). Los usos agrícolas prevalecen en el delta de este último y se extienden por el resto de la zona de Santiago Ixcuintla. Aunque es un área de poca extensión, donde prepondera el clima cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano, hay evidencia de que la temperatura y la precipitación difieren entre zonas, específicamente: San Blas que suele presentar temperaturas más frescas y mayor precipitación que Santiago Ixcuintla (De la Lanza, 2010; Nájera *et al.* 2021).

La relevancia de esta área para la investigación recae en múltiples aspectos (Nájera *et al.* 2021). En primer lugar, el sitio constituye un reservorio de conservación de numerosas especies de flora y fauna que soportan la producción pesquera de la zona. Por otro lado, sus coberturas de manglar lo convierten en un área catalogada como sumidero de carbono azul. Asimismo, es una zona de cultivo de especies frutales y forrajeras, y de producción acuícola de camarón, indispensable para la economía estatal y la subsistencia de las familias locales. Adicionalmente, en los últimos años la zona de San Blas ha adquirido relevancia por su aprovechamiento turístico.

Como se describió con anterioridad, el sustento de los sistemas que convergen en la llanura costera depende directamente del equilibrio entre el agua de mar y el agua dulce, por lo que el temporal de lluvias juega un papel primordial. Por esto, conocer la variabilidad de la precipitación y cómo está relacionada con otros fenómenos parecidos natural en el planeta, es un ejercicio fundamental para diseñar estrategias de adaptación que permitan replantear las actividades de la región de modo que se minimicen los impactos negativos sobre los sistemas socio ecológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos de precipitación mensual de las estaciones climatológicas disponibles para el área de estudio que cumplieran con el registro de al menos 30 años de datos y más del 85 % de la información (Méndez *et al.*, 2010). Las dos series que cumplieron los requisitos se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a través de la base de datos climatológicos Climate Computing Project (CLICOM) (Figura 1, estaciones 2 y 3). Ambas contaban con información de 1960 a 2009, la estación 2 (San Blas) presenta 4 % de datos faltantes y 14 % en la estación 3 (Santiago Ixcuintla). Los registros de estas estaciones posteriores a 2009, se descartaron debido al exceso de valores faltantes, por ejemplo, periodos sin datos de tres años consecutivos o más.

Con el fin de incluir datos de 2010 en adelante, se adjuntó la información de dos estaciones cercanas a ubicaciones del SMN antes mencionadas. En la zona de San Blas, se recopiló la serie de datos proporcionada por la Secretaría de Marina (SEMAR) (Figura 1, estación 1), con información de 2010 a 2017 (8 % de datos faltantes). Y en la zona de Santiago Ixcuintla, se rescató la serie de datos proporcionada por el Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap) (Figura 1, estación 4), con información de 2006 a 2016 (12 % de datos faltantes). Se emplearon datos hasta el año 2015 para articular los resultados con análisis previos sobre temperatura en la zona (Nájera *et al.*, 2020).

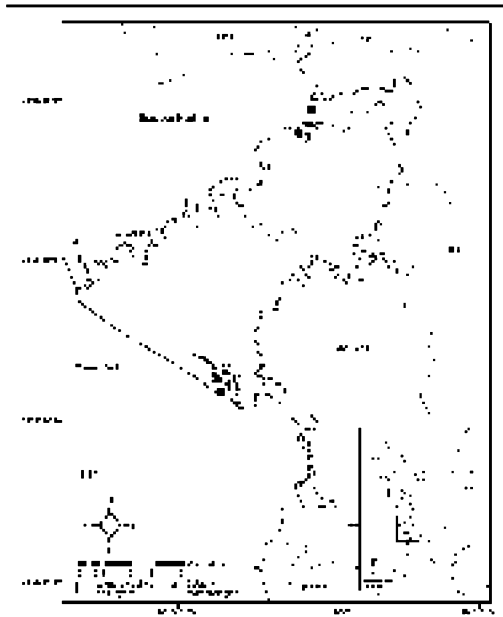


Figura 1. Área de estudio y localización de estaciones climatológicas utilizadas en el análisis. 1: Semar 2010-2015; 2 y 3: SMN 1960-2009; 4: Inifap 2010-2015. Fuente: INEGI (2000).

Los datos faltantes se completaron con las estimaciones globales que realizaron Harris *et al.* (2014); disponibles en la base de datos WorldClim 2.1 (Fick y Hijmans, 2017), contienen registros desde 1960 hasta 2018. Dicha información se respalda en el modelo de circulación general, el cual se sirve de 34 542 estaciones climatológicas pertenecientes a la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para estimar la precipitación mensual global a una resolución espacial de $\sim 21 \text{ km}^2$.

Para asegurar que los datos estimados de WorldClim 2.1 para el fragmento de la llanura costera de Nayarit fueran certeros, se comprobó su homogeneidad por medio del siguiente procedimiento: Primero, se extrajeron las estimaciones año-mes en las coordenadas de las estaciones climatológicas del SMN para 1960-2009, y de la SEMAR e Inifap para 2010-2015. Posteriormente, se cotejaron las series de datos estimados por WorldClim 2.1 contra los datos de la estaciones climatológicas; se compararon uno a uno los descriptores estadísticos —promedio, varianza, máximo, mínimo y cuartiles— con la prueba chi-cuadrado de homogeneidad (X^2), con un nivel de confianza de 95 %. Esta prueba establece las diferencias estadísticas entre dos valores; si los descriptores de la serie estimada y la serie de la estación resultan iguales estadísticamente, se asume que los datos estimados son cercanos a la realidad y, por lo tanto, son viables para completar la serie original de la estación climatológica. Así, se obtuvieron dos series con datos de 1960 a 2015 para el análisis; una para la zona de San Blas (con datos de SMN-SEMAR), y otra para la zona de Santiago Ixcuintla (con datos de SMN-Inifap).

Aunque su certeza es cuestionable, y está en función debido a las características del área de estudio, la base de datos WorldClim 2.1 es una de las más utilizadas a nivel mundial para análisis biogeográficos (Varela *et al.*, 2015; Fergnani, 2022). En este caso, el área de estudio es una zona llana, por lo que la extrapolación de datos se presume más fiable que en zonas de montaña (Sluiter, 2009). Se debe considerar que, aun cuando se realiza un procedimiento que asegura estadísticamente una concordancia entre datos estimados y reales, los resultados de la investigación pueden verse afectados.

En concordancia con lo descrito en Carrillo *et al.* (2018), para conocer la variabilidad de precipitación, se estudió la tendencia del promedio anual y la de los promedios mensuales agrupados en décadas. Para detectar la influencia de los índices ENSO y PDO sobre la variabilidad de precipitación, se siguió una versión simplificada del método utilizado en la investigación de Méndez *et al.* (2007) y Méndez *et al.* (2010) para el país. Este método consiste en calcular las anomalías mensuales estandarizadas de las series de datos de precipitación mediante la fórmula descrita en Pavia *et al.* (2006):

$$\alpha = [x - \mu(x)]/\sigma(x) \quad (1)$$

Donde x es la precipitación acumulada total del mes;

μx es el valor promedio del mes en el conjunto de datos; $\sigma(x)$ es la desviación estándar del mismo.

Consecutivamente, se calculó la correlación entre las anomalías mensuales estandarizadas y los índices ENSO (MEI y ONI) utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (r) a un nivel de confianza de $p \leq 0.05$. Para realizar las correlaciones, fue necesario acoplar las anomalías mensuales estandarizadas a los índices ENSO; Es decir, dado que el índice MEI se calcula en bimestres y el índice ONI en trimestres, las anomalías mensuales estandarizadas fueron promediadas a dos meses para realizar la correlación con el primero y a tres para la correlación con el segundo. Los valores de MEI se extrajeron de la base de datos MEI (*old*) de la NOAA, disponibles en su sitio en línea¹. Los valores de ONI se extrajeron de la base de datos del Centro de Predicción Climática (CPC) perteneciente a la NOAA, disponible en su sitio web². Por otra parte, para conocer la correlación con PDO, se realizó el mismo procedimiento anterior, pero utilizando las anomalías estandarizadas de cada mes; es decir, se establecieron correlaciones por décadas y por periodos mensuales con el fin de identificar la influencia de los índices en el transcurso anual, como sugieren Méndez *et al.* (2010). Los valores de PDO se obtuvieron del Instituto Cooperativo de Estudios sobre el Clima, los Océanos y los Ecosistemas (CICOES, por sus siglas en inglés); los registros pueden consultarse en la página de dicha organización³.

Por último, como adición al análisis correlacional, se utilizaron redes bayesianas para detectar relaciones entre la precipitación y la influencia de ENSO y PDO. Esta técnica se emplea para determinar qué probabilidad hay de A dado un evento previo B (Cano *et al.* 2004). No obstante, A no depende por completo de B; por tanto, no se detectan relaciones de causalidad sino únicamente tendencias en las variables, por lo que el método se acopla bien a la meteorología. Para responder a la pregunta: ¿Qué probabilidad hay de que la precipitación aumente o disminuya durante fases negativas y positivas de ENSO y PDO? Donde A corresponde a la anomalía mensual estandarizada de precipitación, y B a los índices ENSO y PDO, se construyó una matriz de probabilidad con los datos de A y B seccionados en cuartiles. La probabilidad condicional de A cuando B sucede es:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (1)$$

Donde:

$P(A|B)$: Probabilidad condicional de A cuando B sucede.

$P(A \cap B)$: Número de eventos A dado que B suceda dividido por el número total de eventos.

$P(B)$: Número de eventos B dividido por el número total de eventos.

1 <https://psl.noaa.gov/ENSO/MEI.old/>

2 http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ENSOstuff/ONI_v5.php

3 <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

De esta manera, cada probabilidad condicional fue representada en una celda de la matriz; si el valor de la probabilidad condicional es cercano a 1, se interpreta como correlación o dependencia alta, y ocurre lo contrario si el valor se acerca a 0.

Para saber si la condición del evento A depende por completo del evento B , se puso a prueba la dependencia estadística por medio de la siguiente fórmula en cada celda de la matriz:

$$P(A | B) = \text{Número de eventos } A / \text{Número de eventos } B \quad (2)$$

Debido a que en la teoría de probabilidad no existen valores negativos, los datos resultantes se consideraron en números positivos. Por último, se comprobaron los valores de dependencia estadística con una prueba chi-cuadrado (X_2), modelo de independencia (X_2 alfa 0.05, 1). Así, las condiciones en la matriz cuyos valores de dependencia estadística superan 3.8 se consideran *dependientes*; de lo contrario, se consideran *independientes*. El valor 3.8 se obtiene de X_2 de tablas considerando un grado de libertad. El procedimiento para realizar la prueba chi-cuadrado en una matriz se describe en Cerda y Villaruel (2007).

Para describir el comportamiento de las anomalías de precipitación, se utilizó como referencia el sistema de clasificación del índice normalizado de precipitación propuesto por la OMT (2012):

- -2: extremadamente seco
- de -1.5 a -1.9: muy seco
- de -1 a -1.4: moderadamente seco
- entre -0.9 y 0.9: normal
- valores de 1 y 1.4: moderadamente húmedo
- entre 1.5 y 1.9: muy húmedo
- mayores a 2: extremadamente húmedo

Cabe mencionar que la presente investigación se complementa con los aportes de Nájera *et al.* (2020) sobre temperatura en el área de estudio. Por tal razón, se decidió analizar el mismo periodo de datos a través de técnicas similares.

RESULTADOS

Los resultados se presentan de acuerdo con las series de datos analizadas: San Blas (SB) y Santiago Ixcuintla (SI). La precipitación acumulada anual promedio fue de 1414.5 mm

en la zona de SB y en 1325.3 mm en SI. Según el análisis decadal, la serie SB marcó una tendencia de disminución de precipitación desde 1990 que se pronunció durante el periodo 2010-2015 (Figura 2A); por el contrario, la serie SI presentó una tendencia de aumento tras un descenso en el año 2000 (Figura 2B). Una repetición del análisis con los datos de precipitación acumulada anual mostró que el decremento de precipitación de la serie SB comenzó en 2003 y continuó de modo sostenido por debajo del promedio a partir del 2009 (Figura 2C). En el caso de la serie SI, la tendencia a la alza se sostuvo a partir 2008 con precipitación superior al promedio (Figura 2D).

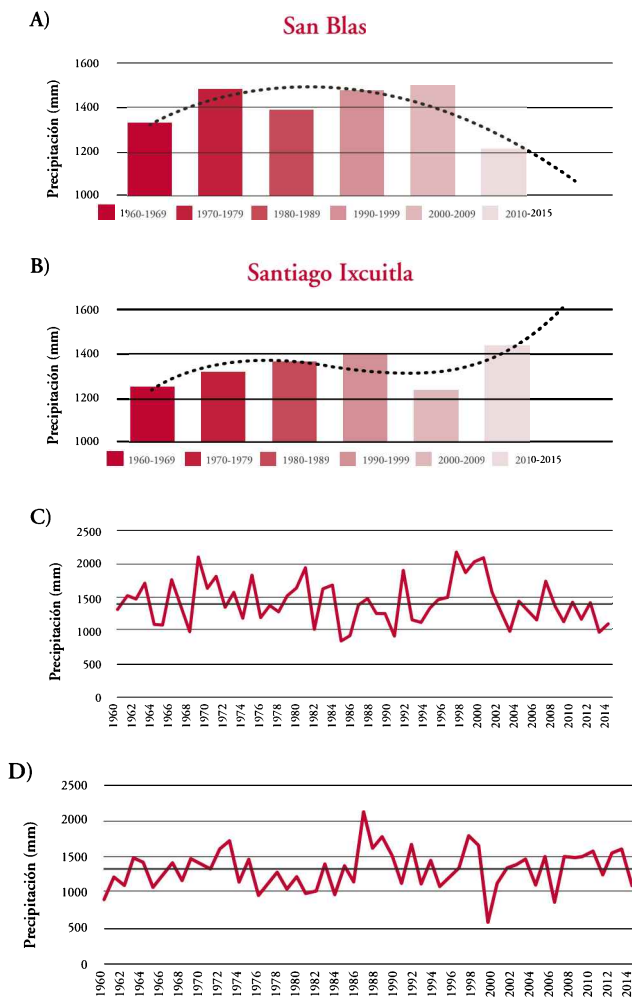


Figura 2. A y B: variación decadal de precipitación acumulada anual, serie San Blas (línea de tendencia polinómica $R^2 = 0.609$) y serie Santiago Ixcuintla (línea de tendencia polinómica $R^2 = 0.552$). C y D: variación de precipitación acumulada anual (la línea oscura muestra el valor promedio de la serie).

De acuerdo con la variación estacional, los meses de verano —julio, agosto y septiembre— fueron los de mayor precipitación en ambas series —promedio mensual entre 300 y 400 mm—, mientras marzo, abril y mayo fueron los más secos —promedio mensual menor a 10 mm—. Se observaron variaciones de los patrones de precipitación promedio mensual en el periodo 2000-2009 y acentuaciones en el plazo más reciente 2010-2015. El periodo 1990-1999 en la serie SB registró precipitaciones mayores que el promedio en agosto y octubre, al igual que en los meses de invierno, noviembre y diciembre en 2010-2015; el resto de los meses de verano mostraron valores por abajo del promedio (Figura 2E). Por su parte, en la serie SI se registraron valores de precipitación mayores al promedio en junio y septiembre a partir del periodo 1990-1999, igual que en los meses de invierno, noviembre, diciembre, febrero y marzo a partir del 2010-2015; mientras tanto, en el resto de los meses se registraron valores inferiores al promedio (Figura 2F).

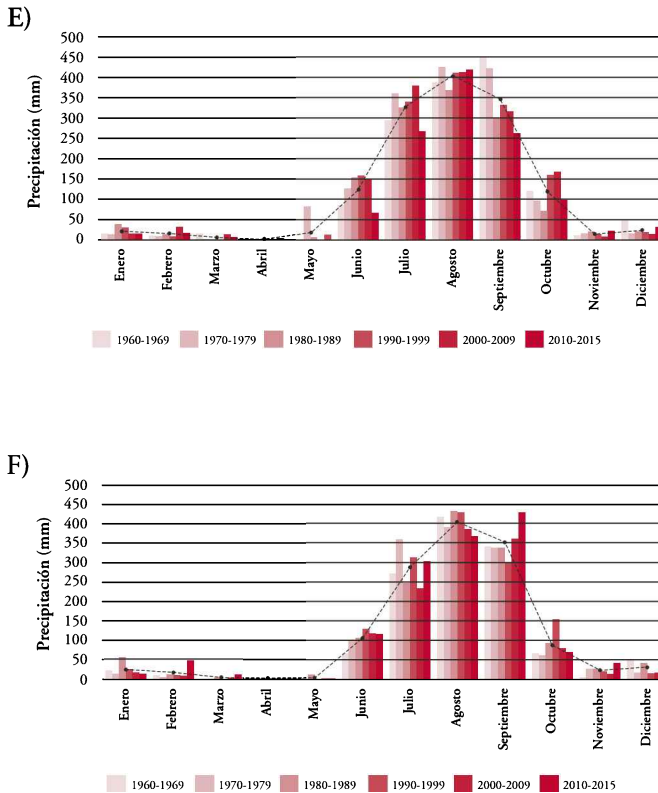


Figura 2 (continuación) E y F: variación estacional. Datos mensuales de precipitación compilados en décadas (la línea oscura muestra los valores promedio por mes de la serie).

Junto con estas afirmaciones, se debe considerar que los valores del periodo 2010-2015 provienen de estaciones climatológicas ajenas a los datos históricos de 1960 a 2009; además, resultan del promedio de 6 años y no de 10 años como los anteriores. Tal discordancia pone en juicio la tendencia de la precipitación. Sin embargo, los patrones de precipitación acumulada anual parecen indicar que la tendencia es acertada y responde a un comportamiento cíclico: un periodo de precipitación en aumento respecto al promedio, seguido de uno en descenso. Se especula que el ciclo corresponde a intervalos de ~10 años en SB, y ~8 años en SI, aunque es menos claro. El intervalo más reciente en SB abarca de 2003 a 2015 y expone valores por debajo del promedio; y de manera asincrónica, de 2008 a 2015 se aprecian valores por encima en SI.

La correlación de las series con ENSO y PDO se señala en la Tabla 1. Las anomalías de precipitación de la serie SB obtuvieron 12 % y 17 % ($p \leq 0.05$) de correlación con los índices MEI y ONI, respectivamente; con PDO, 4 %; sin embargo, carece de significatividad estadística. Las anomalías de precipitación de la serie SI obtuvieron 18 % y 23 % ($p \leq 0.05$) de correlación con el índice MEI y ONI, y 8 % con PDO ($p \leq 0.05$). En ambas series, el periodo 2000-2009 fue el de mayor correlación con ENSO; 21 % y 33 % con el índice MEI, y 25 % y 43 % con el ONI ($p \leq 0.05$). La serie SI obtuvo los valores más altos. Con respecto a PDO, el periodo 2010-2015 fue el de mayor correlación en ambas series; 11 % serie SB y 22 % serie SI. Sin embargo, no fueron estadísticamente significativas.

Tabla 1. Correlación de las series San Blas (SB) y Santiago Ixcuintla (SI) con ENSO (índices MEI y ONI) y PDO. Se señalan en oscuro las correlaciones que fueron estadísticamente significativas.

En el texto, los valores de correlación se expresan en porcentaje.

	MEI (MULTIVARIATE ENSO INDEX)				ONI (OCEANIC NIÑO INDEX)				PDO (PACIFIC DECADEAL OSCILLATION)			
	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>
1960-1969	0.10	0.263	0.06	0.478	0.12	0.191	0.12	0.197	0.08	0.384	-0.02	0.853
1970-1979	0.04	0.652	0.10	0.271	0.17	0.069	0.23	0.010	0.07	0.449	0.02	0.815
1980-1989	0.16	0.086	0.24	0.007	0.16	0.086	0.29	0.001	0.14	0.131	0.11	0.213
1990-1999	0.08	0.390	0.108	0.239	0.10	0.293	0.14	0.122	-0.004	0.964	-0.03	0.744

	MEI (MULTIVARIATE ENSO INDEX)				ONI (OCEANIC NIÑO INDEX)				PDO (PACIFIC DECADEAL OSCILLATION)			
	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>	SB	VALOR <i>p</i>	SI	VALOR <i>p</i>
2000-2009	0.21	0.019	0.33	0.000	0.25	0.006	0.43	0.000	-0.09	0.331	0.04	0.637
2010-2015	0.16	0.180	0.09	0.453	0.28	0.017	0.19	0.112	0.11	0.352	0.22	0.062
SERIE	0.12	0.002	0.18	0.000	0.17	0.000	0.23	0.000	0.04	0.268	0.08	0.035

Según los resultados de la variación estacional con ENSO (Figura 3 A, B, C y D), los meses de mayor correlación positiva en ambas series fueron ininterrumpidamente de octubre a febrero: entre 40 % y 50 % para MEI, y entre 50 % y 60 % para ONI. Los meses de mayor correlación inversa fueron los de verano: julio, agosto y septiembre en la serie SB, y junio, julio y agosto en la serie SI (entre -30 % y -40 %), es decir, las anomalías de precipitación en los meses de invierno de octubre a febrero están relacionadas entre ~40 % y ~60 % con fases ENSO. Cuando el valor de la anomalía de precipitación es alto, el valor de la anomalía ENSO también lo es, y viceversa. En consecuencia, el evento Niño durante esos meses se relaciona con un aumento de precipitación promedio, y el evento Niña con una disminución. En contraste, las anomalías de precipitación en los meses de verano, de junio a septiembre, presentan una correlación inversa; cuando el valor de la anomalía de precipitación es alto, el valor de la anomalía ENSO es bajo. Entonces, el evento Niño en esos meses se relaciona entre ~30 % y ~40 % con la disminución de precipitación promedio, y el evento Niña con un aumento.

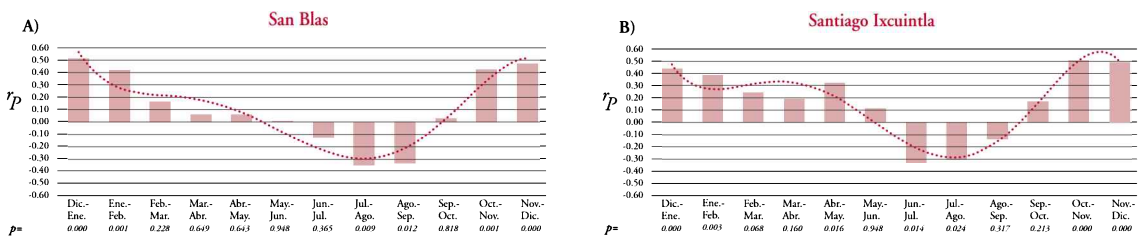


Figura 3. A y B: correlación de ENSO-índice MEI con las anomalías de precipitación de las series SB y SI.

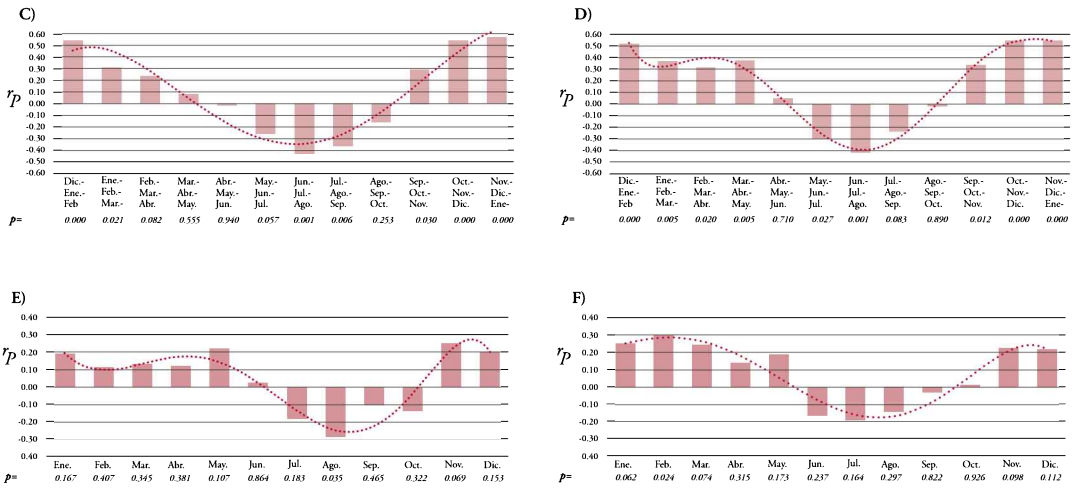


Figura 3 (continuación). C y D: correlación de ENSO-índice ONI con las anomalías de precipitación de las series SB y SI. E y F: correlación de PDO con las anomalías de precipitación de las series SB y SI. En cada gráfica, las barras representan el valor de la correlación y la línea punteada representa una tendencia para ejemplificar de forma visual el comportamiento de la correlación en los meses del año.

En el caso de la correlación estacional con PDO (Figura 3 E y F), en ambas series la correlación más alta se obtuvo en el mes de noviembre (entre 20 % y 30 %) pero no fue significativa. Individualmente, la serie SB únicamente obtuvo correlación estadística significativa en el mes de agosto (correlación inversa -28 %), y la serie SI en febrero (30 %); estas, además, fueron las correlaciones más altas en cada serie.

Asimismo, aunado al análisis de correlación, la Tabla 2 expone los resultados del análisis de redes bayesianas para cada serie en relación con los índices MEI, ONI y PDO. La relación se da en función de las anomalías mensuales estandarizadas de precipitación. Se hace hincapié en los resultados de los cuartiles extremos, señalados en oscuro, en la matriz de probabilidad, debido a que se tratan de las fases positivas y negativas de los índices MEI, ONI y PDO. Los casos en los que existió dependencia estadística se sombreadon en la matriz del modelo de independencia.

En la serie SB se obtuvo que, durante un evento Niña, hay entre 34 % y 38 % de probabilidad de disminución de precipitación a *moderado* y *severamente seco*, y entre 17 % y 22 % de aumento de precipitación de *moderado* a *extremadamente húmedo*. Por otra parte, cuando hay evento Niño, existe de 27 a 35 % de probabilidad de aumento de precipitación de *moderado* a *extremadamente húmedo* y alrededor de 22 % de probabilidad de disminución a *moderadamente seco*. Para la serie SI, cuando hay evento Niña, se obtuvo alrededor de 38 % de probabilidad de disminución de precipitación a *moderadamente seco* y 17 % de probabilidad de aumento a *moderadamente húmedo*. Y, cuando

hay evento Niño, se calculó de 30 a 38 % de probabilidad de aumento de precipitación hasta *extremadamente húmedo* y alrededor de 24 % de probabilidad de disminución a *moderadamente seco*. En ambas series, las condiciones de probabilidad de anomalías de precipitación dado que ENSO sucede fueron estadísticamente dependientes. Sin embargo, también se encontraron probabilidades similares dependientes en otras condiciones asociadas a fases neutras.

Una condición estadísticamente dependiente entre dos variables, significa que el comportamiento de una influye directamente en la otra, aun cuando esta influencia no sea exclusiva. Por el contrario, si la condición no es estadísticamente dependiente, significa que existen otros factores que actúan con mayor fuerza. En este caso, ENSO tiene una influencia directa sobre la precipitación, pero no es un factor determinante, y se deben considerar alternativas que podrían ser más prominentes sobre la variación de precipitación.

Estos resultados reflejan la relación de ENSO con las anomalías mensuales estandarizadas de precipitación, pero no la puntualizan en las estaciones y meses del año. Por tanto, la probabilidad obtenida del ejercicio de redes bayesianas debe ser interpretada según los valores de correlación estacional con ENSO. Por ejemplo, del análisis de correlación estacional en SB, se ve que existe entre 30 % y 40 % de relación inversa con ENSO en los meses de verano; en otras palabras, cuando hay evento Niño, se espera una disminución de la precipitación promedio, y viceversa en el caso de Niña. Con el ejercicio de redes bayesianas se puede identificar con mayor detalle la relación y complementar la aseveración anterior. Así, se sabe que hay 22 % de probabilidad de disminución de precipitación en los meses de verano en evento Niño (en condición estadísticamente dependiente), y de 17 % a 22 % de probabilidad de aumento de precipitación en evento Niña (en condición no estadísticamente dependiente).

Aunque ambas series presentaron probabilidades similares en las condicionantes, una de las principales diferencias fue el valor de la anomalía de precipitación. Las anomalías se evidenciaron más en la serie SI que en SB; en la serie SB, se dieron de -1.8 a 4 en la adecuación a MEI y de -1.5 a 2.6 en la adecuación a ONI; en la serie SI, fueron de -1.8 a 5.7 y de -1.9 a 3.8, respectivamente. Adicionalmente, la serie SI presentó más condiciones estadísticamente dependientes con los índices ENSO que la serie SB. Por lo tanto, se corrobora el resultado del análisis de correlaciones y se demuestra que las anomalías de precipitación de la serie SI presentan mayor teleconexión con ENSO en comparación con la serie SB.

En el caso de PDO, resultó que en ambas series existe alrededor de 26 % de probabilidad de disminución de precipitación a *moderado* y *severamente seco* cuando hay PDO de fase negativa (anomalía PDO < -1.2), y de 23 a 25 % de probabilidad de aumento de

precipitación hasta *extremadamente húmedo* cuando hay fase positiva (anomalía PDO > 0.5). La serie SB registró 21 % de probabilidad de disminución de precipitación en fase positiva. Con excepción de la última afirmación, estas condiciones no fueron estadísticamente dependientes. Las anomalías mensuales estandarizadas de precipitación de ambas series fueron similares (valores de -0.5 a 7.2). La serie SB presentó más condiciones estadísticamente dependientes con PDO que la serie SI.

Tabla 2. Resultados del análisis mediante redes bayesianas (probabilidad condicional y prueba de dependencia estadística) de las series SB y SI. Evento a predecir (*A*): anomalía de precipitación; evento que sucede (*B*): ENSO (índices MEI y ONI) y PDO. Q₁, Q₂, Q₃ y Q₄ simbolizan los cuartiles en los que fueron seccionados los datos de *A* y *B* para construir la matriz. Por ejemplo, $X \leq Q_1$ incluye los datos menores al valor del Q₁, y $Q_1 > X \leq Q_2$ incluye los datos superiores al valor del Q₁ pero inferiores al valor del Q₂, así sucesivamente. Los valores de los cuartiles de los extremos en el evento *B* representan eventos Niña y Niño en ENSO, y fases positivas y negativas en PDO. Se señalan en oscuro en la prueba de dependencia los condicionantes donde los eventos *A* y *B* son estadísticamente dependientes.

SAN BLAS					
Anomalías de precipitación - Índice MEI					
Matriz de probabilidad condicional					
Q ₁ : A = -0.4, B = -0.5; Q ₂ : A = -0.2, B = 0.1					
Q ₃ : A = 0.3, B = 0.8; Q ₄ : A = 4.0, B = 3.1					
		$x \leq Q_1$	$Q_1 > x \leq Q_2$	$Q_2 > x \leq Q_3$	$x > Q_3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q_1$	A	0.38	0.23	0.26	0.22
$Q_1 > x \leq Q_2$	A	0.17	0.25	0.26	0.26
$Q_2 > x \leq Q_3$	A	0.25	0.30	0.26	0.25
$x > Q_3$	A	0.20	0.21	0.23	0.27
	Suma	1.00	1.00	1.00	1.00
Prueba chi-cuadrado (X_2) modelo de independencia (X_2 alfa 0.05, 1)					
		$x \leq Q_1$	$Q_1 > x \leq Q_2$	$Q_2 > x \leq Q_3$	$x > Q_3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q_1$	A	9.6	4.7	2.4	6.2
$Q_1 > x \leq Q_2$	A	5.6	2.3	2.7	3.0
$Q_2 > x \leq Q_3$	A	1.5	3.7	0.8	1.2
$x > Q_3$	A	2.5	1.3	0.5	4.4

SAN BLAS					
Anomalías de precipitación - Índice ONI					
Matriz de probabilidad condicional					
Q1: A = -0.4, B = -0.5; Q2: A = -0.2, B = -0.1					
Q3: A = 0.2, B = 0.5; Q4: A = 2.6, B = 2.6					
		$x \leq Q1$	$Q1 > x \leq Q2$	$Q2 > x \leq Q3$	$x > Q3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q1$	A	0.34	0.31	0.24	0.23
$Q1 > x \leq Q2$	A	0.16	0.21	0.28	0.23
$Q2 > x \leq Q3$	A	0.29	0.33	0.22	0.19
$x > Q3$	A	0.21	0.16	0.25	0.35
	Suma				
Prueba chi-cuadrado (X^2) modelo de independencia (X^2 alfa 0.05, 1)					
		$x \leq Q1$	$Q1 > x \leq Q2$	$Q2 > x \leq Q3$	$x > Q3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q1$	A	6.3	2.6	4.1	5.2
$Q1 > x \leq Q2$	A	6.3	1.1	6.6	1.2
$Q2 > x \leq Q3$	A	3.0	6.9	3.5	6.4
$x > Q3$	A	3.0	8.5	1.1	10.3
Anomalías de precipitación - Índice PDO					
Matriz de probabilidad condicional					
Q1: A = -0.5, B = -1.2; Q2: A = -0.3, B = -0.3					
Q3: A = 0.2, B = 0.5; Q4: A = 7.3, B = 2.6					
		$x \leq Q1$	$Q1 > x \leq Q2$	$Q2 > x \leq Q3$	$x > Q3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q1$	A	0.26	0.27	0.26	0.21
$Q1 > x \leq Q2$	A	0.24	0.28	0.24	0.30
$Q2 > x \leq Q3$	A	0.29	0.26	0.21	0.27
$x > Q3$	A	0.22	0.19	0.28	0.23
	Suma	1.00	1.00	1.00	1.00

SAN BLAS					
Prueba chi-cuadrado (X^2) modelo de independencia (X^2 alfa 0.05, 1)					
		$x \leq Q_1$	$Q_1 > x \leq Q_2$	$Q_2 > x \leq Q_3$	$x > Q_3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q_1$	A	0.9	2.3	1.3	4.3
$Q_1 > x \leq Q_2$	A	2.6	1.9	1.9	3.7
$Q_2 > x \leq Q_3$	A	2.8	0.1	4.9	0.9
$x > Q_3$	A	1.1	4.1	5.4	0.3

SANTIAGO IXCUINTLA					
Anomalías de precipitación - Índice MEI					
Matriz de probabilidad condicional					
Q_1 : A = -0.4, B = -0.5; Q_2 : A = -0.2, B = 0.1					
Q_3 : A = 0.3, B = 0.8; Q_4 : A = 5.7, B = 3.1					
		$x \leq Q_1$	$Q_1 > x \leq Q_2$	$Q_2 > x \leq Q_3$	$x > Q_3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q_1$	A	0.37	0.25	0.24	0.24
$Q_1 > x \leq Q_2$	A	0.20	0.30	0.22	0.20
$Q_2 > x \leq Q_3$	A	0.21	0.32	0.30	0.26
$x > Q_3$	A	0.22	0.13	0.24	0.30
	Suma	1.00	1.00	1.00	1.00
Prueba chi-cuadrado (X^2) modelo de independencia (X^2 alfa 0.05, 1)					
		$x \leq Q_1$	$Q_1 > x \leq Q_2$	$Q_2 > x \leq Q_3$	$x > Q_3$
	Evento	B	B	B	B
$x \leq Q_1$	A	9.3	3.5	4.5	4.3
$Q_1 > x \leq Q_2$	A	2.8	7.3	0.7	3.2
$Q_2 > x \leq Q_3$	A	5.8	5.1	3.2	0.7
$x > Q_3$	A	0.6	9.0	2.1	8.2

SANTIAGO IXCUINTLA					
Anomalías de precipitación - Índice ONI					
Matriz de probabilidad condicional					
Q ₁ : A = -0.3, B = -0.5; Q ₂ : A = -0.2, B = -0.1					
Q ₃ : A = 0.3, B = 0.5; Q ₄ : A = 3.8, B = 2.6					
		x ≤ Q ₁	Q ₁ > x ≤ Q ₂	Q ₂ > x ≤ Q ₃	x > Q ₃
	Evento	B	B	B	B
x ≤ Q ₁	A	0.38	0.15	0.21	0.27
Q ₁ > x ≤ Q ₂	A	0.20	0.32	0.24	0.18
Q ₂ > x ≤ Q ₃	A	0.25	0.36	0.29	0.18
x > Q ₃	A	0.17	0.16	0.27	0.38
	Suma	1.00	1.00	1.00	1.00
Prueba chi-cuadrado (X ²) modelo de independencia (X ² alfa 0.05, 1)					
		x ≤ Q ₁	Q ₁ > x ≤ Q ₂	Q ₂ > x ≤ Q ₃	x > Q ₃
	Evento	B	B	B	B
x ≤ Q ₁	A	9.6	13.3	7.2	1.2
Q ₁ > x ≤ Q ₂	A	2.0	10.6	1.9	4.3
Q ₂ > x ≤ Q ₃	A	0.5	10.7	3.0	8.2
x > Q ₃	A	7.1	8.0	2.3	13.6
Anomalías de precipitación - Índice PDO					
Matriz de probabilidad condicional					
Q ₁ : A = -0.5, B = -1.2; Q ₂ : A = -0.3, B = -0.3					
Q ₃ : A = 0.3, B = 0.5; Q ₄ : A = 7.2, B = 2.6					
		x ≤ Q ₁	Q ₁ > x ≤ Q ₂	Q ₂ > x ≤ Q ₃	x > Q ₃
	Evento	B	B	B	B
x ≤ Q ₁	A	0.26	0.27	0.25	0.22
Q ₁ > x ≤ Q ₂	A	0.23	0.31	0.28	0.26
Q ₂ > x ≤ Q ₃	A	0.29	0.21	0.25	0.27
x > Q ₃	A	0.23	0.21	0.23	0.25
	Suma	1.00	1.00	1.00	1.00
Prueba chi-cuadrado (X ²) modelo de independencia (X ² alfa 0.05, 1)					
		x ≤ Q ₁	Q ₁ > x ≤ Q ₂	Q ₂ > x ≤ Q ₃	x > Q ₃
	Evento	B	B	B	B
x ≤ Q ₁	A	1.0	2.5	0.4	2.9
Q ₁ > x ≤ Q ₂	A	3.6	4.3	1.3	0.2
Q ₂ > x ≤ Q ₃	A	2.9	4.5	0.8	0.7
x > Q ₃	A	0.3	2.3	0.1	2.4

DISCUSIÓN

HALLAZGOS GENERALES

Los resultados para el fragmento de la Llanura Costera de Nayarit son similares a los antecedentes hallados en otras investigaciones de la Llanura Costera del Pacífico. El análisis de variación decadal emitió resultados inconclusos; la serie SB mostró tendencia de disminución de precipitación y, la serie SI, de aumento. La variación estacional es similar a los registros de García y Cruz (2009) para la región: precipitaciones durante los meses de junio a septiembre por lluvias de convección en verano y la formación de tormentas tropicales en el Pacífico (Díaz *et al.*, 2008; Brito Castillo *et al.*, 2010; Brito Castillo, 2012; Brito Castillo *et al.*, 2018). Sin embargo, también se observaron diferencias entre las dos series analizadas.

La teleconexión con ENSO coincide con los aportes de Magaña *et al.* (2003), Caso *et al.* (2007), Méndez *et al.* (2007), Palacios Hernández *et al.* (2012) y Palacios Hernández *et al.* (2017); la influencia es perceptible a escala estacional; los meses de invierno (noviembre a febrero) presentan las correlaciones más altas ($> 40\%$ [$p \leq 0.05$]; las referencias estiman entre 25 y 30 %); marzo y abril, las correlaciones más bajas ($> 10\%$, $p \leq 0.05$); y los meses de verano, julio a septiembre, correlaciones inversas (entre -30% y -40% , $p \leq 0.05$). Aunque se observaron diferencias entre las series SB y SI, en términos generales, los eventos Niño están asociados a veranos secos e inviernos lluviosos y, los eventos Niña, a veranos lluviosos e inviernos secos. Méndez *et al.* (2007) explican que las correlaciones inversas durante los meses de verano son un comportamiento aislado y particular de ciertas zonas en el centro, sur y noroeste del país.

Asimismo, los resultados de la teleconexión con PDO son afines a lo revelado por Méndez *et al.* (2010): persistencia de PDO desde hace más de 20 años en la zona norte del país. Los meses de mayor correlación son noviembre, diciembre y mayo (entre 20 y 30 %, $p \leq 0.05$); los de menor correlación, junio y octubre para SB y SI, respectivamente ($> 5\%$, $p \leq 0.05$). Más aún, se encontró una correlación inversa en los meses de julio a septiembre (entre -20% y -30% , significativa únicamente en la serie SB), asociada de manera general a veranos secos e inviernos lluviosos durante fases positivas, y viceversa durante fases negativas. Cabe señalar que no se identificó una similitud clara entre ambas series de datos analizados. Se recomienda ampliar la zona geográfica y la serie de datos analizada para entender las posibles explicaciones de este suceso.

DIFERENCIAS ENTRE LA SERIES SB Y SI

El clima es un sistema dinámico y multifactorial, por ese motivo, puede existir más de una hipótesis para esclarecer un mismo fenómeno (Magaña *et al.*, 2003). Por lo tanto,

en un análisis exploratorio y descriptivo, el de la presente investigación, solo es viable argüir sobre las posibles causas del comportamiento observado. A continuación, se puntualizan las diferencias entre las series SB y SI respecto a la precipitación anual promedio y la distribución estacional, y se plantean razonamientos para dar sentido a esas características.

Si se considera el año 2003 como punto de partida, la serie SB marcó una tendencia a disminuir la precipitación anual por debajo de su promedio, mientras que la serie SI mostró tendencia a aumentar a partir de 2008. También se presentaron cambios en la distribución estacional; históricamente, la precipitación en ambas series se concentró en los meses de julio, agosto y septiembre (agosto fue el lapso más lluvioso, con precipitación superior a los 400 mm), y en menor proporción (lluvias por debajo de los 50 mm) durante los meses invernales noviembre-febrero; de marzo a mayo se presentaron como los meses más secos. A partir del año 2010, en ambas series aumentó la cantidad de precipitación promedio de los meses invernales y se redujo la cantidad de precipitación en verano, con diferencias puntuales: en SB, la precipitación promedio aumentó en agosto y octubre; para SI, en junio y septiembre.

La influencia de ENSO es una explicación tentativa de tales desarrollos. De acuerdo con los resultados de correlación y redes bayesianas, la serie SI presenta mayor conexión y condiciones estadísticamente dependientes con ENSO que la serie SB. Sin embargo, en el periodo 2010-2015, la influencia de ENSO fue mayor en la serie SB (correlación 16 % MEI y 28 % ONI, $p \leq 0.05$) que en la SI (9 % MEI y 18 % ONI, $p \leq 0.05$). Durante ese periodo, los eventos Niño y Niña que se suscitaron fueron sostenidos: de 2010 a 2012 se tuvieron 20 meses consecutivos de evento Niña (valores de anomalía MEI y ONI de -0.6 a -1.9), seguidos de una fase neutra prolongada de alrededor de 24 meses. Para 2014-2015, se tuvieron más de 12 meses de evento Niño intenso (valores de anomalía MEI y ONI de 0.7 a 2.6). Cabe resaltar que la influencia de ENSO es mayor los meses de invierno y verano, lo que pudo haber ocasionado veranos lluviosos en los años 2010 y 2011 e inviernos secos de 2010 a 2012 durante el evento sostenido Niña, y un invierno lluvioso en 2014 seguido de un verano seco en 2015, durante el evento sostenido Niño.

Las condiciones mencionadas podrían haberse vinculado con la influencia de PDO. Durante el mismo periodo, la serie SI obtuvo 22 % de correlación con PDO; la serie SB, 11 %. Ninguna correlación fue significativa, pero el resultado del análisis de redes bayesianas mostró que la serie SB presentó más condiciones estadísticamente dependientes que SI. De acuerdo con la correlación estacional, la influencia en SI fue positiva durante febrero (20 %, $p \leq 0.05$), mientras que, en SB, la correlación fue inversa durante agosto (-30 %, $p \leq 0.05$). En las mismas fechas, PDO mostró prevalencia de fase negativa prolongada desde verano de 2010 (valores de anomalía PDO de -0.7 a -2.4) y perduró hasta principios de 2014. Luego vino una fase positiva del invierno de 2014 hasta finales de

2015 (valores de anomalía PDO de 0.8 a 1.9). Dado que la fase positiva favorece las lluvias invernales y la negativa sequías invernales, la influencia de PDO pudo haber intensificado los efectos de ENSO. Las consecuencias fueron tres veranos lluviosos contra tres sequías invernales, con mayor influencia sobre la zona de la serie SB. Al respecto, algunos estudios han encontrado que la combinación ENSO-PDO produce anomalías mayores en la precipitación, particularmente en la zona noroeste del país (Pavia *et al.* 2006).

La presencia de PDO en conjunto con ENSO también explicaría las variaciones en la precipitación estacional. El aumento de lluvias de los meses de agosto y octubre en SB, y junio y septiembre en SI, coincide con los meses de mayor correlación inversa con PDO. Por los resultados del análisis de correlación, esta combinación también sería responsable de las anomalías de aumento de precipitación en agosto (posiblemente por lluvias torrenciales) y febrero (lluvias invernales atípicas). En general, se produce una disminución de precipitación promedio mensual en verano y un aumento en los meses de invierno, aunque quizá más días de lluvia durante el mes de agosto.

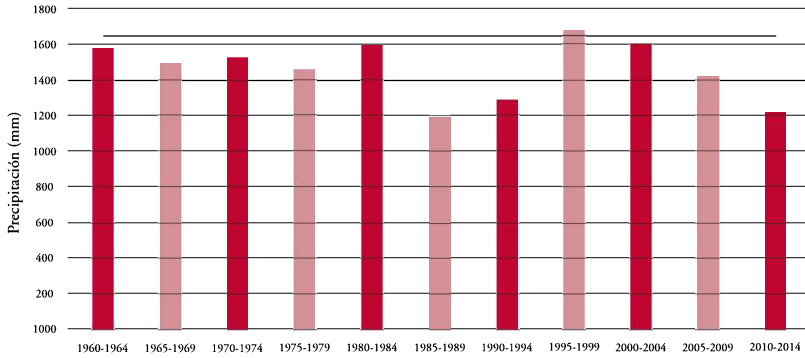
Como han mencionado otras investigaciones, el incremento o decremento de meses de precipitación, o el aumento promedio de precipitación en un mes particular, no están relacionados necesariamente con la sumatoria anual de precipitación (Méndez *et al.*, 2007). Por lo tanto, para determinar un comportamiento más preciso y aceptar o refutar la idea anterior, se recomienda analizar los datos diarios del periodo 2010-2015 de la base de datos de la SEMAR. Cabe mencionar que, el análisis de la precipitación acumulada anual ofreció indicios para especular acerca de un comportamiento cíclico, es decir, periodos de aumento con respecto al promedio de precipitación seguidos de periodos de decremento, regidos por intervalos de 8 a 10 años, asincrónicos entre las series y con mayor claridad del comportamiento en SB que en SI. Aunque no fue el objetivo inicial de la investigación, para precisar lo anterior, se realizó un breve análisis de los datos en periodos de 5 años (1960-2014) (Figura 4).

La serie SB inicia en un periodo con valores de precipitación superiores al promedio (1960-1964), seguido de tres periodos con tendencia a decremento (1965-1979). Posteriormente, de 1980 a 1984, hubo un pico de aumento donde la precipitación alcanzó valores similares a los de 1960-1964, y después se mostró un decremento durante dos periodos (1985-1994). El comportamiento se repitió en el periodo 1995-1999, con un pico de aumento de precipitación y los siguientes tres periodos en tendencia al decremento (Figura 4 A).

De manera asincrónica, la serie SI inició con valores de precipitación inferiores al promedio que perduraron durante los dos periodos comprendidos entre 1960 y 1969. Después, en el periodo 1970-1974, hubo un pico de aumento seguido de un decremento durante dos periodos. El comportamiento fue similar en 1985-1989, donde se registró el pico de aumento más alto con respecto al promedio histórico; los siguientes tres periodos

mostraron tendencia en decremento, pero sostuvieron valores superiores al promedio. De 2000 a 2004, los valores fueron similares a los periodos anteriores en decremento. En el 2005-2009, se volvió a observar un aumento y la tendencia se mantuvo en el periodo 2010-2015 (Figura 4 B).

A)



B)

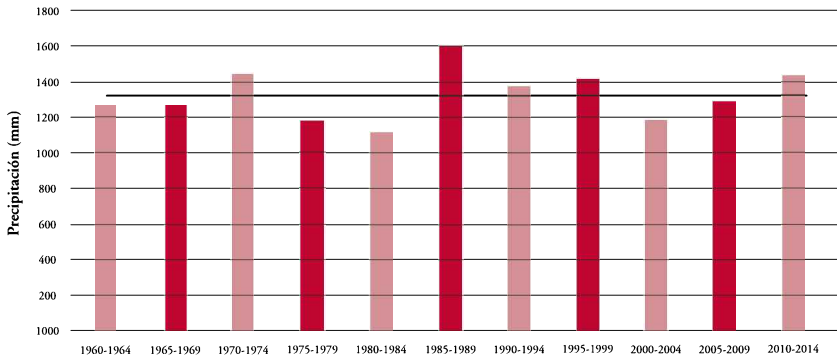


Figura 4. A y B: variación de precipitación acumulada anual promedio compilada en periodos de 5 años (1960-2014) de las series SB y SI (la línea en oscuro muestra el valor promedio de la serie).

El comportamiento cíclico también se manifiesta en la distribución estacional durante los meses veraniegos e invernales, excepto en el mes de septiembre, que presenta una tendencia sostenida en decremento desde 1980 en la serie SB (Figura 4 C). A su vez, el mes de junio presenta tendencia en aumento desde 1985 en la serie SI (Figura 4D). Dicho comportamiento cíclico podría deberse a la influencia de ENSO y PDO en la zona, reforzando la idea de que la combinación de ambos fenómenos es determinante, la cual es

similar a la explicación dada para el periodo 2010-2015. Los periodos de aumento de precipitación en la serie SB (1980-1984 y 1995-1999) coinciden con dos eventos Niño extremo suscitados en 1982 y 1998 (Wang *et al.*, 2019), pero no concuerdan en la serie si. Para comprobar la hipótesis de un comportamiento cíclico, se recomienda analizar los datos de precipitación anual promedio y estacional a detalle y repetir el procedimiento de esta investigación, para conocer la influencia de los fenómenos ENSO y PDO sobre dicho comportamiento a escala interanual o en periodos de 3 y 5 años. De esa forma, sería posible explicar mejor las diferencias en el comportamiento de las series SB y si.

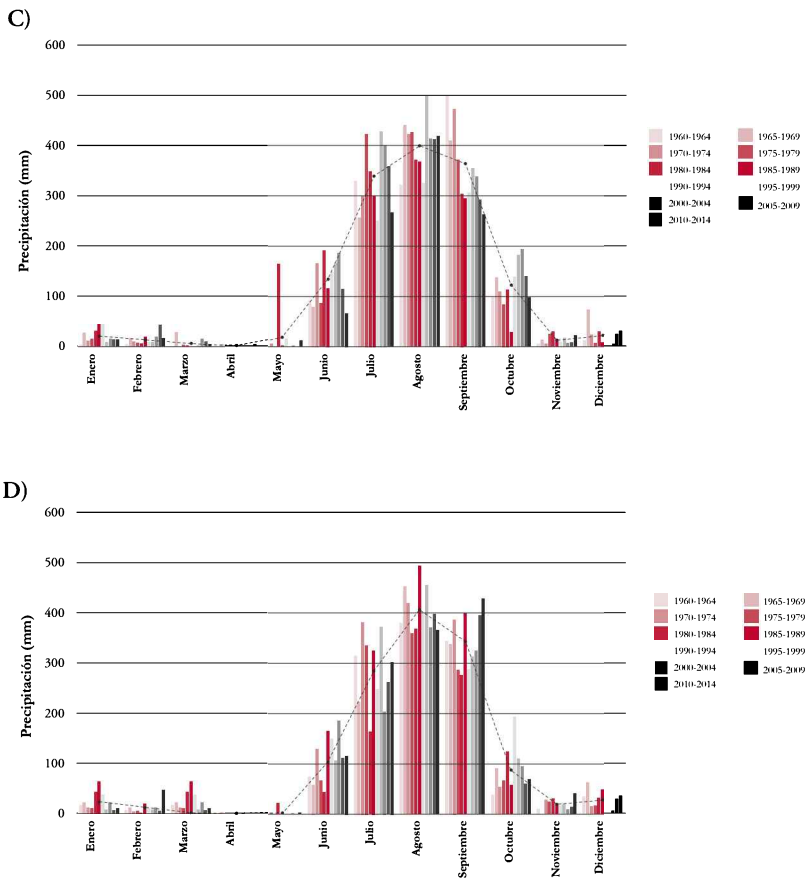


Figura 4. C y D: variación estacional mensual de precipitación en periodos de 5 años (la línea en oscuro muestra los valores promedio por mes de la serie).

Una segunda hipótesis atribuye la ausencia de un comportamiento cíclico claro, para la serie si, a su ubicación. Al posicionarse al pie de la zona serrana, la serie si puede estar más relacionada con otros fenómenos de variación natural, como el sistema del Monzón de

Norteamérica, responsable de modular la variabilidad de las lluvias en los meses de verano. Esta actividad convectiva tiene mayor influencia en las zonas cercanas a la Sierra Madre Occidental y disminuye en la zona costera (García y Cruz, 2009), favoreciendo el incremento de precipitación sobre la serie SI. Algunos autores señalan que la influencia del monzón, en conjunto con eventos Niño y Niña, puede provocar anomalías de disminución de precipitación en verano (Magaña *et al.*, 2003); esto explicaría también el comportamiento de la serie SB.

Por otro lado, por su cercanía a la cuenca del río San Pedro-Mezquital, las condiciones topográficas de terreno podrían influir en la precipitación de la serie SI. Se ha encontrado una estrecha relación antagónica entre las condiciones del Altiplano Mexicano y la costa occidental del Pacífico mexicano: cuando hay sequía en una, hay lluvias abundantes en la otra (Brito Castillo *et al.*, 2010; Vega Camarena *et al.*, 2018). Ambas regiones están conectadas por la geomorfología de la cuenca del río San Pedro-Mezquital y, aunque su relación es variable y diversa en amplitud territorial, su monitoreo es fundamental para entender los eventos de sequía en dichas zonas rurales, donde una de las principales actividades económicas es la agricultura de temporal (Brito Castillo *et al.*, 2018).

En consecuencia, la influencia de ENSO en la región continental (serie SI) puede estar asociada a una unión de dicha oscilación con otros fenómenos de variación natural regional, como el Monzón de Norteamérica sobre el Altiplano Mexicano, mientras que, en la zona costera, el comportamiento puede estar asociado a la circulación de los vientos, la humedad y el campo de nubosidad, derivados de las condiciones atmosféricas del Océano Pacífico. Para comprobar esta hipótesis, se recomienda analizar la correlación entre ENSO y otras variables que intervienen en la precipitación, como la temperatura, la presión atmosférica, el viento y la humedad, particularmente en las zonas de SB y SI (Palacios Hernández *et al.*, 2017).

Una tercera explicación tentativa prioriza el papel que juega la cobertura vegetal sobre el clima local (Carvajal y Pabón, 2016). La flora alrededor de la zona de la serie SI es una de las más transformadas por la agricultura. En cambio, las zonas cercanas a SB conservan gran parte de la vegetación original (selva mediana, manglares y lagunas costeras). El análisis del conjunto de datos mostró que la amplitud de la anomalía de precipitación es mayor en SI que en SB (-1.8 a 4 contra -1.9 a 5.7). Este comportamiento puede tener relación con los resultados del experimento de Pabón *et al.* (2013), los cuales establecen que, cuando se realizan pocas modificaciones en la vegetación natural, los cambios en precipitación son menores. Por el contrario, modificaciones mayores en la cobertura vegetal, como la conversión de pastizales y bosques a tierras de cultivos arables, pueden provocar extremos en los valores de precipitación. Otras investigaciones se suman a esta idea al afirmar que la formación de parches en el suelo de uso agrícola o urbano (cuyas propiedades radioactivas y térmicas difieren de las de la vegetación natural) en grandes

extensiones pueden tener la suficiente fuerza para influir en circulaciones de mesoescala, provocando a largo plazo, variaciones en temperatura y precipitación del clima regional (Kouame *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Eiras Barca *et al.*, 2020). Para comprobar esta hipótesis, sería necesario realizar un ejercicio de correlación entre procesos de cambio de uso de suelo en la zona costera con anomalías de precipitación, incluyendo también las zonas asociadas, como el Altiplano Mexicano.

LIMITANTES Y REFLEXIONES A CONSIDERAR

Las tres afirmaciones anteriores se reducen a especulaciones y ejemplifican el proceso de reflexión necesario para entender el comportamiento de la precipitación en una zona determinada. Para ampliar el análisis, sería prudente considerar la existencia de otras variables, como la influencia de huracanes, tormentas tropicales, flujos de viento, brisas marinas, actividades monzónicas, variabilidad interna de la circulación y la presencia, en sinergia, de otros fenómenos de variación natural.

Se pone a discusión, además, la procedencia y calidad de los datos analizados. Los registros del periodo 2010-2015 se extrajeron de estaciones climatológicas automáticas, distintas en características y ubicación a las estaciones de tipo manual, de donde se compilaron el resto de los datos (periodo 1960-2009). Y aunque la homologación de las series tiene sustento estadístico, dicha práctica recibe crítica de distintos autores. Por lo tanto, se dificulta aseverar con certeza su utilidad en el desarrollo de modelos predictivos. Sin embargo, se destaca que es la única manera disponible de estudiar las variaciones de precipitación en la zona. Después del año 2015, las estaciones de SMN presentan amplias lagunas de información, y el mismo problema ocurre con los datos diarios y mensuales de las estaciones de la SEMAR e Inifap. La escasez e insustancialidad de los datos meteorológicos son obstáculos discutidos a nivel nacional, haciendo hincapié en la obligación de monitorear y mejorar el funcionamiento de la red de estaciones climatológicas (Luna *et al.*, 2018). Para continuar con el estudio de la precipitación en la zona, se recomienda utilizar el software CLIMATOL para la homogenización de las series de datos al replicar los procedimientos de esta investigación (Gujjarro, 2004).

En términos de cambio climático, es imprescindible continuar con el monitoreo de la precipitación a fin de entender su comportamiento y anticipar impactos negativos. Por ejemplo, tomando de referencia los resultados de esta investigación y el valor de precipitación proyectada en el escenario horizonte cercano (2015-2039) del modelo HADGEM1 A2, uno de los más adecuados para México (Conde *et al.*, 2011), la precipitación en verano durante un evento Niña podría ser hasta 11 % mayor que lo normal en SB y 21 % en SI; y en ambas, un invierno durante evento Niño llegaría a ser hasta tres

veces más lluvioso de lo habitual. Como se ha analizado, el peligro aumenta cuando se conjugan consecutivamente eventos ENSO y PDO. Un evento Niña en verano, seguido de un evento Niño en invierno, traería precipitación por arriba de lo normal en los meses de julio a octubre y provocaría la continuidad de las lluvias hasta febrero. En caso contrario, un evento Niño en verano, seguido de un evento Niña en invierno, resultaría en una sequía prolongada.

El aumento de la precipitación en la anomalía mensual no forzosamente trae consigo mayor precipitación acumulada total. La tendencia de la serie SB indica un decremento sostenido, y en la serie SI no es clara, por lo que se especula que las anomalías de precipitación ocurren intensamente durante periodos concretos: lluvias intensas conglomeradas en ciertos meses y sequías graves prolongadas. Según las previsiones de cambio climático, este comportamiento podría agravarse.

Por último, se puntualiza que el objetivo de la presente investigación es de tipo exploratorio, por lo que los hallazgos generan más interrogantes que respuestas acerca de los motivos y las implicaciones sobre los ecosistemas, los recursos naturales y las comunidades humanas. De tal modo, es vital continuar con el monitoreo y análisis de datos para dar pie a diversas investigaciones científicas en torno al tema en la zona. Como se ha mencionado anteriormente, esta investigación es complementaria al análisis realizado por Nájera *et al.* (2020) sobre la variación de temperatura y su teleconexión con ENSO y PDO en la misma área de estudio.

CONCLUSIONES

Se analizó la variación de precipitación decadal y estacional de un fragmento de la Llanura costera del Pacífico en el estado de Nayarit (series de SB y SI), y su relación con los fenómenos de variación natural del planeta ENSO y PDO. La variación decadal expuso una tendencia decreciente en la serie SB y de aumento en la serie SI. Por su parte, la variación estacional mostró cambios en ambas series a partir del periodo 2000-2009, acentuados en 2010-2015. La precipitación invernal aumentó y la lluvia en verano se congregó en ciertos meses: agosto y octubre en SB, junio y septiembre en SI. Sin embargo, al analizar la variación anual, se especula que el comportamiento es cíclico, con periodos de aumento seguidos por periodos de tendencia en decremento.

Este comportamiento podría estar relacionado con la influencia de eventos ENSO en conjugación con PDO. Ambas series presentaron correlación significativa con los índices ENSO (ONI y PDO). En SI, la influencia fue mayor que en SB (de 17 % a 23 % contra 12 % a 18 %). Los meses de noviembre a febrero presentaron las correlaciones

positivas más altas; marzo y abril, las más bajas; y julio-septiembre, correlaciones inversas, es decir, veranos secos e inviernos lluviosos durante eventos Niño y viceversa durante eventos Niña, como ya han estipulado otros autores para la región noroeste del país. Cabe mencionar que la serie SI presentó mayor amplitud en anomalías que la serie SB (-1.9 a 5.7 y -1.8 a 4). Para PDO, las correlaciones en ambas series fueron bajas (0.4 % SB, 0.8 % SI). Los meses noviembre, diciembre y mayo obtuvieron las correlaciones positivas más altas; marzo y abril, las más bajas, y los meses julio-septiembre exhibieron correlaciones inversas. La presencia de PDO parece potenciar los efectos de los eventos ENSO sobre el comportamiento de la precipitación.

Para complementar el análisis de correlaciones, se realizó un estudio de probabilidad condicional mediante redes bayesianas. Según los resultados de la correlación estacional con ENSO, existe entre 22 % y 24 % de probabilidad de disminución y entre 27 % y 38 % de probabilidad de aumento de precipitación en evento Niño; entre 35 % y 38 % de probabilidad de disminución y de 17 a 21 % de probabilidad de aumento de precipitación en evento Niña. En el caso de PDO, -22 % de probabilidad de disminución y -25 % de probabilidad de aumento de precipitación en fase positiva, y -26 % de probabilidad de disminución y -23% de probabilidad de aumento en fase negativa. La serie SI presentó más condiciones estadísticamente dependientes con ENSO que la serie SB. Por su parte, la serie SB presentó más condiciones estadísticamente dependientes con PDO.

Finalmente, las reflexiones expuestas en el apartado *Discusión* deben complementarse con investigaciones puntuales para explicar con fundamentos sólidos el comportamiento de la precipitación. Además, es primordial continuar con el monitoreo de datos y mantenimiento de estaciones meteorológicas, ya que la principal limitante fue la falta de datos, la cual obligó a combinar información de distintas estaciones.

REFERENCIAS

- Brito Castillo, L., Vivoni, E. R., Gochis, D. J., Filonov, A., Tereshchenko, I. y Monzon, C. (2010). An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 74, pp. 531-539. doi: 10.1016/j.jaridenv.2009.10.014
- Brito Castillo, L. (2012). Regional Pattern of Trends in Long-Term Precipitation and Stream Flow Observations: Singularities in a Changing Climate in Mexico. En G. Liu (Ed.), *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management*, pp. 387-412. doi: 10.5772/32804
- Brito Castillo, L., Vega Camarena, J. P., Farfán, L. M. y Pineda Martínez, L. F. (2018). El balanceo de las lluvias ¿Mecanismo oscilatorio natural que explica las sequías en

- el Altiplano Mexicano y las lluvias abundantes en la costa de Nayarit? En E. Rodríguez, R. Welsh, A. Romo y B. Travieso (Eds.), *Riesgo de desastres en México. Eventos hidrometeorológicos y climáticos*, pp. 207-222. Recuperado de <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2019/07/libroRiesgosenMexicoFinal2.pdf>
- Cano, R., Sordo, C., y Gutiérrez, J. M. (2004). Applications of Bayesian networks in meteorology. En J. Gámez, S. Moral y A. Salmerón (Eds.), *Advances in Bayesian Networks*, pp. 309-327. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.123.8065&rep=rep1&type=pdf>
- Carrillo, F. M., Velázquez, A., Morales, J. C., Martínez, V., y Rendón, H. J. (2018). Variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta, Jal., México. En E. Rodríguez, R. Welsh, A. Romo y B. Travieso (Eds.), *Riesgo de desastres en México eventos hidrometeorológicos y climáticos*, pp. 207-222. Recuperado de <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2019/07/libroRiesgosenMexicoFinal2.pdf>
- Carvajal, A. F. y Pabón J. D. (2016). Transformación de la superficie terrestre por actividad humana y su relación con el cambio climático. *Sociedad & Naturaleza*, 28(2):185-198. doi: 10.1590/1982-451320160201
- Caso, M., González-Abraham, C. y Ezcurra, E. (2007). Divergent ecological effects of oceanographic anomalies on terrestrial ecosystems of the Mexican Pacific coast. *PNAS*, 104(25), 10530-10535. doi: 10.1073/pnas.0701862104
- Cerda, J. y Villarroel, L. (2007). Interpretación del test de Chi-cuadrado (X^2) en investigación pediátrica. *Revista chilena de pediatría*, 78(4), 414-417. doi: 10.4067/S0370-41062007000400010.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. y Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125-140. <http://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v24n1/v24n1a9.pdf>
- De la Lanza, G., Gómez, J., Blanco, M., Flores, F. y Hernández, S. (2010). Vulnerabilidad Costera: Caso de estudio del sistema de humedales de Marismas Nacionales, 205-230. En E. Rivera, I. Azuz Adeath, L. Alpuche y G. J. Villalobos Zapata (Eds.), *Cambio climático en México: Un enfoque costero y marino*, pp. 205-230. Recuperado de http://etzna.uacam.mx/epomex/publicaciones/Cambio_Climatico/ccmexico1B.pdf
- Díaz, S. C., Salinas Zavala, C. A., y Hernández Vázquez, S. (2008). Variability of rainfall from tropical cyclones in northwestern México and its relation to soi and PDO. *Atmósfera*, 21(2), 213-223. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v21n2/v21n2a6.pdf>

- Eiras Barca, J., Domínguez, F., Yang, Z., Chung, D., Nieto, R., Gimeo, L. y Miguez Macho, G. (2020). Changes in South American hydroclimate under projected Amazonian deforestation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1-19. doi: 10.1111/nyas.14364
- Fernani, P. (2022). R como un SIG: Extracción de datos climáticos de WorldClim. *Ecología Austral*, 32, pp. 45-54. doi: 10.25260/EA.22.32.1.0.1119
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), pp. 4302-4315. doi: 10.1002/joc.5086
- García, F. y Cruz, I. R. (2009). Variabilidad de la precipitación pluvial en la Región Pacífico Norte de México. *Agrociencia*, 43(1), pp. 1-9. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n1/v43n1a1.pdf>
- González, A., Bojórquez, J. I., Nájera, O., García, J. D., Madueño, A. y Flores, F. (2009). Regionalización ecológica de la llanura costera norte de Nayarit. *Investigaciones Geográficas*, 69, pp. 21-32. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=So188-46112009000200003
- Guijarro, J. A. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogenización de datos climatológicos. En J. C. García, C. Diego, P. Fdez. de Arróyabe, C. Gardemia y D. Rasilla (Eds.), *El Clima entre el Mar y la Montaña*, pp. 493-502. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=5486>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. y Lister, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TSR.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), pp. 623-642. doi: 10.1002/joc.3711
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). Serie cartográfica de Fisiografía. Escala 1:1 000 000. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- Kouame, Y. M., Obahoundje, S., Diedhiou, A., François, B., Amoussou, E., Anquetin, S., Sacre, R., Kouakou, L., N'guessan, V. H., Soro, E. G. y Yao, E. K. (2019). Climate, land use and land cover changes in the Bandama Basin (Côte D'Ivoire, West Africa) and incidences on hydropower production of the Kossou Dam. *Land*, 8(7), pp. 1-21. doi: 10.3390/land8070103
- Lobato, R. y Altamirano, M. A. (2017). Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), pp. 101-116. doi: 10.24850/j-tyca-2017-06-07
- Luna, A., Valdés, O. y Villanueva, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En N. Hernández., L. Ruelas. y M. Nava (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas*, pp. 163-173. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/328780933_Sustentabilidad_del_desarrollo_desafios_y_propuestas

- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), pp. 313-330. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. y Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), pp. 1069-1079. doi: 10.1115.553.1185
- Méndez González, J., Navar, J. J. y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65, pp. 38-35. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n65/n65a4.pdf>
- Méndez, J., Nájera, J. J., González, H., y Treviño, E. J. (2007). Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencia UANL*, 10(3), pp. 290-298. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/402/40210309.pdf>
- Méndez, J., Ramírez, A., Cornejo, E., Zárate, A., y Cavazos, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas*, 73, pp. 57-70. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n73/n73a5.pdf>
- Nájera, A., Carrillo, F. M., Nájera, O. y Chávez Dagostino, R. M. (2020). Caracterización climática y variabilidad de temperatura superficial de la llanura costera de Nayarit y su teleconexión con ENSO y PDO. *Acta Universitaria*, 30, pp. 1-21. doi: 10.15174/au.2020.2651
- Nájera, A., Carrillo, F. M., Morales, J. C. y Nájera, O. (2021). Cambio de cobertura y uso de suelo en llanura costera asociados a procesos antropogénicos: caso San Blas, Nayarit. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-21. doi: 10.21829/myb.2021.2712104
- Organización Meteorológica Mundial (OMT). (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía de usuario*. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/wmo_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
- Pabón, J. D., Rodríguez, N., Bernal, N. R., Castiblanco, M. A. y Sánchez, Y. V. (2013). Modelamiento del efecto del cambio de uso del suelo en el clima local-regional sobre los Andes colombianos. *Revista Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), pp. 379-391. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/race-fn/v37n144/v37n144a08.pdf>
- Palacios Hernández, E., Brito Castillo, B., Carrillo, L. y Tereshchenko, I. (2012). Interannual deviations of long-term data from observations and contrasting with reanalysis data from the oceanic station at Islas Marias, Nayarit, Mexico. *Atmósfera*, 25(4), 355-370. Recuperado de <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/33695>
- Palacios Hernández, E., Carrillo, L., Tereshchenko, I., Ortiz Bañuelos, A. D. y Ávalos Cueva, D. (2017). Análisis de datos meteorológicos a lo largo de la costa del Océano

- Pacífico Mexicano (Anomalías: parte II). *Ra Ximhai*, 13(3), 223-241. doi: 10.35197/rx.13.03.2017.13.ep
- Pavia, E. G., Graef, F., y Reyes, J. (2006). PDO-ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24), 6433-6438. doi: 10.1175/JCLI4045.1
- Sluiter, R. (2009). Interpolation methods for climate data: Literature review. KNMI, R&D Information, and Observation Technology. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/242783501_Interpolation_methods_for_climate_data
- University of Washington. (s. f.). Cooperative Institute for Climate, Ocean, and Ecosystem Studies. Recuperado de <https://cicoes.uw.edu/>
- U.S Department of Commerce. (s. f.). National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <https://www.noaa.gov>
- Varela, S., Terribile, L. C., de Oliveira, G., Diniz Filho, J. A. F., González Hernández, J. y Lima Ribeiro, M. S. (2015). ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas siG para trabajar en biogeografía. *Ecosistemas*, 24(3), 88-92. doi: 10.7818/ECOS.2015.24-3.11
- Vega Camarena, J. P., Brito Castillo, L., y Farfán, L. M. (2018). Contrasting rainfall behavior between the Pacific coast and the Mexican Altiplano. *Climate Research*, 76(3), 531-539. doi: 10.3354/cro1538
- Wang, B., Luo, X., Young-Min, Y., Sun, W., Cane, M. A., Cai, W., Yeh, S. y Liu, J. (2019). Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 116(45), 22512-22517. doi: 10.1073/pnas.1911130116
- Wang, X., Zhang, B., Xu, X., Tian, J. y He, C. (2019). Regional water-energy cycle response to land use/cover change in the agro-pastoral ecotone, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 1-66. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124246
- Wolter, K. y Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events - how does 1997/98 rank? *Weather*, 53, 315-324. doi: 10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x.
- WorldClim 2.1. (s. f.). Global climate and weather data. Recuperado de <https://www.worldclim.org>
- Zebiak, S. E., Orlove, B., Muñoz, A. G., Vaughan, C., Hansen, J., Troy, T., Thompson, M., Lustig, A. y Garvin, S. (2014). Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationships. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(1), 17-34. doi: 10.1002/wcc.294

María de los Ángeles Pérez Villar¹
Felipa Sánchez Pérez²
Sofía Ruíz Liévano³

^{1,2,3} División Académica de Ciencias Sociales y Humanidades
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

4

CAPÍTULO

MEDIDAS REACTIVAS DE ADAPTACIÓN ANTE INUNDACIONES EN LA ZONA CONURBADA DE NACAJUCA, TABASCO, MÉXICO

RESUMEN

Se presentan los resultados de un proyecto de investigación financiado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado que inició en noviembre de 2018 y concluyó en mayo de 2020; el objetivo fue identificar las estrategias que implementan los habitantes y autoridades de la zona conurbada del municipio de Nacajuca, Tabasco, ante las inundaciones, bajo el enfoque de la seguridad humana. Por metodología se realizó un estudio etnográfico mediante cien encuestas a la población objeto de estudio y entrevistas en profundidad a actores clave. El análisis e interpretación de resultados revela que las medidas reactivas de los habitantes son improvisadas, las autoridades se ven superadas ante la emergencia, y la inexistencia de medidas preventivas con perspectiva de género aumenta la vulnerabilidad, debido al menor rango social que representan en su mayoría las mujeres.

Palabras clave: adaptación, estrategias, inundaciones.

ABSTRACT

The results of a research project funded by the Teacher Improvement Program that began in November 2018 and concluded in May 2020 are presented; the objective was to identify the strategies implemented by the inhabitants and authorities of the suburban area of the municipality of Nacajuca, Tabasco, in the face of floods, under the approach of human safety. By methodology, an ethnographic study was carried out by means of one hundred surveys to the population under study and in-depth interviews to key actors. The analysis and interpretation of the results reveal that the inhabitants' reactive measures are improvised; the authorities are overwhelmed by the emergency; and the lack of preventive measures with a gender perspective increases vulnerability due to the lower social status that most women represent.

Keywords: adaptation, strategies, floods.

INTRODUCCIÓN

Los riesgos naturales y antropogénicos identificados en la geografía de Tabasco representan el espacio propicio para diseñar e implementar medidas preventivas y de acceso público por condición de género. Esta investigación se llevó a cabo en Nacajuca, Tabasco, donde la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos ha afectado la zona conurbada y modificado el estilo de vida de la población. Desde luego, también han sufrido las añejas medidas de prevención en la historia tabasqueña respecto a los desastres por inundaciones, principalmente las ocurridas en 1999 y 2007 (Álvarez y Tuñón, 2016).

Las amenazas hidrometeorológicas son fenómenos de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que pueden ocasionar la muerte, lesiones, impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de sustento, suspensión de servicios, trastornos sociales, crisis económicas o daños ambientales (EIRD, 2020). Entre ellas se encuentran los ciclones tropicales (también conocidos como tifones y huracanes), tempestades, granizadas, tornados, tormentas de nieve, fuertes nevadas, avalanchas, marejadas, inundaciones (incluidas las repentinas) y sequías, así como olas de calor y de frío. Las condiciones meteorológicas también pueden representar un factor para otras amenazas, tales como aludes, incendios forestales, plagas de langosta, epidemias, o el transporte y dispersión de sustancias tóxicas o material de erupciones volcánicas (UNISDR, 2009).

En ese sentido, Tabasco constituye una entidad vulnerable que, por sus características físicas e hidrológicas, es propensa a sufrir inundaciones que afectan de propia manera a la sociedad, ya que se aúna a lluvias atípicas en frecuencia, magnitud y gravedad. Se considera que las inundaciones son el desastre natural más destructivo en términos de consecuencias económicas y número de víctimas. Desde el año 2000 al 2006, las catástrofes relacionadas con la acción del agua produjeron más de 290 000 víctimas, afectaron a más de 1 500 millones de personas y costaron más de 422 000 millones de dólares. En general, estas implicaciones son especialmente devastadoras en áreas urbanas, donde habita la mayor parte de la población y pueden darse las consecuencias económicas más extremas (ESCUADER y colaboradores, 2010).

Por lo anterior, se observa que la población sufre a menudo dificultades como la escasez de alimentos, deterioro ambiental, afecciones a la salud humana, inestabilidad económica y en la dinámica familiar, entre otros perjuicios derivados de una emergencia hidrometeorológica. En consecuencia, esta investigación pretende identificar qué estrategias reactivas y de adaptación implementan los habitantes y autoridades de la zona conurbada de Nacajuca, Tabasco, frente a situaciones de emergencia generadas por inundaciones, se plantean las siguientes cuestiones: cómo resuelven los problemas que se presentan durante una inundación, cómo responden directamente, cómo se van adaptando en el momento del evento y cómo sobrellevan las crisis a las que se enfrentan.

ANTECEDENTES

Los desastres socio-naturales que vivimos actualmente representan un obstáculo tanto para la sociedad como para las instituciones encargadas de resguardar a las poblaciones vulnerables. Al respecto, Aguirre (2004) menciona que las sociedades latinoamericanas ignoran el conocimiento de los pueblos en cuanto a mitigar los efectos de los desastres. Por consiguiente, un estado con las características de Tabasco resulta interesante respecto a la preparación de las comunidades para casos de desastre a fin de dar una respuesta más certera en cuanto a los ámbitos de recuperación, rehabilitación y reconstrucción. Dado que cada localidad conoce su entorno, puede ayudar a trazar tanto una trayectoria de desarrollo como una estrategia de reducción del riesgo e inclusive una recuperación efectiva; por ejemplo, a través de mapas de riesgo, programas y planes diseñados desde la comunidad.

Por otra parte, en el marco del Día Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ICRES, 2020), se destaca que las estrategias nacionales y locales para reducir el riesgo de desastres deben ser multisectoriales (Figura 1). Asimismo, la meta E del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres hace un llamado a incrementar considerablemente el número de países que cuentan con estrategias a nivel nacional y local; sin embargo, la actividad ha tenido que suspenderse dado que el 11 de marzo de 2020 la OMS declaró como pandemia el brote de covid-19 (OMS, 2020).

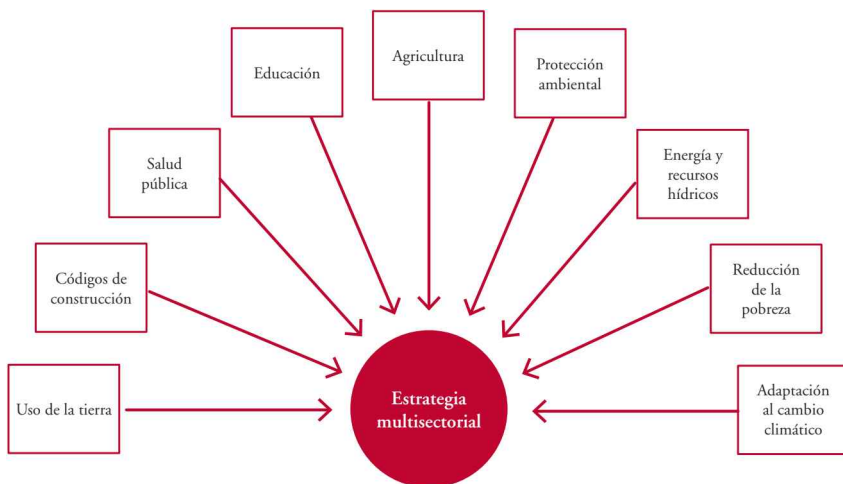


Figura 1. Componentes de una estrategia multisectorial (ICRES, 2020).

La Estrategia Internacional de Reducción de Desastres impulsa la prevención desde un enfoque creativo e innovador como parte integral de un desarrollo planeado en los

lugares vulnerables a los desastres con el fin de disminuir esa condición. Se destaca también que “se carece aún de herramientas y lineamientos prácticos, o son insuficientes”, por ello es importante “incrementar la conciencia pública sobre la reducción de desastres”; para lograrlo, es necesario que existan “indicadores estandarizados y ampliamente conocidos para evaluar el peligro, al igual que implementar sistemas de alerta temprana y programas de mitigación” (EIRD, 2001). Obtener los mejores resultados depende de incrementar la conciencia pública, pero también del intercambio horizontal de experiencias y enfoques entre las distintas comunidades locales, ciudades, países y regiones.

La colaboración de las comunidades vulnerables permite la aplicación oportuna de programas enfocados a la prevención y gestión de riesgos en materia de desastres. En la literatura especializada, Constantino y Dávila (2011) diseccionan la acción pública en fases y enfoques de intervención; las primeras se refieren al momento en que ocurre dicha acción: antes, durante o después; los segundos, al tipo de acción sea reactiva o de prevención:

- Acción reactiva: la respuesta de protección civil para salvaguardar la integridad de los habitantes.
- Acción preventiva o proactiva: salvaguarda el funcionamiento socioeconómico del área afectada.

Es importante destacar que, para los autores, la intervención reactiva “no reduce la posibilidad de la ocurrencia de desastres con el correspondiente efecto negativo en el funcionamiento social de las áreas geográficas que suelen confrontar tal tipo de eventos”.

MARCO TEÓRICO

Esta investigación adopta la perspectiva teórica de la *seguridad humana*, concepto acuñado en el Informe sobre Desarrollo Humano del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo titulado “Nuevas dimensiones de la seguridad en el sistema de las Naciones Unidas”; el Informe enfatiza las características de la seguridad humana: “universalidad, interdependencia de sus componentes, centrada en las personas y mejor garantizada mediante la prevención temprana y siete ámbitos relacionados: seguridad económica, alimentaria, de la salud, del medio ambiente, personal, comunitaria y política” (Naciones Unidas, 2012).

El enfoque de la seguridad humana permite tratar situaciones complejas de inseguridad mediante medidas colaborativas, sostenibles, reactivas, centradas en las personas, multi-

sectoriales, integrales, específicas para cada contexto y orientadas a la prevención (ONU, 2009); de igual manera, en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (FFNUSH, 2021), se afirma que los principios de la seguridad humana ponen “de relieve un mundo sin pobreza, hambre, enfermedades ni privaciones, un mundo sin temor ni violencia [...] con acceso equitativo y generalizado a una educación de calidad en todos los niveles, a la atención sanitaria y la protección social, al agua potable y al saneamiento”. Para establecer un hábitat asequible, seguro y resiliente, donde haya acceso a un suministro de energía universal, fiable y sostenible, y donde los alimentos sean suficientes y nutritivos, se requieren estrategias de desarrollo que den lugar a sociedades resilientes, a salvo de amenazas crónicas como la pobreza extrema, el hambre, las enfermedades, la violencia y los problemas que causan los trastornos repentinos y perjudiciales en su vida cotidiana (FFNUSH, 2021). Asimismo, la Agenda 2030 pretende ser agente de transformación ante los nuevos desafíos globales; para tal fin, la seguridad humana comprende un parámetro respecto a las necesidades, debilidades y vulnerabilidad para un desarrollo sostenible que tenga los principios de la inclusión e igualdad (FFNUSH, 2021).

La aplicación del concepto de seguridad humana, por su amplio alcance y porque aprovecha los conocimientos especializados de agentes diversos, asegura la coherencia, elimina la duplicación de esfuerzos e impulsa soluciones integradas que producen de manera efectiva mejoras tangibles en la vida diaria de las personas. Su ideal básico es lograr que las personas vivan con dignidad, sin temor ni miseria, y permite hacer frente a los problemas generados por los conflictos persistentes, la exclusión social y la pobreza extrema. Al centrarse en la relación entre la paz, seguridad, desarrollo y derechos humanos, el enfoque contribuye a acelerar el proceso hacia un desarrollo inclusivo y sostenible (FFNUSH, 2021).

Finalmente, para el Fondo Fiduciario de las Naciones Unidas para la Seguridad Humana, el enfoque de la seguridad humana, al tener como centro a la persona, fomenta su participación amplia; de esa manera, se logra la aportación de conocimientos respecto “a los diversos desafíos que enfrentan los distintos grupos en las comunidades y las regiones. Ese tipo de enfoque permite encontrar soluciones más específicas y orientadas a la comunidad, que encaran las vulnerabilidades inmediatas y al mismo tiempo crean resiliencia y protegen los medios de subsistencia a largo plazo” (CC, 2021); se apuntala también que “mediante las actividades de apoyo a nivel comunitario, el enfoque de la seguridad humana procura reducir los riesgos de desastre, propiciar el uso sostenible y racional de los recursos ambientales y fomentar sociedades pacíficas y prósperas” (CC, 2021).

LA SEGURIDAD HUMANA

El Instituto Interamericano de Derechos Humanos define el concepto, las estrategias y principios de la seguridad humana (IIDH, 2021):

La seguridad humana consiste en proteger, de las amenazas críticas (graves) y omnipresentes (generalizadas), la esencia vital de todas las vidas humanas, de forma que se realcen las libertades humanas y la plena realización del ser humano. La seguridad humana integra tres libertades: la libertad del miedo, la libertad de la necesidad (o miseria) y la libertad para vivir con dignidad:

- Libertad del miedo: implica proteger a las personas de las amenazas directas a su seguridad y a su integridad física, se incluyen las diversas formas de violencia que pueden surgir de Estados externos, de la acción del Estado contra sus ciudadanos y ciudadanas, de las acciones de unos grupos contra otros, y de las acciones de unas personas contra otras.
- Libertad de la necesidad o de la miseria: se refiere a la protección de las personas para que puedan satisfacer sus necesidades básicas, su sustento y los aspectos económicos, sociales y ambientales relacionados con su vida.

Libertad para vivir con dignidad: se refiere a la protección y al empoderamiento de las personas para librarse de la violencia, la discriminación y la exclusión. En este contexto, la seguridad humana va más allá de la ausencia de violencia y reconoce la existencia de otras amenazas a los seres humanos, que pueden afectar su supervivencia (abusos físicos, violencia, persecución o muerte), sus medios de vida (desempleo, inseguridad alimentaria, amenazas a la salud, etc.) o su dignidad (violación a los derechos humanos, inequidad, exclusión, discriminación) (IIDH, 2021).

ESTRATEGIAS

La seguridad humana recurre a dos estrategias de acción: la protección y el empoderamiento. La Comisión sobre Seguridad Humana define la protección como la medida establecida por los Estados, los organismos internacionales, las ONG y el sector privado para resguardar de las amenazas a las personas. Implica establecer planes de “arriba hacia abajo”, en reconocimiento de que las personas se enfrentan a amenazas que no pueden controlar (desastres naturales, crisis financieras o conflictos). La seguridad humana requiere la protección sistemática, preventiva e integral, y los principales responsables de proveerla son los Estados, pero también otros actores, como los organismos internacionales, la sociedad civil y las ONG (IIDH, 2021).

El empoderamiento consta de las acciones que habilitan a las personas para sobreponerse de las situaciones difíciles. Implica establecer medidas de “abajo hacia arriba”, con el fin de desarrollar las capacidades en las personas y en las comunidades para que sean artífices de su propio destino. No solo permite a las personas lograr el desarrollo de sus potencialidades, sino también participar en el diseño y ejecución de las soluciones necesarias para su seguridad humana y la de otras personas (IIDH, 2021).

ADAPTACIÓN

La adaptación a la variabilidad del clima y la mitigación del cambio climático representan los principales retos para las sociedades contemporáneas debido a su carácter de aprendizaje continuo, ajuste y transformación social e institucional. Los marcos de ambas se convierten explícitamente en políticas, estrategias y guías de acción para el desarrollo sustentable (Torres Lima y colaboradores, 2011).

CAMBIO CLIMÁTICO

Se denomina *cambio climático* a la variación global del clima de la Tierra debida a causas naturales y, principalmente, a la acción humana —quema de combustibles fósiles, deforestación y otras actividades de los ámbitos industrial, agrícola y de transporte—, como consecuencia de una retención de calor del sol en la atmósfera. Este último fenómeno se conoce como *efecto invernadero*, y entre los gases que lo causan se encuentran el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano (CEPAL, 2021). En la actualidad, el 90 % de los desastres tienen su origen en el cambio climático. La frecuencia e intensidad de huracanes, sequías e inundaciones se están convirtiendo en una nueva normalidad, según la ONU (2021).

INUNDACIÓN

De acuerdo con el glosario hidrológico internacional, la inundación es el “desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua”; desde luego, se debe entender el nivel *normal* como la elevación de la superficie del agua que no causa daños; es decir, la inundación es una elevación del cauce que puede generar pérdidas (OMM/UNESCO, 2012). Encontramos en la literatura especializada (CENAPRED, 2021) la clasificación de las inundaciones, las cuales obedecen al origen, o bien al tiempo que tardan en presentarse los efectos. Por su origen:

Pluviales. Son consecuencia de la precipitación local, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse durante horas o incluso días. El agua acumulada no proviene de ninguna otra parte.

- Fluviales. Se generan cuando el agua se desborda de los ríos y queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, en este tipo de inundaciones, el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada.
- Por falla de infraestructura hidráulica. Aún más grave que las antes mencionadas, la inundación provocada por la falla de la infraestructura destinada para protección es peor que si no existiera dicha infraestructura. Afortunadamente, las inundaciones por insuficiencia de obras de almacenamiento y control han sido poco frecuentes.

Por el tiempo de respuesta de la cuenca (el cual depende de las características fisiográficas de la cuenca):

- Lentas. Se generan avenidas en un tiempo relativamente largo, del orden de varias horas o días; ocurren principalmente daños materiales.
- Súbitas. Se forman en un tiempo que va desde unos cuantos minutos hasta un par de horas y causan la pérdida de vidas humanas en zonas pobladas.

MEDIDAS REACTIVAS

Las medidas reactivas, en el contexto de un desastre natural como la inundación, son aquellas en las que se “interviene sobre el riesgo existente o ‘riesgo aceptado’ y abarca medidas que minimizan probables daños y pérdidas, y/o que incrementen la resiliencia y capacidad de respuesta” (Aquino y colaboradores, 2010). Por otra parte, al conjunto de la función defensiva y la capacidad de reacción se le denomina *homeostasis*, y es imprescindible para mantener el equilibrio. Por su parte, la capacidad de recuperación básica y la de reconstrucción constituyen la *resiliencia*. La suma de la homeostasis y la resiliencia compone la resistencia del sistema ante la presencia de eventos desequilibrantes (Constantino y Dávila, 2011). Aunadas a ella, las estrategias de recuperación atañen a reanudar las actividades de producción indispensables para el estilo de vida y el bienestar de una comunidad.

Para Constantino y Dávila (2011), los disturbios naturales causan efectos sociales que se pueden clasificar en *directos* e *indirectos*; los primeros se relacionan “con la fuerza del impacto propia del evento y el daño ocasionado”; los segundos están formados

“por las secuelas en la estructura económica. Una amenaza identificada puede implicar crecientes costos sociales según la intensidad del disturbio y los factores de impacto correspondientes: la fragilidad social y la capacidad de reacción o recuperación” (Constantino y Dávila, 2011).

Debido a lo anterior, es vital identificar los efectos sociales directos e indirectos para implementar las acciones que mitiguen las amenazas; evaluar la vulnerabilidad física, social y económica de la población, además de la capacidad de respuesta de las autoridades gubernamentales, quienes deben atender a la población desde un inicio hasta el proceso de recuperación y reconstrucción de la zona afectada.

PERSPECTIVA DE GÉNERO

Oficialmente, en 1997 la transversalización de género se definió como: el proceso de evaluar las implicaciones, para mujeres y hombres, de cualquier acción planificada, incluyendo legislación, políticas o programas, en todas las áreas y en todos los niveles. Es una estrategia para convertir las preocupaciones y experiencias de la población en una dimensión integral del diseño, implementación, monitoreo y evaluación de políticas y programas en todos los ámbitos políticos, económicos y sociales, para que los beneficios sean igualitarios y equitativos en materia de género:

[...] considerar la perspectiva de género como una variable significativa para el desarrollo e implementación de políticas públicas en materia ambiental, considerando las brechas que hoy están presentes en la región y las oportunidades que surgen del intercambio de experiencias en esta materia, para cumplir con los requisitos de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, s. f.).

En este contexto, de acuerdo a estudios realizados en el estado de Tabasco respecto a los roles de género, se detectó que, ante las inundaciones, las mujeres sufren mayor vulnerabilidad social debido “a la rigidez de los roles de género que persisten en la sociedad que las relega a una posición subordinada, limita su acceso a los recursos y las excluye o sub-representa en la toma de decisiones” (Salazar, 2012).

VULNERABILIDAD

Según Constantino y Dávila (2011), la vulnerabilidad es la propensión a sufrir un daño o a ser afectado por una amenaza. Aunque no existe una sola forma de plantear sus

indicadores, es posible considerar diversos factores que forman parte de su estructura (Figura 2).



Figura 2. Elaboración propia con datos de (Constantino y Dávila 2011).

La alta vulnerabilidad que enfrenta Tabasco en la actualidad se debe a una combinación de factores: la deforestación y el deterioro constante de los ecosistemas naturales, los agresivos planes agropecuarios que han modificado drásticamente el régimen hidrológico (cortes, bloqueos y modificaciones de las trazas originales de los ríos), la tasa promedio de precipitación en Tabasco (la más alta del país con 1700 mm/año), además del incremento y aumento en la frecuencia de fenómenos vinculados con el cambio climático (Ecoportal, 2010).

METODOLOGÍA

El proyecto se inició en noviembre 2018 y concluyó en mayo de 2020; se realizó un estudio etnográfico y se aplicaron cien entrevistas semiestructuradas a la población objeto de estudio. Se trabajó en el municipio de Nacajuca con las localidades que comprenden la zona conurbada Nacajuca-Villahermosa: Bosque de Saloya, la Selva, el Cedro, Brisas del Carrizal y Manuel Buendía Téllez Girón, todas ubicadas cerca de las márgenes del río Carrizal.

En una primera etapa, se condujo una investigación documental, a partir de la cual se posicionó un enfoque teórico-conceptual sobre el problema, con términos como *riesgo*, *prevención*, *adaptación* y *mitigación* respecto al cambio climático y enfoque de género. El objetivo fue identificar las estrategias que ejecutan desde el ámbito local los habitantes del municipio de Nacajuca, en la zona conurbada de la capital del estado de Tabasco. Para el trabajo de campo, se empleó el estudio etnográfico mediante la técnica de observación en localidades seleccionadas del municipio de Nacajuca, el más cercano a la capital del estado. Como dato interesante, esta cabecera cuenta con una prominente presencia indígena de la etnia chontal cuyas comunidades pasan gran parte del año inundadas.

En la segunda etapa, durante los meses de febrero a agosto de 2019, se aplicaron cien cuestionarios semiestructurados con especificidades territoriales para conocer aspectos del fenómeno de estudio. Se consideraron los elementos comunes y diferenciales de la percepción y las estrategias de prevención, adaptación y mitigación en los entornos geográficos y contextos específicos de la investigación. También se realizaron entrevistas en profundidad, caracterizadas por ser personales, directas y no estructuradas, en las que un entrevistador hace una indagación exhaustiva (Ortez, 2016). A través de la aplicación de este instrumento de observación científica, se busca que el encuestado hable libremente sobre un tema; en este sentido, se aplicó a los actores clave en la problemática planteada: académicos e investigadores expertos en el tema, autoridades relacionadas con la prevención de riesgos de desastres y personal de las coordinaciones municipales de atención a las mujeres, así como de protección civil. Finalmente, se obtuvieron las conclusiones de la investigación a partir de la interpretación de los datos obtenidos en las encuestas y entrevistas a la población objeto de estudio.

SITUACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Nacajuca se localiza en la subregión del Centro, 24 kilómetros al noroeste de la cabecera municipal de Villahermosa, en el estado de Tabasco (Figura 3). El mapa general de México indica que Nacajuca se encuentra situado en las coordenadas $18^{\circ} 09' 05''$ N y $93^{\circ} 01' 06''$ O; cuenta con un relieve desigual, pero en términos generales su altitud es de 10 msnm, y su extensión territorial alcanza los 488.37 km² (Nacajuca, 2021).



Figura 3. Ubicación de Nacajuca en el estado de Tabasco (SEMARNAT, 2010).

Nacajuca limita al norte con los municipios de Jalpa de Méndez, Centla y Centro, al este con Centro, al sur una vez más con el municipio de Centro y Cunduacán, finalmente en la región oeste nuevamente limita con Cunduacán y Jalpa de Méndez.

En el año 2010, la población del municipio ascendía a 115 066 habitantes (INEGI, 2010), número que creció en la Encuesta Intercensal del INEGI 2015, la cual recopiló la cantidad de 138 366, dividida en 70 722 mujeres y 67 644 hombres (INEGI, 2016). En contraste, la última encuesta arroja que el total de la población es de 150 300 habitantes (INEGI, 2020). La Tabla 1 muestra este vertiginoso ritmo de crecimiento poblacional.

Tabla 1. Población total de Nacajuca, Tabasco. Fuente: INEGI (2010, 2015, 2020).

HABITANTES	AÑO
115 066	2010
138 366	2015
150 300	2020

INUNDACIONES EN LA ZONA CONURBADA DE NACAJUCA

La zona conurbada Villahermosa-Nacajuca se conformó mediante el acuerdo del Ejecutivo del Estado de fecha 27 de marzo de 2006, publicado en el Periódico Oficial del Estado, en el marco de la Ley de Ordenamiento Sustentable del Territorio del Estado de Tabasco. Comprende una superficie de “2946-31-02 hectáreas” (Gobierno de Tabasco, 2006). En los últimos años, la acelerada dinámica de crecimiento de la zona ha resultado en la necesidad de ampliar y precisar sus límites. En conjunto, estos municipios conforman la Zona Metropolitana de la ciudad de Villahermosa, la vigesimosegunda zona conurbada más grande de México (Gobierno de Tabasco, 2015). Al respecto, la Tabla 2 destaca las localidades que integran el objeto de estudio, de mayor a menor de acuerdo a su número de habitantes.

Tabla 2. Poblaciones que integran la Zona Metropolitana de Villahermosa. Fuente: INEGI (2020).

LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	HOMBRES	MUJERES
Bosque de Saloya	9160	4385	4775
La Selva	7755	3752	4003
El Cedro	6165	2971	3194
Brisas del Carrizal	2,987	1421	1566
Manuel Buendía	1341	679	662
Téllez Girón			

El subsecretario de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial de la Secretaría de Ordenamiento Territorial y Obras Públicas, Luis Manuel Pérez Sánchez, dio a conocer que se prevé poner un alto al crecimiento desordenado de la zona conurbada. De acuerdo con proyecciones de población, la población pasará de 109 328 habitantes a más de 274 mil en el año 2040; es decir, tendrá un incremento del 150 por ciento; “el principal objetivo es evitar la ocupación de zonas de riesgo” (Torres, 2018). Como se mencionó anteriormente, este trabajo aborda principalmente el riesgo relacionado con las inundaciones, dada la cercanía a las márgenes del río Carrizal (Figura 4).

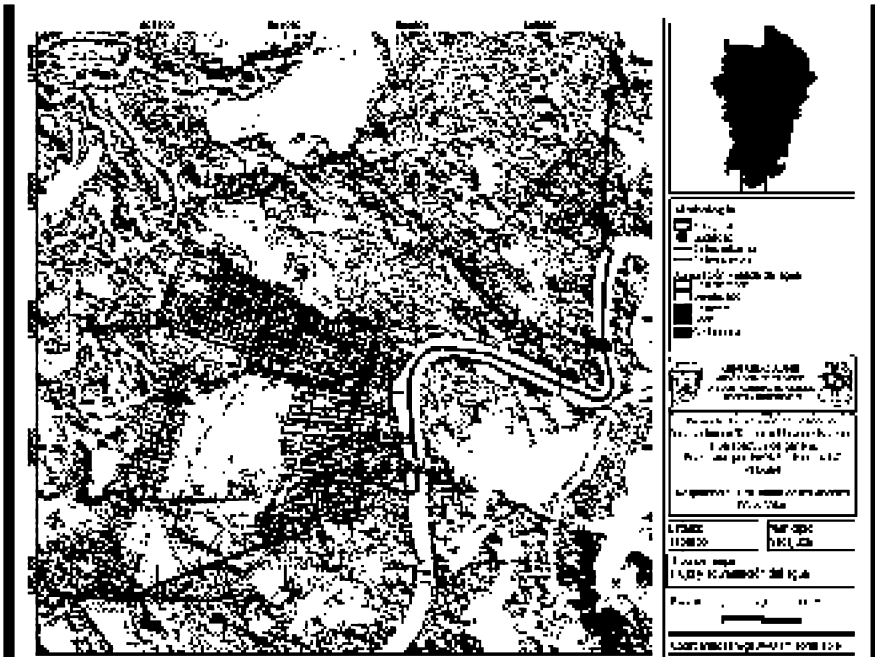


Figura 4. Acumulación de agua en la zona conurbada de Nacajuca.

En el estado de Tabasco confluyen numerosos riesgos, como la cercanía de las presas Malpaso, Angostura y Peñitas, y el peligro de desbordamiento de los ríos Grijalva, Usumacinta, Mezcalapa, Carrizal y de la Sierra, dada la abundancia de precipitación en determinados periodos. Asimismo, debido a las características del área de estudio, las localidades de la zona conurbada del municipio de Nacajuca son afectadas por el río Carrizal y algunos cuerpos de agua cercanos; más aún, el clima cálido húmedo con abundantes lluvias empeora la vulnerabilidad física. En la Figura 5 pueden observarse los cuerpos de agua cercanos a la zona de estudio.

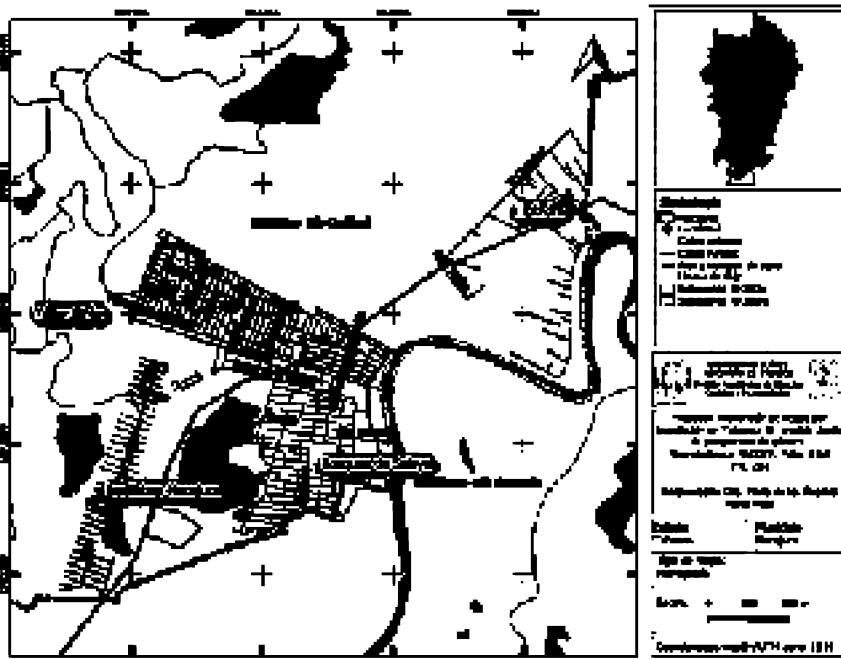


Figura 5. Hidrografías de localidades de la zona conurbada de Nacajuca.

Las amenazas a la seguridad de las personas ahora tienen un claro componente multidimensional. Es decir, los factores que vulneran la posibilidad de vivir sin miedo y disfrutar de un pleno desarrollo trastocan ámbitos como el político, económico, social y medioambiental. En consecuencia, el Estado se ha visto rebasado en su capacidad para resolver por sí solo las amenazas que vulneran a su gente. Por esta razón, tanto los gobiernos como la sociedad han reclamado una mayor coparticipación público-privada en esta materia.

RESULTADOS

El análisis etnográfico y las encuestas se aplicaron a 100 habitantes de la zona conurbada de Nacajuca, Tabasco; se les preguntó acerca de su experiencia ante emergencias hidrometeorológicas, antes, durante y tras el evento; asimismo, se llevaron a cabo tres entrevistas a profundidad con ayuda de un cuestionario semiestructurado a funcionarios de protección civil municipal. De las entrevistas, se obtuvieron los siguientes resultados respecto a la población de la zona conurbada:

En un contexto general, independientemente de la condición económica, existe población que enfrenta un mayor riesgo al peligro debido a factores como el material de construcción y la ubicación de sus hogares, además del acceso a la información; y son las mujeres quienes viven en una situación de mayor pobreza, debida al menor rango social que ocupan en comparación con los varones.

Se destaca que la mayoría de los residentes de la zona ha vivido por años de una u otra manera las inundaciones; por tal motivo, las percepciones, aunque no idénticas, sí son parecidas.

- 1) Vulnerabilidades: Se dividieron metodológicamente las principales vulnerabilidades que sufren los habitantes en temporada de lluvias fuertes que provocan inundaciones:
 - Física. Se pone en riesgo la integridad física, ya sea por causa de electrocuciones, ahogamientos o lesiones resultantes de percances, por el ataque de algún organismo endémico como lagartos o culebras, o también debido a las amenazas ocasionadas por los vendavales, los cuales levantan las láminas de las casas y provocan accidentes.
 - De género. Las mujeres pasan la mayor parte de su tiempo llevando a cabo sus actividades cotidianas en sus hogares. Ellas identifican claramente qué afecta a sus viviendas y qué genera mayor o menor riesgo, sobre todo si tienen a su cargo hijos pequeños, adultos mayores o personas enfermas o con alguna discapacidad.
 - Socioeconómica. Por la inundación, se daña la integridad de los muebles e inmuebles, se pierden materiales, documentos, aparatos eléctricos, todo lo que el agua encuentre a su alcance; y los damnificados deben reconstruir su patrimonio, a menudo adquiriendo deudas en el proceso.
- 2) Estrategias reactivas de los habitantes de la zona conurbada de Nacajuca ante las emergencias por las inundaciones:
 - Las familias se ven obligadas a abandonar sus casas y alojarse en viviendas de familiares o en los refugios temporales designados por el gobierno municipal o estatal. Estas familias tienen que dejar sus posesiones y viven con la inseguridad e intranquilidad de perder sus pertenencias, pues son propensas a ser víctimas de la delincuencia.
 - La experiencia y el conocimiento ante la inundación genera capacidades locales y formas de organización que, a veces, a las mujeres y hombres les son difíciles de identificar; por ejemplo, entre los resultados fue evidente que, a pesar de haber padecido el mismo problema durante años, los encuestados expresaron que nunca habían discutido sobre sus percepciones y experiencias para sobrellevar uno de sus mayores peligros: las inundaciones. Afortunadamente, han logrado percatarse de la importancia de intercambiar experiencias y organizarse comunitariamente antes de que las contingencias ocurran.

Frente a los impactos de las amenazas, es la comunidad quien responde ante los eventos, tanto por factores hidrometeorológicos como humanos; no espera a la respuesta institucional, porque debido a las propias características del territorio, cuando hay inundaciones la mayor parte del territorio se ve afectada.

- Las estrategias reactivas que se ejecutan en el momento de la inundación se realizan de manera individual y colectiva, en paralelo con las que implementan las instituciones gubernamentales para resolver problemas específicos, constantes y repetitivos en temporada de lluvias e inundaciones.
- 3) Estrategias de adaptación de habitantes de la zona conurbada de Nacajuca ante las emergencias por las inundaciones:
- Algunas de las estrategias que han construido los habitantes de la zona de estudio, han surgido en gran parte de las experiencias en pasadas inundaciones; sin embargo, estos métodos de adaptación comunitaria se implementan ya durante la emergencia, por lo que se tratan más de modos de resistencia o defensa.
 - En este punto, es importante destacar que son las mujeres quienes desempeñan una mayor participación; reconsideran un gran uso recursos y habilidades que van desde desarrollar mecanismos de ahorro y almacenamiento de alimentos hasta la elaboración de tapancos para salvaguardar los bienes materiales.
- 4) Estrategias reactivas con perspectiva de género:

Se identificaron motivaciones diferenciadas entre mujeres y hombres para responder a los escenarios donde se desarrolla tal comportamiento, el cual dependió en todo momento de los factores personales. La experiencia y el conocimiento ante las inundaciones generan capacidades locales y formas de organización, lo que a veces a las mujeres y hombres les son difíciles identificar, ya que son acciones que realizan al momento. Instalar muros en sus entradas, alzar sus muebles amarrados al techo en el caso de las casas de techos de lámina, poner costales de arena alrededor de sus viviendas son las principales acciones al momento de sufrir el evento.

- Una de las primeras coincidencias entre mujeres y los hombres se centró en que las familias y las comunidades se encuentran en muy malas condiciones, debido a que no reciben el apoyo del municipio de manera previa ni al momento del evento. Por otro lado, de acuerdo a los testimonios de mujeres y hombres, las diferencias para ambos en cuanto a los roles respecto a las medidas reactivas radican en la manera de abordar la problemática; las mujeres se perciben como responsables del cuidado y alimentación de los menores de edad, encargadas de preparar los alimentos además de lavar, secar y doblar la ropa, es decir, los trabajos domésticos. En el caso de los hombres, estos se perciben como los proveedores del hogar, quienes llevan de acuerdo a su fuente de ingreso los recursos necesarios para el sustento; además, son quienes toman las principales decisiones en la familia.

Durante las entrevistas en profundidad a tres funcionarios de Protección Civil del municipio de Nacajuca, se les cuestionó si el municipio podría atender a todas las comunidades durante una contingencia, si cuenta con el personal y los recursos suficientes. Se concluyó que hay pocas posibilidades de atender a todas las comunidades al mismo tiempo, sino que se deben considerar por prioridad, pues unas están en mayor riesgo que otras. Lo anterior es cierto a pesar de que existen programas de prevención como el Sistema de Alerta Temprana para Tabasco (SIAT), la Organización del Sistema Estatal/municipal de Protección Civil, diversas actividades en materia de prevención de los diferentes organismos gubernamentales, Alertas Plan de Emergencia Rehabilitación, Mapas de riesgo y vulnerabilidades estatal, municipal y local, entre otros documentos en materia de prevención de riesgo por desastres. No obstante, ninguna estrategia es suficiente si no existe un verdadero conocimiento del tema en materia de prevención, ni el personal necesario para atender la emergencia ambiental adecuadamente.

CONCLUSIONES

De los datos obtenidos tras la aplicación metodológica de las entrevistas a los habitantes de la zona objeto de estudio de Nacajuca y las encuestas en profundidad a actores clave, se destaca que la mayoría de los entrevistados no habían discutido con ninguna institución académica ni de gobierno sus percepciones sobre las amenazas atmosféricas; inclusive mencionaron que esa era la primera vez que conversaban acerca de este tema entre los integrantes de la misma comunidad, y no se habían dado cuenta de la importancia de comunicarse, compartir experiencias y organizarse comunitariamente antes de que ocurran las contingencias.

Las entrevistas en profundidad a actores clave revelaron que, en materia institucional, la zona conurbada de Nacajuca no cuenta con los recursos ni el personal suficiente para hacer frente a las emergencias hidrometeorológicas. Se concluye que no se cumplen tampoco los principios de seguridad humana, ya que las instituciones se ven rebasadas por la falta de personal en el momento de inundación y la población afectada tiene que buscar por su cuenta el modo para hacer frente al desastre. Finalmente, es importante que, al proponer una estrategia preventiva, se tomen en cuenta los saberes y conocimientos que al respecto se plantearon, sin perder de vista cómo es que las personas se relacionan con un entorno alterado por condiciones climáticas. La situación actual que vivimos nos deja claro que la integridad física de los seres humanos se encuentra constantemente amenazada, por lo que es necesario formular estrategias que partan desde la misma comunidad, bajo el enfoque de la seguridad humana.

REFERENCIAS

- Aguirre, B. E. (2004). Los desastres en Latinoamérica: vulnerabilidad y resistencia. *Revista mexicana de sociología*, 66(3), pp. 485-510.
- Aquino, A., Bruer, V. y García, J. (2010) Inversión Pública para la Reducción del Riesgo de Desastres: una propuesta conceptual y metodológica, Seminario Regional sobre Inversión Pública y Mecanismos Financieros, Seguros y Reaseguros Contra Desastres en América Latina y el Caribe: Experiencias Recientes. Recuperado de <https://www.bivica.org/files/inversion-publica-riesgo.pdf>
- Álvarez Gordillo, G. C. y Tuñón Pablos, E. (2016) “Vulnerabilidad social de la población desplazada ambiental por las inundaciones de 2007 en Tabasco (México)”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 25 (1).
- Fondo Fiduciario de las Naciones Unidas para la Seguridad Humana (2021). Cambio Climático. Recuperado de <https://www.un.org/humansecurity/es/climate-change/>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021). Inundaciones. Recuperado de <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2021). Cambio climático. Recuperado de <http://www.cepal.org/es/temas/cambio-climatico>
- Constantino, T., Roberto, M. y Dávila Ibáñez, H. R. (2011). Una aproximación a la vulnerabilidad y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos en México. *Política y Cultura*, (36), pp. 15-44. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26721226002>
- EcoPortal (2010) Deforestación y cambio climático acaban con edén tabasqueño, Argentina 2010. Recuperado de <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/2411.pdf>
- Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (2001). Marco de Acción. Recuperado de <https://eird.org/fulltext/marco-accion/framework-espanol.pdf>
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (2020). Terminología. Recuperado de <https://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>
- Escuder, I., Morales, A., Castillo, J. T. y Perales, S. (2010). “Medidas no estructurales para la reducción del riesgo. Herramientas para la estimación del riesgo”. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente.
- Fondo Fiduciario de las Naciones Unidas para la Seguridad Humana (2021). Agenda. Recuperado de <https://www.un.org/humansecurity/es/agenda-2030/>
- Gobierno del Estado de Tabasco (2015). Ley de Ordenamiento Sustentable del Territorio del Estado de Tabasco.

- International Centre for Earth Sciences (2020). Día Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres. Recuperado de <https://www.uncuyo.edu.ar/ices/dia-internacional-para-la-reduccion-del-riesgo-de-desastres>
- Instituto Interamericano de Derechos Humanos (2021). ¿Qué es seguridad humana? Recuperado de https://www.iidh.ed.cr/multic/default_12.aspx?contenidoid=-8c1a302f-fooe-4f67-b3e6-8a3979cf15cd&Portal=IIDHseguridad
- INEGI (2016). Panorama sociodemográfico en Tabasco.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/#Datos_abiertos
- INEGI (2015). Encuesta intercensal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082390.pdf
- INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html?texto=nacajuca%20tabasco>
- Municipios de México (2021). Nacajuca. Recuperado de <http://www.municipios.mx/tabasco/nacajuca/>
- Organización de las Naciones Unidas (2012). La seguridad humana en las Naciones Unidas, Fondo Fiduciario de las Naciones Unidas para la Seguridad Humana Dependencia de Seguridad Humana Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios. Recuperado de https://www.unocha.org/sites/dms/HSU/Outreach/1241684_Spanish%20HUMAN%20SECURITY%20Brochure_web_December%2010.pdf
- Rodríguez Sánchez Lara, G. y Martínez Velázquez, C. (2014). Actores relevantes de la agenda de seguridad humana, en Núñez Mendoza, P., (2014) Seguridad humana como pilar del desarrollo social, LXII Legislatura de la Cámara de Diputados.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). Manifestación de Impacto Ambiental en el municipio de Nacajuca, Tabasco. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/tab/estudios/2010/27TA2010HDO24.pdf>
- OMM/UNESCO (2012) International Glossary of Hydrology. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>
- Organización Mundial de la Salud (2020). Alocución de apertura del Director General de la OMS en la rueda de prensa sobre la COVID-19 celebrada el 11 de marzo de 2020. Recuperado de <https://www.who.int/es/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>
- Organización de las Naciones Unidas (2009). Teoría y práctica de la seguridad humana. Recuperado de https://www.iidh.ed.cr/multic/UserFiles/Biblioteca/IIDHseguridad/12_2010/97c70a6a-82ff-409c-a1de-438406607896.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (2021). Los desastres son la nueva normalidad. Noticias ONU. Recuperado de <https://news.un.org/es/interview/2019/11/1465021>

- Organización de las Naciones Unidas (2020). Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de <https://www.unep.org/events/unep-event/xxii-forum-ministers-environment-latin-america-and-caribbean>
- Ortez, E. Z. (2009). La entrevista en profundidad en los procesos de investigación social, La Universidad, 8. Recuperado de <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/launiversidad/article/view/125>
- Salazar Ramírez, H. (2012). Cambio climático y género: una visión desde lo local, Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco. Recuperado de <https://nofrackingmexico.org/wp-content/uploads/2019/06/Genero-y-CC-Tabasco-publicaci%C3%B3n-29-nov.pdf>
- Torres Lima, P. *et al.*, (2011) “Vulnerabilidad agroambiental frente al cambio climático. Agendas de adaptación y sistemas institucionales”, *Política y Cultura*, 36.
- Torres, M. (2018). Centro y Nacajuca fin a crecimiento desordenado de zona conurbada. *Diario de Tabasco*. Recuperado de <https://www.diariodetabasco.mx/sin-categoria/2018/12/29/centro-nacajuca-fin-a-crecimiento-desordenado-zona-conurbada/>
- UNISDR (2009). La terminología de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas. Recuperado de https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRterminologySpanish.pdf

Manuel Eduardo Mendoza Cantú¹
Teodoro Carlón Allende²
Rick Giardino³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

²CONACYT-Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, UNAM

³Geology & Geophysics, Texas A&M University

5

CAPÍTULO

DENDROGEOMORFOLOGÍA: UN ENFOQUE EN EL ANÁLISIS DE PELIGROS NATURALES

RESUMEN

La geomorfología es una disciplina que se ocupa del origen, evolución y distribución de los accidentes geográficos. Su objetivo es describir y explicar cómo se forman y cambian las características del paisaje. La evidencia geomórfica es fundamental para comprender eventos pasados y evaluar riesgos naturales. La dendrogeomorfología es una rama especializada que combina la dendrocronología y la geomorfología. Utiliza los anillos de crecimiento de los árboles como indicadores para fechar eventos y reconstruir la historia de los procesos geomórficos. Esta técnica proporciona información valiosa sobre sequías, inundaciones, deslizamientos de tierra y cambios climáticos pasados. La dendrogeomorfología se basa en la interpretación de los anillos de crecimiento de los árboles, que reflejan las condiciones ambientales en las que crecieron. Al analizar estos anillos, es posible determinar la fecha de inicio, duración y frecuencia de los eventos geomórficos. Esta disciplina es crucial para comprender la evolución del paisaje a lo largo del tiempo y el espacio, así como para evaluar los riesgos asociados a los procesos geomórficos. Proporciona una visión detallada de los cambios ocurridos en el pasado, lo que contribuye a una mejor planificación y gestión de los recursos naturales y la prevención de desastres.

Palabras clave: accidentes geográficos, desastres naturales, geografía, geología, geomorfología, peligros, procesos de la superficie terrestre.

ABSTRACT

Geomorphology is a discipline that deals with the origin, evolution and distribution of geographic features. It aims to describe and explain how landscape features form and change. Geomorphic evidence is fundamental for understanding past events and assessing natural hazards. Dendrogeomorphology is a specialized branch that combines dendrochronology and geomorphology. It uses tree growth rings as indicators to date events and reconstruct the history of geomorphic processes. This technique provides valuable information on past droughts, floods, landslides and climate changes. Dendrogeomorphology is based on the interpretation of tree growth rings, which reflect the environmental conditions in which they grew. By analyzing these rings, it is possible to determine the onset date, duration and frequency of geomorphic events. This

discipline is crucial for understanding the evolution of the landscape over time and space, as well as for assessing the risks associated with geomorphic processes. It provides a detailed view of past changes, which contributes to better planning and management of natural resources and disaster prevention.

Keywords: geographical features, natural disasters, geography, geology, geomorphology, hazards, land surface processes.

INTRODUCCIÓN

La geomorfología es una disciplina ligada a la geología y la geografía; surgió a principios del siglo xx y se enfoca en la descripción y explicación del origen, edad, evolución, morfología (morfométrica y morfografía), dinámica actual y distribución espacial de accidentes geográficos. El análisis geomórfico puede actuar como una herramienta para evaluar los peligros relacionados con los procesos de la superficie terrestre y los desastres naturales pasados. En muchos casos y debido a la ausencia de registros documentales, la información derivada de la geomorfología debe ser desarrollada a partir de archivos naturales (Aulitzky, 1992) que permanecen visibles en el paisaje luego de un evento. En este sentido, la evidencia geomórfica y sedimentológica es clave para ayudarnos a fechar y reconstruir la historia de eventos previos. Para hacer frente y reducir los riesgos, es necesario obtener información sobre el número de acontecimientos, el tamaño y los patrones espaciales de tales eventos (Wolman y Miller, 1960). Sin embargo, el estudio de la evolución del paisaje y el análisis de la frecuencia y magnitud de los procesos geomórficos a menudo sigue siendo cualitativo, ya que las observaciones directas de sucesos pasados son escasas y los datos de archivo permanecen fragmentados (Stoffel y Bollschweiler, 2009).

Los datos históricos de archivos alternativos y la generación de datos cronométricos, como los generados por medio de datación por radiocarbono, liquenometría, espectrometría de masas con aceleradores o la luminiscencia estimulada ópticamente, son esenciales para comprender mejor la dinámica del proceso y los cambios en la actividad a lo largo del tiempo y el espacio. Específicamente, la dendrocronología es una técnica que proporciona datos *proxy* para desentrañar la historia de la Tierra, principalmente durante el Holoceno. Estos datos los utilizan disciplinas como climatología, ecología, hidrología, geomorfología, arqueología, entre otras. Esta técnica constituye un *proxy* para determinar la historia de eventos pasados y relacionar estos sucesos con procesos climáticos, ecológicos, hidrológicos, geomorfológicos, arqueológicos y silvícolas (Storch y Navarra, 1995; Schweingruber, 1993). El análisis de anillos de árboles (dendrocronología) es uno de los métodos más precisos y exactos para fechar varios

procesos geomórficos que pueden ayudarnos a determinar estas incidencias con una precisión de al menos un año (Guzzetti *et al.*, 1999; Lang *et al.*, 1999). Esta rama del análisis de anillos de árboles se conoce como dendrogeomorfología e incluye, entre otras cosas, el estudio de la historia de ríos, lagos y mares, variaciones de glaciares y fenómenos de pendientes (Solomina, 2002). Al analizar los anillos de crecimiento, es posible reconstruir la fecha de inicio, así como la duración, amplitud y frecuencia de dichos eventos geomorfológicos.

La dendrogeomorfología, que combina geomorfología, ecología vegetal y dendrocronología, se ha utilizado para colocar muchos procesos peligrosos de superficie en un marco temporal (Alestalo, 1971; Shroder, 1978; Giardino *et al.*, 1984). La dendrocronología proporciona fechas con resolución anual para eventos como sequías, lluvias intensas, inundaciones, deslizamientos de tierra, retroceso de glaciares, erosión y deposición (Fritts, 1976; Shroder, 1978; Giardino, *et al.*, 1984). Nuestra comprensión de la relación entre el crecimiento de anillos en los árboles y variables como la precipitación o la escorrentía se puede utilizar para reconstruir patrones climáticos pasados para ubicaciones específicas, así como la relación entre el clima y el movimiento lento y rápido de laderas.

Este capítulo proporciona una descripción general de la historia de la dendrogeomorfología sobre cómo los árboles pueden verse afectados por procesos geomórficos, cómo se utilizan en la interpretación de eventos geomórficos pasados y lo que pueda informar sobre la ocurrencia y evolución de procesos geomórficos a lo largo del tiempo.

UNA BREVE HISTORIA DE LA DENDROGEOMORFOLOGÍA

Originalmente, los análisis de anillos de árboles en estudios geomórficos solo se usaban como una herramienta de datación (Douglass 1941; Stokes y Smiley 1968); y rara vez explotaba otra información ambiental que pudiera derivarse de estudios de anillos de árboles, como variaciones de ancho de anillo y registros de anomalías de crecimiento contenidas dentro de los árboles.

Los procesos geomórficos también son peligros naturales importantes, por lo que comprender su distribución, tiempo y controles proporciona información valiosa que puede ayudar en el desarrollo de la mitigación y defensa contra estos peligros y sus efectos en la sociedad (Osterkamp *et al.*, 2012; Stoffel y Wilford, 2012).

El análisis de los procesos geomórficos mediante el estudio de las anomalías del crecimiento en los anillos de los árboles se denomina "dendrogeomorfología" (Alestalo, 1971). Es una herramienta que sirve para adquirir datos sobre eventos pasados y peligros geomorfológicos (Stoffel *et al.*, 2006, 2010; Stoffel y Bollschweiler, 2008; Butler, 2013; Butler

y Stoffel, 2013). Las alteraciones geomorfológicas de diferentes orígenes pueden provocar respuestas similares en los árboles. Por lo tanto, es necesario seleccionar los árboles adecuados para su estudio en función de la información espacial complementaria antes de muestrearlos. Dichas fuentes de información suplementarias incluyen mapas geomorfológicos, imágenes aéreas e información histórica archivada (Stoffel y Bollschweiler, 2008; Stoffel y Bollschweiler, 2009; Stoffel *et al.*, 2010). En muchos países, incluido México, los datos geomorfológicos necesarios no existen y deben generarse como parte de estudios de anillos de árboles.

Recientemente, varios investigadores dendrogeomorfológicos se han centrado en los peligros asociados con los procesos fluviales, específicamente las inundaciones y los flujos de escombros (Ballesteros Cánovas *et al.*, 2015; Schraml *et al.*, 2015; Šilhán *et al.*, 2015; Zaginaev *et al.*, 2019; Šilhán *et al.*, 2019), y en deslizamientos de tierra y avalanchas de nieve (Stoffel *et al.*, 2005a, b, c, 2006, 2008a, b, 2010, 2011b; López Saenz *et al.*, 2012; Šilhán y Stoffel, 2015; Šilhán, 2019; Tichavský *et al.*, 2019), principalmente en ambientes templados y periglaciales en las montañas de Europa. En contraste, solo se han realizado unos pocos estudios geomórficos en ambientes montañosos subtropicales o templados (Paolini *et al.*, 2005; Papadopoulos *et al.*, 2007).

LAS HISTORIAS QUE NOS PUEDEN CONTAR LOS ANILLOS DE LOS ÁRBOLES

La dendrocronología se basa en el hecho de que los árboles desarrollan anillos anuales, especialmente en áreas con fuertes condiciones climáticas estacionales. La información sobre estos patrones de anillo se deriva de los núcleos incrementales o de las secciones transversales totales o parciales del vástago. Es bien sabido que en las coníferas (gimnospermas), las células del cámbium reproductivo forman grandes traqueidas de la madera temprana de paredes delgadas. Las traqueidas que se forman durante las primeras etapas de la temporada de crecimiento son fundamentales para el transporte de nutrientes y agua. Más adelante en la temporada, se desarrollan traqueidas pequeñas y densas de madera tardía (Figura 1). Estas capas son más oscuras debido a las paredes celulares más gruesas y sirven para aumentar la estabilidad del árbol. Por el contrario, la formación de tejido en árboles latifoliados (plantas con flores de angiospermas) es compleja y diversa que en las gimnospermas. Además de las traqueidas que se encuentran en las gimnospermas, el cámbium dividido de los árboles latifoliados también produce vasos (Speers, 2010).

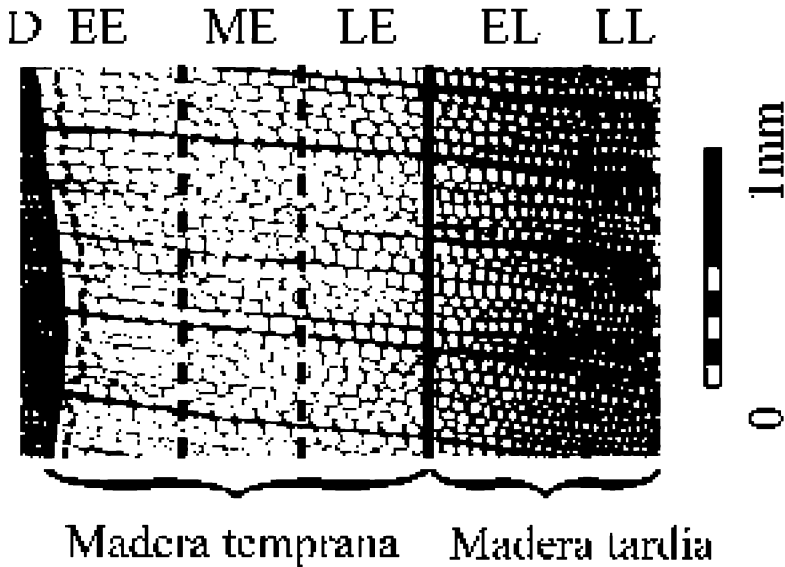


Figura 1. Durante el período de crecimiento celular, los árboles de coníferas primero forman capas de células de madera temprana de paredes delgadas (E) y de madera tardía de paredes gruesas (L). Al final de la temporada de crecimiento, cesa la división celular y se produce la latencia (D). Cuando se fechan eventos con precisión intra-anual, E se subdivide en madera temprana (EE), media (ME), tardía (LE) y L en madera tardía temprana (EL) y tardía (LL) (según Stoffel *et al.*, 2010).

El ancho y el carácter del anillo de los árboles están influenciados por factores bióticos y abióticos. Los factores biológicos como la composición genética y el envejecimiento de los árboles son únicos para cada especie y para cada árbol. Los factores abióticos incluyen una amplia variedad de factores ambientales, *e.g.* la luz, temperatura, agua, suministro de nutrientes y la influencia de vientos fuertes, que son bastante comunes para todos los árboles que crecen en un sitio específico (Fritts, 1976). Es decir que los árboles que crecen en el mismo sitio pueden registrar los mismos impactos y fluctuaciones ambientales (temperatura o precipitación) en su serie de anillos de árboles (Fritts, 1976; Cook y Kairiukstis, 1990; Schweingruber, 1996).

TIPOS DE ALTERACIONES DEL CRECIMIENTO

Además de la información específica del sitio que es común a varios árboles en cualquier locación, los árboles individuales también registran los efectos de las perturbaciones mecánicas causadas por procesos externos: pueden ser lesionados, sufrir rotura de

su copa o ramas, tener sus tallos inclinados, parcialmente enterrados o sus raíces expuestas. La evidencia de estos eventos se puede registrar en sus series de anillos (Figura 2).

La investigación dendrogeomórfica se basa en el modelo "proceso-evento-respuesta" (Shroder, 1978). Este "enfoque de proceso" es ideal para identificar el movimiento a largo plazo de una ladera causado por procesos geomórficos, por ejemplo, flujos de escombros, avalanchas de nieve, deslizamientos de tierra, desprendimientos de rocas, erosión de las orillas de los arroyos y modificación humana de la superficie de la Tierra; que representan el "proceso" de cualquier agente geomórfico. Los "eventos" geomórficos individuales que afectan a los árboles pueden resultar en una variedad de "respuestas" de crecimiento. Estos "eventos" y las "respuestas" asociadas se muestran en la siguiente sección (Figura 3). En 2005, Stoffel *et al.*, utilizaron un esquema conceptual basado en el modelo original de Shroder para eventos de caída de rocas. En la Figura 4 se ilustran ejemplos característicos de discos de tallo alterados y sus respectivas curvas de crecimiento.



Figura 2. Efectos de las perturbaciones mecánicas en los árboles.

- A) Tallo lesionado de un *Pseudotsuga menziesii* en Squamish, Canadá;
B) tallo inclinado de un *Pinus pseudostrobus* en Sierra Chincua, Michoacán, México.

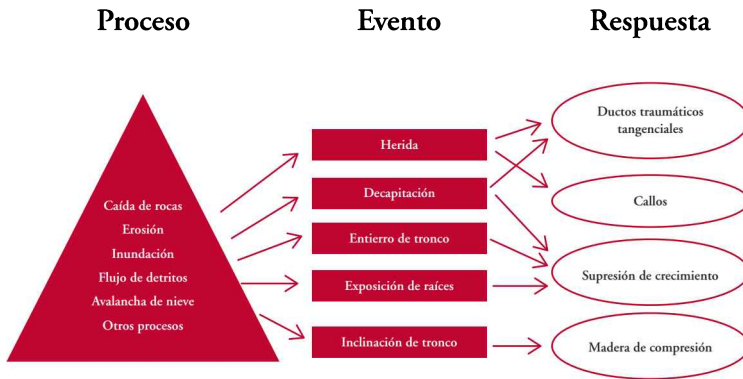


Figura 3. Modelo “proceso-evento-respuesta” adaptado de Shroder (1978).

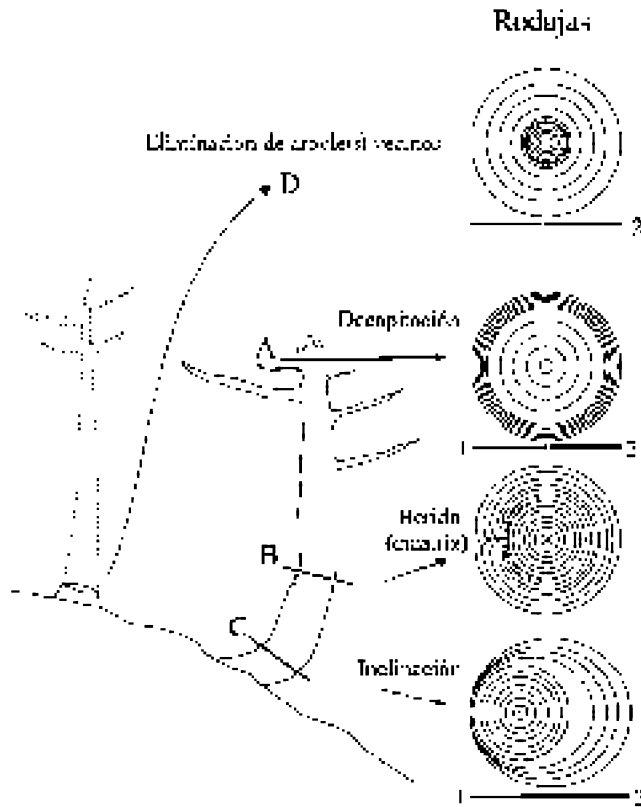


Figura 4. Evidencia utilizada para inferir eventos de caída de rocas (Adaptado de Stoffel *et al.*, 2005a).

HERIDAS DE ÁRBOLES (CICATRICES) Y FORMACIÓN DE CONDUCTOS DE RESINA

Los árboles afectados por procesos geomórficos suelen presentar arañazos y lesiones (Lundström *et al.*, 2009), dichas se pueden observar en el tronco, las ramas o las raíces del árbol. El cambium puede destruirse si el tallo es afectado (*a priori*) se interrumpe la formación de células en aumento y cesa la formación de nuevas células en el segmento lesionado del árbol. Para minimizar la descomposición y los ataques de insectos después del daño, el árbol (i) se compartimentará la herida (Shigo, 1984) y (ii) casi inmediatamente comenzará la producción de tejido calloso caótico en los límites de la herida (Schweingruber, 2001). Debido a la producción de tejido de callo, las células del cambium crecerán continuamente en la lesión desde sus límites (Figura 5) e idealmente pueden conducir al cierre completo de la herida (Sachs, 1991; Larson, 1994). El grado de curación depende en gran medida de la edad del árbol, la tasa de incremento anual y el tamaño de la cicatriz.



Figura 5. Producción de tejido calloso en una sección de *Pinus pseudostrobus*, en la Reserva de la Monarca, Michoacán, México.

Después de la lesión, se producen filas tangenciales de conductos de resina traumáticos (TRD) en el xilema secundario durante el desarrollo de ciertas especies de coníferas, por ejemplo, *Larix* spp., *Picea* spp., *Pseudotsuga* spp., o *Abies* spp. (Bannan, 1936; Stoffel, 2008; Butler *et al.*, 2010). Los ductos se extienden tanto tangencial como axialmente desde la lesión (Bannan 1936; Bollschweiler *et al.*, 2008b; Schneuwly *et al.*, 2009a, 2009b). Cuando ocurre daño durante el período de vegetación del árbol, la producción de resina comenzará unos días después del evento y aparecerán conductos dentro de las 3 semanas posteriores a la perturbación (Ruel *et al.*, 1998; Luchi *et al.*, 2005; Kaczka *et al.*, 2010). En consecuencia, al analizar secciones transversales, la posición intraestacional de la primera serie de TRD se puede utilizar para reconstruir eventos anteriores con precisión mensual (Stoffel *et al.*, 2005b, 2008b; Stoffel y Hitz, 2008), siempre que la perturbación haya ocurrido durante el período de vegetación. Sin embargo, al aumentar la distancia axial y tangencial del incidente, los TRD tienden a migrar a una porción posterior del anillo de árboles (Bollschweiler *et al.*, 2008b; Schneuwly *et al.*, 2009a). Por lo tanto, la datación intraestacional con precisión mensual debe basarse en secciones transversales o en un gran número de núcleos incrementales a la misma elevación en el tronco. Es importante mencionar que esta técnica no se puede utilizar en pinos ya que los TRD no se producen en este género, debido a que crean grandes cantidades de resina y conductos de resina que no están relacionados con heridas mecánicas (Phillips y Croteau, 1999; Ballesteros *et al.*, 2010).

Un árbol herido intensificará la formación de anillos de árboles a lo largo de secciones fundamentales para la supervivencia, lo que limitará el crecimiento de otros segmentos en los años posteriores a la perturbación (Bollschweiler, 2007). Esto puede resultar en cambios en el ancho del anillo en otras partes del árbol lejos de la herida (por ejemplo, una supresión del crecimiento en el radio opuesto durante varios años).

INCLINACIÓN DE TALLOS

En particular puede resultar de la presión rápida inducida por procesos geomórficos directos, por la deposición asociada de material (*e.g.*, avalancha de rocas y material de deslizamiento de escombros) o por la desestabilización lenta pero continua de un árbol a través de deslizamientos de tierra y erosión (Lundström *et al.*, 2007, 2008). Los árboles inclinados han sido estudiados dendrogeomórficamente hasta la fecha de eventos anteriores, desde finales del siglo pasado hasta ahora (Clague y Souther, 1982; Braam *et al.*, 1987a, b; Fantucci y Sorriso Valvo, 1999; Casteller *et al.*, 2007; Franco Ramos *et al.*, 2017; Quesada Román *et al.*, 2020; Chalupová, 2020), porque son comunes en diversas áreas afectadas por procesos geomórficos.

Una vez que el árbol se ha inclinado, siempre intentará recuperar su posición vertical y la reacción será claramente visible en ese segmento del árbol al que se ha movido el centro de gravedad a través de la inclinación del eje del tallo (Mattheck, 1993). En la serie de anillos de árboles, se observará un crecimiento excéntrico en la sección transversal después de un evento de inclinación y, por lo tanto, permitirá una datación precisa de la perturbación. La inclinación del tallo en árboles de hoja ancha conduce a la formación de madera en tensión (Schweingruber, 1983; Schweingruber, *et al.*, 1990; Schweingruber, 1996; Westing, 1965) y la excentricidad ocurrirá en la parte superior que mira hacia el agente de inclinación. Los árboles de hoja ancha también reaccionan al inclinarse con modificaciones ultraestructurales (por ejemplo, una capa gelatinosa orientada casi paralela al eje de la fibra), que solo son detectables cuando se estudian en microsecciones (Pilate *et al.*, 2004). Los árboles de coníferas se comportan de manera diferente y se producirá madera de compresión (también distinguida como madera de reacción) en la parte inferior del tronco. Los anillos individuales serán considerablemente más grandes y de apariencia ligeramente más oscura en comparación con el lado de la pendiente ascendente. La diferencia de color se debe a paredes celulares más gruesas y redondeadas de las traqueidas de la madera temprana y tardía (Timell, 1986; Du y Yamamoto, 2007). Se pueden reconocer múltiples eventos de inclinación en el mismo vástago por cambios en la cantidad, color u orientación de la serie de madera de reacción en la serie de anillos.

SEPULTAMIENTO DEL TALLO

Los flujos de escombros, lahares, inundaciones, deslizamientos de tierra o avalanchas de nieve con terrígenos pueden enterrar árboles al depositar material alrededor de la base de sus tallos. El crecimiento de estos árboles generalmente se ralentizará ya que el suministro de agua y nutrientes se interrumpirá temporalmente o al menos se limitará (Stoffel *et al.*, 2003; Stoffel y Bollschweiler, 2009). Por lo general, el entierro de un tallo puede provocar un aumento del crecimiento, solo si el material depositado es rico en nutrientes disponibles, el suministro de agua se mantiene y la profundidad del material depositado es poco profunda (Strunk, 1995).

Si el entierro de los tallos supera un cierto umbral, los árboles morirán por falta de agua y nutrientes. Según Strunk (1991), quien llevó a cabo un estudio de caso en los Dolomitas italianos, *P. abies* podría tolerar una profundidad máxima de enterramiento de 1,6 a 1,9 m en ambientes dominados por flujos de detritos de grano fino compuestos de material calcáreo y dolomítico. Si bien, hay escasos datos disponibles para otras especies y litologías, se espera que la sobrevivencia sea menor en regiones donde los flujos de escombros están compuestos de materiales masivos o más grandes (Stoffel *et al.*, 2003).

Ocasionalmente, los árboles enterrados producen raíces adventicias cerca de la superficie del nuevo terreno. De acuerdo con Strunk (1995), las raíces adventicias se formarán normalmente en los primeros cinco años después del entierro y el tiempo de brotación de las raíces se puede utilizar para una datación aproximada del proceso de sedimentación (Strunk, 1989, 1991; Marin y Filion, 1992). Concretamente cuando un árbol ha sido enterrado múltiples veces y se han formado varias capas de raíces adventicias, es posible estimar las profundidades de sedimentación de eventos individuales en el lugar del árbol (Strunk, 1997).

DECAPITACIÓN DE ÁRBOLES Y ELIMINACIÓN DE RAMAS

El rebote de las rocas y cantos rodados y otros fragmentos de árboles, los flujos de escombros y lahares, o igualmente, el efecto de ráfaga de avalanchas de nieve pueden causar la decapitación de árboles o la eliminación de ramas (Figura 6). En este contexto la pérdida de copa o ramas es más común en árboles grandes, cuando los tallos han perdido su flexibilidad (Stoffel *et al.*, 2003). También se ha observado la pérdida de ápice como resultado de impactos de desprendimiento de rocas cerca del nivel del suelo. En tales casos, la propagación sinusoidal de ondas de choque en el tallo da como resultado la eliminación de la corona. Este fenómeno se ha descrito como latigazo cervical o efecto de "hula-hoop" (Dorren y Berger, 2006; Lundström *et al.*, 2009).



Figura 6. Rotura y remoción de tallos de un Douglas fir causada por desprendimientos de rocas en el parque provincial Stawamus, Squamish, Canadá.

En los años posteriores al evento de decapitación, los árboles exhibirán varias supresiones de crecimiento. Para recuperarse, una o varias ramas laterales intentarán tomar la delantera para así reemplazar la copa rota, proviniendo una morfología del árbol que se denomina crecimiento de "candelabro" (Butler y Malanson, 1985). Además, no es inusual que la impresión del impacto cause lesiones y provoque la formación de filas tangenciales de conductos de resina traumáticos también (Stoffel y Bollschweiler, 2009).

EXPOSICIÓN Y DAÑO DE LA RAÍZ

Los procesos erosivos y la denudación (parcial) de las raíces generan diversas reacciones de crecimiento, tanto en el tallo como en las raíces expuestas. El tipo y la intensidad de las reacciones dependerán de la naturaleza del evento erosivo, que puede ser rápido o progresivo y gradual. Si varias raíces quedan completamente desnudas durante un evento erosivo repentino (flujo de escombros, lahar, inundación y desprendimiento de rocas), contravendrán con sus funciones principales y morirán rápidamente. Posteriormente, el árbol experimentará una escasez de agua y suministro de nutrientes, lo que devendrá la supresión del crecimiento del árbol y la formación de anillos estrechos en el tallo (ver Figura 4 (b); LaMarche, 1968; Carrara y Carroll, 1979; McAuliffe *et al.*, 2006).

En casos de exposición parcial de la raíz, con el extremo aún en el suelo, la raíz continuará creciendo y realizando sus funciones. La ubicación de este cambio en la serie de anillos de árboles permitirá determinar el momento de exposición (Bodoque *et al.*, 2006; Hitz *et al.*, 2008). La exposición continua de raíces suele estar relacionada con procesos lentos y bajas tasas de denudación. Siempre que las raíces se expongan gradualmente con el tiempo, también es posible determinar las tasas de erosión. En la parte expuesta, sin embargo, se producirán cambios anatómicos en la madera y se formarán anillos de crecimiento similares a los del tallo o las ramas.

La localización de este cambio en la serie de anillos de árboles puede permitir determinar el momento de exposición (Bodoque *et al.*, 2005; Hitz *et al.*, 2008). La exposición lenta y continua de las raíces generalmente es causada por procesos continuos y con tasas de denudación relativamente bajas, por ejemplo, el flujo superficial abre lentamente grietas en el suelo, desintegra el lecho de roca a lo largo de ríos, arroyos, lagos y océanos (inundaciones y erosión de la costa), así como con actividad de fallas y desplazamientos asociados a la actividad sísmica. Cuando las raíces se exponen gradualmente con el tiempo, también es factible determinar las tasas de erosión (Carrara y Carroll, 1979).

El cizallamiento y el daño de las raíces a menudo ocurren en áreas afectadas por deslizamientos de tierra o por lo largo de fallas sísmicas (Allen *et al.*, 1999; Vittoz *et al.*,

2001). Como resultado del daño de las raíces, el crecimiento de los anillos de los árboles se suprimirá y eventualmente cesará. Rizzo y Harrington (1988) mostraron que los períodos de supresión de anillos en los árboles de *P. rubens* y *Abies balsamea* de las montañas Apalaches se correlacionaron significativamente con la exposición al viento y el daño relacionado con las raíces y la copa.

ELIMINACIÓN DE ÁRBOLES VECINOS

Los procesos geomórficos también pueden eliminar árboles a lo largo de los canales o mediante el desarraigo y la rotura de los tallos y dejar intactos los árboles vecinos (Figura 7). Este fenómeno se puede observar en áreas afectadas por desprendimientos de rocas, flujos de escombros, lahares, inundaciones extremas, deslizamientos de tierra o avalanchas de nieve (Butler, 1979, 1985; Stoffel *et al.*, 2010). Bajo las nuevas condiciones ambientales, los árboles sobrevivientes tienen menos competencia, más luz, nutrientes y agua (Schweingruber, 1996). En consecuencia, comenzarán a producir anillos de incremento más grandes. Sin embargo, varias observaciones han indicado que esta liberación de crecimiento en árboles supervivientes puede retrasarse y, por lo tanto, esta reacción no siempre se puede utilizar para fechar eventos destructivos pasados con precisión anual. Sin embargo, la liberación de crecimiento en los árboles sobrevivientes puede corroborar la datación de eventos que se han identificado en otros árboles en el mismo sitio, por ejemplo, a partir de cicatrices, troncos inclinados, etc. (Stoffel *et al.*, 2005a).



Figura 7. Eliminación de la cubierta forestal por un deslizamiento de rocas que deja árboles sobrevivientes ilesos en un área elevada rodeada por el sendero de deslizamiento de rocas en Sierra Chincua, Michoacán, México.

COLONIZACIÓN DE FORMAS DE RELIEVE DESPUÉS DE PERTURBACIONES POR LIMPIEZA DE SUPERFICIES

Varios procesos geomórficos pueden eliminar la vegetación de la superficie, incluidas las masas forestales enteras, sin dejar evidencia dendrogeomórfica directa. En tales casos, las edades de germinación de los árboles que crecen en las superficies desnudas se pueden utilizar para estimar el tiempo de creación de los nuevos accidentes geográficos y/o las alteraciones del desmonte de los accidentes geográficos existentes (Stoffel *et al.*, 2010). Sin embargo, el enfoque sigue siendo una estimación aproximada, ya que el tiempo transcurrido entre el evento de desmonte y la recolonización depende en gran medida de la naturaleza del suelo y las condiciones climáticas, así como de la reserva de plántulas (Stoffel *et al.*, 2008). Esencialmente, este enfoque de "datación por edad mínima" proporciona dicha edad para esa superficie, la cual se ha utilizado repetidamente para fechar formas de relieve o para evaluar el tiempo mínimo transcurrido desde el último evento devastador en corredores de avalanchas de nieve, canales de flujo de escombros o llanuras aluviales (Sigafos y Hendricks, 1969; McCarthy y Luckman 1993; Winter *et al.*, 2002; Pierson, 2007; Bollschweiler *et al.*, 2008a).

Este enfoque implica estimar el tiempo entre la exposición de la superficie y la germinación de la primera plántula superviviente en esa superficie. Los problemas del establecimiento de una planta o la determinación del establecimiento de una planta de inmigrantes en un nuevo entorno (ecesis) se han discutido ampliamente en estudios que intentan fechar la formación de morrenas glaciares (ver Koch, 2009; McCarthy y Luckman, 1993), donde las estimaciones de ecesis pueden variar desde unos pocos años hasta varias décadas (Stoffel *et al.*, 2008). Se recomienda una identificación dendrogeomorfológica de las alteraciones del crecimiento en la serie de anillos de árboles para asegurar que ningún evento haya afectado al árbol desde su germinación (Stoffel *et al.*, 2010).

TÉCNICAS DENDROCRONOLÓGICAS EN GEOMORFOLOGÍA

ACTIVIDADES PREVIAS AL CAMPO: INTERPRETACIÓN AÉREA, SELECCIÓN

Antes de realizar muestreos dendrocronológicos en campo, es necesario identificar las unidades geomorfológicas. Esta tarea implica la consulta de mapas topográficos y geológicos, así como la interpretación de fotografías aéreas o imágenes de satélite. La escala del mapa geomorfológico depende del tipo de proceso y el objetivo de la investigación. Se recomienda ampliamente que la escala de mapeo varíe de 1: 100 a 1: 1 000 (Stoffel

y Bollschweiler, 2008). Si se carece de insumos se puede realizar un levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (Figura 8), el cual capturará imágenes que podrán ser procesadas con un programa de cómputo fotogramétrico como Agisoft PhotoScan Professional. El procesamiento de estas imágenes generará un modelo de terreno digital (DTM) de alta resolución a partir de una nube densa clasificada, así como un mosaico fotográfico aéreo. También es eficaz utilizar imágenes LIDAR (detección de luz y rango) para generar un DTM de alta resolución. Finalmente, el mapa detallado de unidades geomorfológicas servirá como base para seleccionar el sitio y los árboles a muestrear (Figura 9 y 10).



Figura 8. Pilotaje de vehículos aéreos no tripulados en la base de una avalancha de rocas en Pátzcuaro, Michoacán, México.

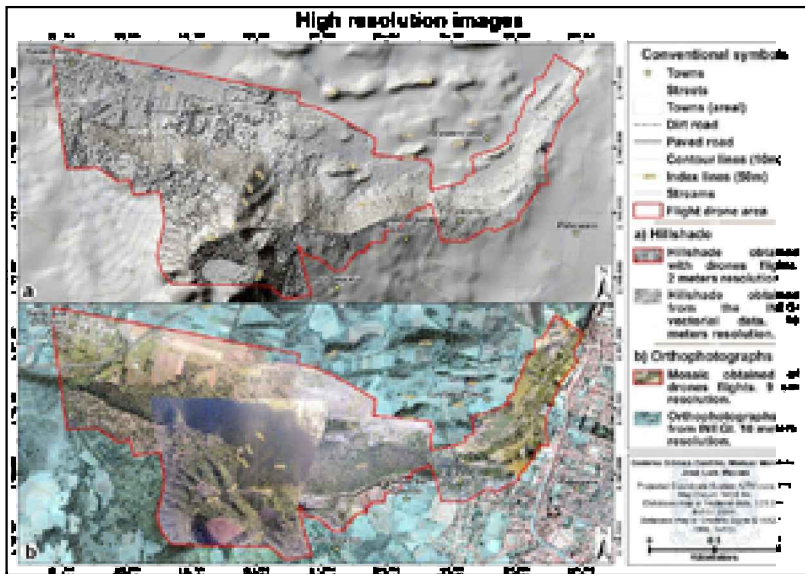


Figura 9. Mosaicos de imágenes de alta resolución obtenidas de vuelos de drones de una avalancha de rocas. Las áreas fuera del polígono rojo son referencias del contraste en resolución de la información previamente disponible para el área de estudio.

a) Modelo de sombreado y b) Ortomosaico rectificado (Gómez Castillo *et al.*, 2020).

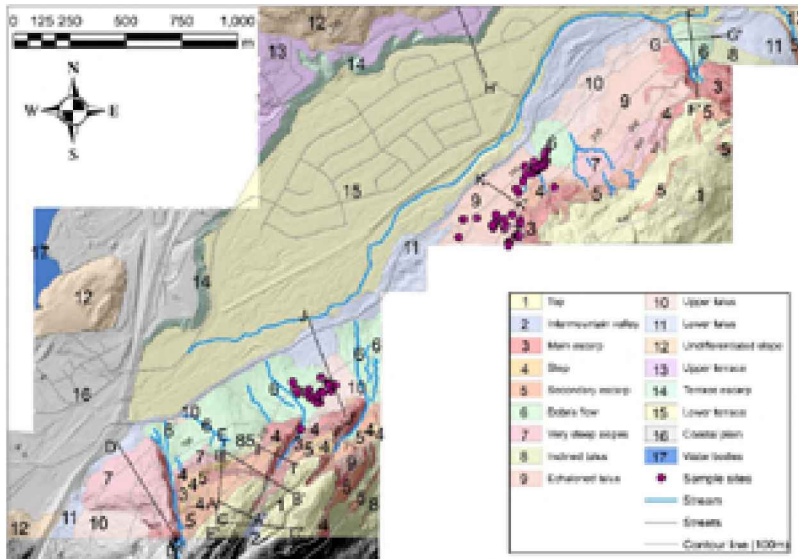


Figura 10. Mapa geomorfológico del escarpe norte del parque provincial Stawamus Chief, Squamish, Canadá. La interpretación se realizó en un DTM de alta resolución derivado de un LIDAR del Distrito de Squamish.

ENFOQUE DE CAMPO Y DISEÑO DE MUESTREO

El muestreo dendrocronológico aplicado al análisis y evaluación de cualquier proceso geomorfológico debe realizarse en formas de relieve directamente asociados con el proceso geomorfológico (insumo generado en el paso anterior). Este paso es clave y el árbol seleccionado debería verse afectado por la dinámica de un proceso. Si un árbol se ve potencialmente impactado por más de un proceso geomórfico o por cualquier perturbación humana (por ejemplo, extracción de resina), no se deben tomar muestras de los árboles. Algunos ejemplos de procesos geomorfológicos son: flujo de escombros, desprendimiento de rocas, deslizamientos de tierra, avalanchas de nieve (Stoffel *et al.*, 2010). Por ejemplo, los árboles pueden ser troncos impactados, enterrados, inclinados y decapitados con raíces expuestas (Stoffel y Bollschweiler, 2008) (Figuras 3 y 4).

Los estudios dendrogeomorfológicos tienen dos enfoques principales; el primero consiste en fechar las respuestas de los árboles a eventos al utilizar patrones de anillos de árboles dañados o afectados. El segundo enfoque consiste en reconocer la edad mínima del relieve, que considera el tiempo de regeneración de las plantas después de ocurrido el evento (Shroder y Butler, 1986). El muestreo debe considerar todas las posibles respuestas que los árboles puedan tener ante un cambio geomórfico (Shroder y Butler, 1986; Jacoby *et al.*, 1992).

El muestreo dendrogeomorfológico consiste en extraer los núcleos de crecimiento mediante una barrena de Pressler, tomando cuñas y cortes transversales (rodaja) con una motosierra (Figura 11). Las secciones transversales matarán al árbol, si todavía está vivo, por lo que se recomienda usarlo solo al tomar muestras de árboles muertos. Las cuñas dañarán el árbol, pero sobrevivirá. Los ejemplares de barrena producen un daño mínimo a los árboles y se toman perpendicularmente al tallo. El tipo de muestreo está determinado por el proceso geomorfológico a estudiar (Trappmann y Stoffel, 2013), y por las restricciones territoriales legales, las cuales varían dependiendo de si se trata de un parque natural o una reserva de biosfera, por nombrar algunos sitios.



Figura 11. Muestreo dendrogeomorfológico.

- A) Extracción de núcleos de crecimiento mediante barrena Pressler, b) recolección de una cuña, c) toma de muestras de cortes transversales (rodaja).

Según Butler *et al.*, (1987) el número de árboles muestreados varía considerablemente, al igual que el número mínimo de respuestas de anillos de árboles; ambos valores deben estar determinados por la naturaleza y la extensión geográfica del peligro específico que se ha estudiado. El muestreo debe tener en cuenta que las profundidades más pequeñas pueden dar registros poco fiables. Tales autores también notaron que la diferencia en la tasa de cambio con las profundidades de la muestra entre el número absoluto y pasajero de eventos difiere, por lo que la utilidad de un criterio entre diferentes muestras es cuestionable. En este sentido, Stoffel *et al.*, (2013) mencionaron que desentablan pautas claras para el análisis y la interpretación de perturbaciones en los registros de anillos, de modo que los umbrales resultan demasiado diferentes o inútiles para distinguir entre señal y ruido. Al mismo tiempo, los procesos con una gran huella espacial (deslizamientos de tierra o inundaciones) probablemente dejarán anomalías de crecimiento en una gran cantidad de árboles, mientras que los procesos con una distribución espacial limitada, como un desprendimiento de rocas, solo causarían cicatrices en uno o pocos árboles a lo largo de su trayectoria. En consecuencia, se deben considerar tres pautas generales:

1. Al muestrear áreas grandes, donde la variabilidad espacial en el evento de respuesta del proceso es mayor, se necesitará una muestra menos densa.
2. Cuando se muestrean áreas más pequeñas, donde la variabilidad en la intensidad del proceso es mayor, se requiere una muestra más densa.
3. En el caso de eventos de respuesta de procesos más antiguos, se necesitará un tamaño de muestra más grande y un valor de índice más pequeño para asegurar la inclusión en el registro de los árboles restantes que son anteriores a la ocurrencia del proceso (Butler *et al.*, 1987).

De hecho, los tamaños máximos de muestra, más allá de la redundancia, rara vez serán un problema dados los limitados activos temporales y financieros de la mayoría de los geógrafos involucrados en la investigación de campo.

Según Stoffel *et al.*, (2005) se deben recolectar al menos dos muestras de núcleo para cada árbol; la posición de la muestra dependerá del proceso geomórfico en estudio; por ejemplo, para árboles inclinados e impactados por un flujo de escombros o desprendimientos de rocas, los testigos deben tomarse cerca de la cicatriz (Stoffel y Bollschweiler, 2008; Stoffel y Corona, 2014), y recolectar los núcleos en el ángulo máximo, uno en la parte más expuesta hacia el proceso geomórfico, hacia arriba, y el otro en el lado opuesto (el más protegido ante el proceso), en sentido descendente (Franco Ramos *et al.*, 2018) (Figura 12). Adicionalmente, se debe realizar una descripción general del sitio: sustrato rocoso y características edáficas, aspecto e inclinación de la pendiente y coordenadas.

Se deben recopilar datos de cada árbol como altura, diámetro a la altura del pecho, tamaño de la cicatriz y orientación de la muestra. También se recomienda dibujar diagramas geomórficos y perfiles esquemáticos.

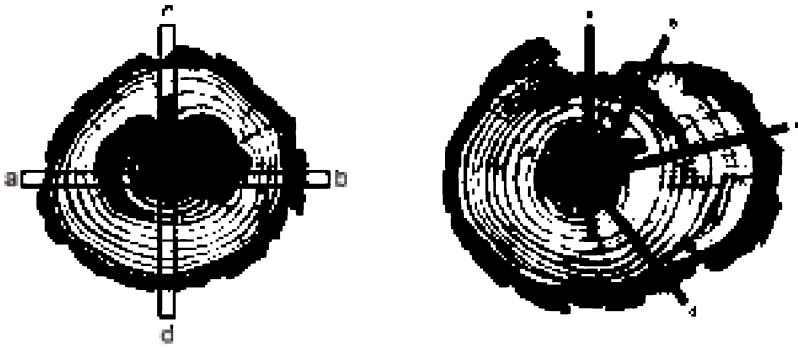


Figura 12. A) Se pueden extraer 4 núcleos por árbol utilizando barrenos tipo pressler; un núcleo se puede tomar hacia arriba (núcleo c), otro hacia abajo (núcleo d) y dos núcleos perpendiculares a la pendiente (núcleos a, b). B) Al extraer muestras de árboles dañados, se debe prestar especial atención a la posición de muestreo. Las muestras tomadas dentro de la herida "a" o del tejido del callo en crecimiento "b" proporcionarán un registro incompleto del anillo de los árboles, ya que las heridas se cierran desde los bordes. Idealmente, los núcleos incrementales se extraen justo al lado de la lesión "c", donde la presencia de tejido calloso en crecimiento y TRD permitirá una datación más precisa. Los núcleos tomados demasiado lejos de la herida "d" no mostrarán necesariamente signos del evento perturbador y, por lo tanto, evitarán la datación. Una combinación de "a" y "d" puede permitir la datación aproximada de la cicatriz si no se han eliminado anillos de la superficie impactada (modificado de Stoffel *et al.*, 2005 y 2013).

Mientras Corona *et al.*, (2012) estudiaban una actividad de avalancha en el valle de Arve en los Alpes franceses del norte, demostraron que se necesita un tamaño de muestra de ~100 árboles para obtener la mejor coincidencia posible entre la reconstrucción (anillos de árboles) y la documentación (archivos), al tiempo que se minimiza el ruido en el registro dendrogeomórfico. Corona y colaboradores (2014) demostraron que:

1. El muestreo de 50 a 100 árboles basta para obtener resultados satisfactorios en la frecuencia de los deslizamientos de tierra sin incluir ruido en el registro dendrogeomórfico.
2. Los umbrales crecientes de perturbación del crecimiento deben ajustarse al tamaño de la muestra y son preferibles a los valores fijos.
3. Una distribución uniforme de los árboles muestreados es crucial para aumentar la confiabilidad de los mapas de frecuencia, aún si la reconstrucción se basa en tamaños de muestra pequeños.
4. La selección de los árboles perturbados con mayor frecuencia es clave para reducir las incertidumbres en los mapas de frecuencia.

Además, es recomendable extraer muestras de algunos árboles inalterados por procesos geomórficos y ubicados fuera del área afectada pero cerca del sitio de estudio, con el objetivo de generar una cronología de árboles no relacionada con la perturbación geomórfica que sirva como línea de base para la comparación. Este procedimiento permite identificar anillos faltantes en la cronología y anomalías potenciales relacionadas con las condiciones climáticas y no con eventos geomórficos.

ENFOQUE DE LABORATORIO: PREPARACIÓN, PROCESAMIENTO, ANÁLISIS Y MODELADO DE MUESTRAS

Los núcleos de incremento, las cuñas y las secciones transversales deben procesarse con papel de lija con tamaños de grano progresivos (80 a 1200 granos cm^{-2}) siguiendo técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1996) (Figura 13). Posteriormente, las muestras se fechan mediante técnicas de cruzamiento. Este procedimiento se lleva a cabo identificando variaciones en el ancho de los anillos y otras características estructurales presentes en los árboles que crecen en sitios con características similares; esta técnica asegura que a cada anillo de árbol se le asigne un año calendario exacto de formación (Fritts, 2001; Speer, 2010). La datación se realiza con un microscopio estereoscópico, señalar años con cambios en el crecimiento del anillo provocados por el evento (Stoffel y Corona, 2014) (Figura 14). Una vez que se fecha cada anillo de crecimiento, se mide el ancho con un programa de cómputo de alta precisión (Figura 15), por ejemplo, un Velmex (resolución de 0.001 mm) (Robinson y Evans, 1980) o LINTAB (Rinntech, 2016). Las medidas de fecha y ancho de cada anillo son verificadas por el programa de cómputo COFECHA (Holmes, 1983).



Figura 13. Núcleos procesados con papel de lija (tamaños de grano progresivos desde 80 hasta 1200 granos cm^{-2}).



Figura 14. Núcleos de crecimiento datados.



Figura 15. Medición del ancho del anillo de un árbol usando un sistema de medición Velmex a una resolución de 0.001 mm.

Una vez que se fechan los anillos de árboles inalterados, se genera una cronología de referencia. Para los primeros años, el tamaño de la muestra debe estar conformada por

al menos cinco árboles (Stoffel y Bollschweiler, 2008). A continuación, las series dendrocronológicas se comparan tanto gráfica como estadísticamente con la referencia. Esta comparación es útil para identificar eventos no relacionados con un proceso geomórfico, por ejemplo, variaciones debidas a factores climáticos (Fritts, 2001). Además, las series se comparan con datos de precipitación o registros históricos de periódicos o informes. Comparadas las cronologías, es posible identificar la perturbación del crecimiento producida por procesos geomorfológicos, como la supresión o reacción de madera y crecimiento de excentricidad (Franco Ramos *et al.*, 2019; Stoffel y Bollschweiler, 2008; Stoffel y Corona, 2014). Se registran las reacciones de crecimiento identificadas en la serie dendrocronológica, excepto las relacionadas con procesos con poco movimiento de material (Stoffel y Bollschweiler, 2008).

Los criterios para definir un evento pueden ser cualitativos o semicuantitativos (Bollschweiler y Stoffel, 2010). Con el enfoque cualitativo, se ponderan los tipos de reacciones de los árboles y la intensidad del evento, con base en umbrales fijos de un porcentaje (Butler, 2010; Butler *et al.*, 1987b). Por otra parte, el semicuantitativo se centra en la distribución espacial de los árboles sin la aplicación de un umbral mínimo para cuantificar el tamaño de los eventos geomórficos (Bollschweiler *et al.*, 2007).

Una de las primeras aplicaciones del análisis de anillos arborales es la reconstrucción de eventos, que se basa en el cálculo e interpretación de los valores del índice de Shroder (I_t). Consiste en una suma del número de respuestas a eventos para un año dado y se pondera de acuerdo con el número de árboles que proporcionan el registro para ese año (Shroder, 1978).

$$I_t = \frac{\sum R_t}{\sum N_t} \times 100\% \quad (1)$$

Donde R_t es árboles que responden en el año t ; y N_t son árboles muestreados vivos en el año t .

Aunque este método fue ampliamente utilizado por los investigadores y sigue siendo una herramienta confiable para la reconstrucción de eventos. En busca de aumentar la confiabilidad de las reconstrucciones dendrogeomórficas, generalmente se establece un umbral para minimizar el ruido inducido por agentes no geomórficos y maximizar las señales. Butler *et al.*, (1987) fueron los primeros en cuestionar el umbral del índice óptimo, subrayando la dependencia del tipo de proceso geomórfico investigado.

Stoffel y colaboradores (2017) mencionaron que la mayoría de las investigaciones relacionadas con las laderas deben tener tener un índice de Shroder de al menos 40 % en el mismo año para denotar un evento confiable; sin embargo, en los desprendimientos de rocas, un valor de alrededor del 10 % es suficiente. La frecuencia de los eventos se puede

estimar dividiendo el número de estos registrado en un árbol por su edad. Los intervalos de recurrencia se obtienen dividiendo la edad del árbol por el número de eventos en cada árbol (Franco Ramos *et al.*, 2017).

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE ANILLOS DE ÁRBOLES Y PROCESOS GEOMÓRFICOS

Desde principios del siglo pasado se ha analizado y reconstruido una amplia gama de procesos de la superficie terrestre utilizando técnicas dendrogeomorfológicas. Una de las primeras aplicaciones se realizó mediante la evaluación de la erosión superficial de LaMarche en la década de 1960. LaMarche (1961, 1968), en lugar de usar tallos, usó raíces de árboles que fueron expuestas por el descenso de la superficie como un indicador de la superficie del suelo en el momento de la germinación de *Pinus aristata* de 5000 años en las Montañas Blancas de California, EE. UU., hoy en día, las raíces expuestas todavía se utilizan en estos estudios. Domínguez Castillo *et al.*, (2020) dendrogeomorfología aplicada para estudiar y fechar el proceso de erosión de un barranco ubicado en la Estación Experimental de Tupi (Piracicaba, São Paulo, Brasil). Los autores estaban interesados en explorar el potencial de esta ciencia en las regiones tropicales porque hay mínima investigación sobre este tema. Se han llevado a cabo otras investigaciones recientes para determinar la tasa de erosión de las orillas del río, examinando las raíces expuestas de los árboles en el arroyo Lavij en las montañas del norte de Alborz de Irán (Hosseinzadeh *et al.*, 2020). Sugirieron que la erosión fue causada por descargas completas a la orilla del río con un período de retorno de 1-3 años.

También se han analizado los procesos hidrológicos mediante técnicas dendrogeomorfológicas. Algunos de los primeros estudios de procesos geomórficos basados en anillos de crecimiento se centraron en las inundaciones, porque brindan servicios ecosistémicos esenciales y dan forma a la superficie de la Tierra, proporcionan suelos ricos, reponen los reservorios de agua subterráneos y juegan un papel integral en la ecología de los ecosistemas ribereños (Ballesteros *et al.*, 2015). Según el enfoque sugerido por Sigafos (1964), las alturas de las cicatrices de las inundaciones en los árboles se han utilizado para proporcionar estimaciones mínimas de las etapas máximas de las inundaciones en ríos y arroyos (Stoffel y Bollschweiler, 2009). Sigafos reconstruyó series de tiempo de inundaciones y concluyó que la evidencia botánica tenía un valor aplicado significativo para la ciencia hidrológica. Posteriormente, Helley y LaMarche (1968, 1973) combinaron evidencia geomórfica e información de anillos de árboles para analizar inundaciones durante un período de 400 años en varias cuencas hidrográficas del norte de California. Recientemente, Ballesteros *et al.*, (2020) han analizado el vínculo entre los modos atmosférico y oceánico y la variabilidad de las inundaciones inverna-

les durante el siglo XX sobre la base de series de flujo y descarga a largo plazo, archivos históricos y registros de anillos de árboles de inundaciones pasadas en la Cuenca del Atlántico Norte (NAB). Estos investigadores pudieron identificar que las inundaciones invernales más extremas ocurrieron en 1936 y tuvieron fuertes impactos en ambos lados del Atlántico. Este enfoque combinado podría mejorar la comprensión de estos eventos a gran escala y presumiblemente colaborar en la anticipación de futuros sucesos de inundaciones extremas. Zaginaev *et al.*, (2020) estudiaron las inundaciones repentinas de lagos glaciares (GLOF) y los flujos de escombros relacionados (DF), que son amenazas naturales significativas en las montañas Tien Shan, Asia Central. Sus hallazgos implican que las características glaciológicas y geomórficas podrían usarse para evaluaciones regionales de susceptibilidad en el futuro, por lo tanto, deberían funcionar para una mayor adaptación al cambio climático para mitigar los peligros y riesgos naturales.

Los aspectos cronológicos de la investigación de deslizamientos de tierra son de gran interés con respecto a la evaluación del peligro de los desencadenantes de deslizamientos de tierra. La investigación dendrocronológica sobre deslizamientos de tierra se remonta a principios de la década de 1980, con varios estudios realizados en la región de Quebec, en Canadá, y los Alpes franceses (Bégin y Fillion, 1985, 1988; Braam *et al.*, 1987a, b; Fillion *et al.*, 1991). Posteriormente, se estudiaron los deslizamientos de tierra activos en la cuenca del río Llobregat de España (Corominas, 1999). En Italia, la actividad de deslizamientos de tierra en Calabria y los Apeninos se ha interpretado a partir de estudios de anillos de árboles (Fantucci y McCord, 1995; Fantucci y Sorriso Valvo, 1999; Stefanini, 2004). Se han utilizado otras cronologías de anillos de árboles para reconstruir las historias de avalanchas de nieve en la Patagonia, Argentina (Mundo *et al.*, 2007; Casteller *et al.*, 2007) y el movimiento de los glaciares de rocas en las montañas Sangre de Cristo en Colorado, EE. UU. (Giardino *et al.*, 1978).

Una investigación reciente llevada a cabo en las montañas Karavanke en el noroeste de Eslovenia, comparó los cambios en el índice de excentricidad de los árboles y los cambios en la superficie del DTM derivado de los datos LIDAR, durante el período entre 2014 y 2017 (Oven *et al.*, 2019). Los autores identificaron que durante el período 1943-2015, la intensidad de los deslizamientos de tierra aumentó en la parte central del deslizamiento de tierra. Šilhán *et al.*, (2019) aplicó un enfoque multidisciplinario que incluyó la medición geofísica y el mapeo geomórfico de la parte oriental de las montañas Vsetínské vrchy (Cárpatos occidentales exteriores, República Checa). Se estudiaron puntos de importancia dividiendo un área de deformación de pendiente compleja grande en zonas homogéneas para obtener tantos datos cronológicos relevantes como fuera posible y para ayudar con una evaluación más precisa del peligro de los deslizamientos de tierra.

Las ocurrencias de avalanchas de nieve se han analizado frecuentemente con anillos de árboles durante las últimas cinco décadas. Los primeros estudios sobre la vegetación fueron realizados por Potter (1969) y Schaerer (1972) en el terreno de avalanchas del Rogers Pass en la Columbia Británica, Canadá. Durante mucho tiempo, el análisis basado en anillos de árboles de las actividades de avalanchas de nieve se aplicó en América del Norte, principalmente en las Montañas Rocosas de Colorado (Ives *et al.*, 1976; Carrara, 1979) y en el Parque Nacional Glacier (Butler, 1979, 1985); asimismo hay una serie de artículos sobre registros de avalanchas de nieve basados en anillos de árboles y en las Montañas Rocosas canadienses (Frazer, 1986; McCarthy, 1985; Luckman y Frazer, 2001).

Los estudios actuales todavía están interesados en reconstruir eventos, pero ahora incluyen enfoques multidisciplinarios. Por ejemplo, Mainieri *et al.*, (2020) evaluaron la relación entre el cambio de uso de la tierra en la cobertura terrestre y la actividad de avalanchas de nieve. Identificaron que el éxodo rural y la disminución de las prácticas pastorales durante los siglos XIX y XX son las principales explicaciones de las tendencias observadas en la actividad del proceso. Adicionalmente, identificaron la necesidad de aclarar las complejas interrelaciones entre la evolución de los bosques, el calentamiento global, las prácticas sociales y la propia actividad del proceso al interpretar las tendencias en los movimientos de masas en las laderas. Oller *et al.*, (2020) aplicaron un enfoque multidisciplinario que se llevó a cabo mediante la búsqueda histórica de fuentes y bases de datos, revisión de imágenes aéreas, relevamiento del sitio para inspección de terreno y vegetación, uso de análisis dendrogeomorfológicos y entrevistas a la población local, para finalmente aplicar simulaciones computacionales SAMOS-AT y el modelo estadístico α - β . La investigación se realizó en la Aldea de Àrreu en 1803, Pirineo catalán, España. Las simulaciones indican que una sola avalancha sería suficiente para provocar una catástrofe en el pueblo ubicado en la base de la montaña, y viajaría 1 km más abajo, llegando finalmente al valle principal.

Hasta principios de este siglo, se realizaron pocos estudios utilizando análisis de anillos de árboles y desprendimiento de rocas. Los primeros estudios de las interacciones roca-árbol se centraron en la identificación y datación de grandes avalanchas de rocas (Moore y Mathews, 1978; Butler *et al.*, 1986) más que en la reconstrucción de desprendimientos frecuente de rocas y bloques individuales (Stoeffel *et al.*, 2013). Probablemente Lafortune *et al.*, (1997) realizaron el primer análisis centrado en desprendimientos de rocas con el objetivo de evaluar las tasas de sedimentación y la dinámica del borde del bosque. Stoffel *et al.*, (2005b, 2005c) elaboraron los primeros estudios sobre la estacionalidad, frecuencia y patrones espaciales de los desprendimientos de rocas utilizando anillos de árboles; arrojaron datos sobre 400 años de actividad de desprendimiento de

rocas en una ladera boscosa de los Alpes suizos. Desde entonces, los métodos se han aplicado, proporcionando una base confiable para el análisis de los peligros de caída de rocas y la evaluación de la precisión de los modelos aplicados (Stoffel *et al.*, 2006b; Perret *et al.*, 2006; Schneuwly y Stoffel 2008a, 2008b). Posteriormente, Moya *et al.* (2010) presentaron varias estrategias de muestreo de árboles para la reconstrucción de cronologías completas de desprendimiento de rocas a partir de lesiones visibles en *Quercus robur* de Sola d'Andorra (Pirineos Orientales, España). Muestran que la frecuencia de caída de rocas no puede evaluarse directamente a partir de una cronología de lesiones visibles de árboles, ya que también requiere considerar la resolución de la datación y la magnitud de los eventos de caída de rocas.

Respecto a la relación entre desprendimientos de rocas y factores desencadenantes, Mainieri *et al.*, (2020a) estudiaron los factores meteorológicos en los Alpes franceses, e identificaron que las precipitaciones de verano y los eventos de lluvia mayores de 10 mm son los principales impulsores en Valdrôme, Francia. Por su parte, Stoffel *et al.*, (2020) analizaron la influencia de los terremotos moderados en la Cordillera Patagónica, Argentina; concluyeron que, en regiones donde la amplificación topográfica juega un papel, pequeños desprendimientos de rocas pueden ser provocados por terremotos de intensidad moderada (de magnitud 5 a 7 en la escala Richter) a grandes distancias del epicentro.

La actividad volcánica se ha detectado en los anillos de los árboles desde mediados del siglo pasado (Smiley, 1958; LaMarche y Hirschboeck, 1984; Yamaguchi y Hoblitt, 1995; Briffa *et al.*, 1998; Jacoby *et al.*, 1999), y todavía es un tema de investigación actual (Krakauer y Randerson, 2008; D'Arrigo *et al.*, 2013; Seiler *et al.*, 2017; Carlón *et al.*, 2020). Las erupciones volcánicas se pueden documentar en los anillos de los árboles por medio de:

1. Los efectos directos en los tallos de los árboles por la onda de choque, la caída de cenizas o los escombros de la erupción.
2. La mortalidad de los árboles en un sitio en particular.
3. Un enfriamiento global producto de la inyección de gases y aerosoles a la atmósfera (Speer, 2010).

Varios estudios clave han relacionado a los árboles con erupciones volcánicas notables, dicha actividad puede tener impactos significativos tanto a nivel local como hemisférico a través de sus impactos mecánicos y meteorológicos (Battipaglia *et al.*, 2007; Legrande *et al.*, 2016; Löffler *et al.*, 2016). Carlón *et al.*, (2020) analizaron el efecto de la erupción volcánica del Tacaná (1855/1856) y evaluaron las consecuencias de la caída de ceniza de Santa María, en 1902, sobre el crecimiento radial de los árboles cercanos al volcán Tacaná. Identificaron que la cronología del ancho de anillo muestra dos eventos de supresión

estadísticamente significativos; uno de ellos ocurrió entre 1857 y 1868 y podría haber sido causado por la erupción histórica del Tacaná (1855/1856). La segunda supresión ocurrió entre 1903 y 1908, cuando el crecimiento de los árboles se vio afectado después de 1 año de la Caída de cenizas del Volcán Santa María (1902) (Figuras 16 y 17). Estos resultados pueden contribuir a la evaluación de los riesgos asociados a la actividad volcánica del Volcán Tacaná.

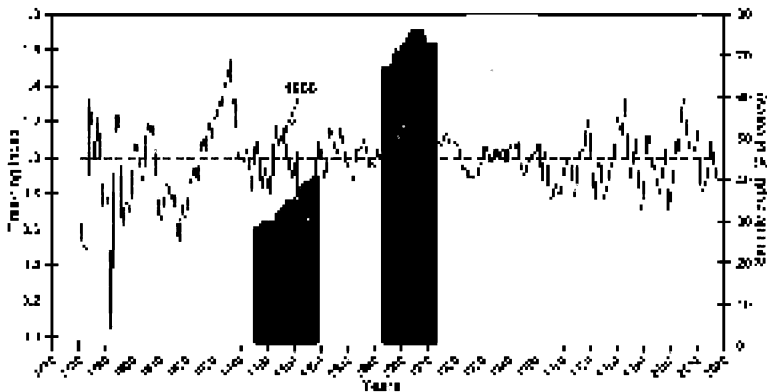


Figura 16. Cronología estandarizada del ancho de anillo versus tamaño de la muestra (número de núcleos) de *P. hartwegii* del Volcán Tacaná, los recuadros grises verticales indican años antes y después de 1856 y 1902, también se muestra la supresión en el crecimiento del anillo de árboles de 1903 (Carlón *et al.*, 2020).



Figura 17. Características comunes de los anillos de crecimiento de *P. hartwegii* del Volcán Tacaná de 1856 (a y b) y 1903 (c y d). Las muestras dendrocronológicas tienen una resolución temporal de 221 (a) y 177 años (c), la corteza de ambas muestras está en el lado derecho, a) y c) incluyen secuencias de anillos anteriores y posteriores a 1855 y 1902. Se observa una clara supresión del crecimiento es observado después de los años 1902 y 1856 (Carlón *et al.*, 2020).

La edad arbórea guarda una débil relación con el tamaño; los árboles más viejos con frecuencia suprimen el crecimiento temprano cerca de la médula y, en consecuencia, se ven superados en crecimiento por individuos más jóvenes y fuertes. Se pueden encontrar fácilmente en sitios con vegetación escasa cuyos intervalos de ecesis son más largos que los sitios más boscosos; por lo tanto, se deben muestrear más árboles para encontrar al más longevo. Pero las edades siempre tienen estimaciones de error de uno o más decenios debido a la variabilidad de la ecesis, y deben tratarse como datos aproximados de referencia. Se pueden derivar estimaciones más precisas y resueltas anualmente a partir de árboles dañados o muertos en el margen de un glaciar o durante la formación de la morrena externa (Luckman, 1988, 2006). Cuando los árboles están muertos, los datos deben tener una fecha cruzada con una cronología de referencia adecuada (Stoffel *et al.*, 2013).

Estudios recientes han reconstruido, a partir de anillos de árboles y las variables de precipitación y temperatura, series de balance de masa de glaciares de varios siglos de duración que pueden compararse con la datación de morrenas basada en métodos más tradicionales (Nicolussi y Patzelt, 1996; Lewis y Smith, 2004; Watson y Luckman, 2004). Afortunadamente, se han realizado investigaciones más recientes fuera de Europa y América del Norte (por ejemplo, China y Argentina).

DIRECCIONES FUTURAS

Si bien la dendrogeomorfología es una disciplina joven, la información que genera permite comprender mejor la dinámica espacial y temporal de los eventos geomorfológicos y, en consecuencia, sobre sus efectos en los ecosistemas y la sociedad. El estudio de procesos en entornos nuevos, junto con la ampliación y mejora de los enfoques utilizados en la investigación de anillos de árboles, son de alta prioridad para reducir el riesgo de las amenazas naturales.

El desarrollo cronológico del comportamiento de los procesos es uno de los factores primordiales que posiblemente indique actividad geomórfica futura (Figura 18). Los enfoques dendrogeomórficos son métodos certeros de datación absoluta (Alestalo, 1971); además, su aprovechamiento para la detección retrospectiva de la activación geomórfica catastrófica parece ser preciso y rentable (Pánek *et al.*, 2011; Ballesteros *et al.*, 2015; Wistuba *et al.*, 2019; Šilhán, 2019).

Se requieren más estudios sobre el uso de árboles como sensores para la alerta temprana contra deslizamientos de tierra catastróficos (Ballesteros *et al.*, 2015; Wistuba *et al.*, 2019). Es menester que la investigación proporcione nuevos conocimientos para identificar indicadores críticos de alerta temprana, como los periodos de retorno de los eventos (Figura 19).

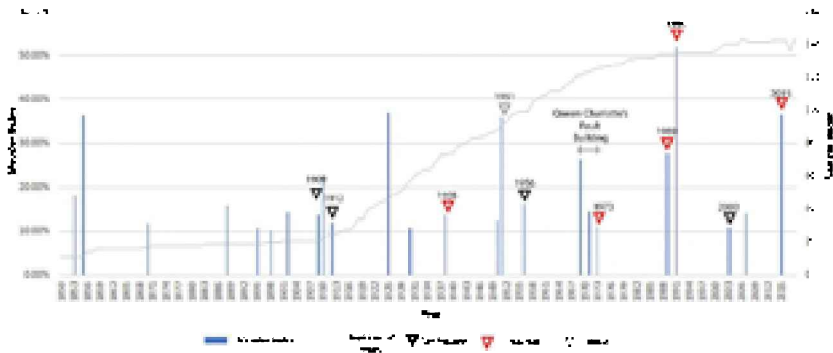


Figura 18. Cronología de eventos del escarpe norte del parque provincial Stawamus Chief, Squamish, Canadá. El índice Shroder se representa asociado con posibles factores desencadenantes.

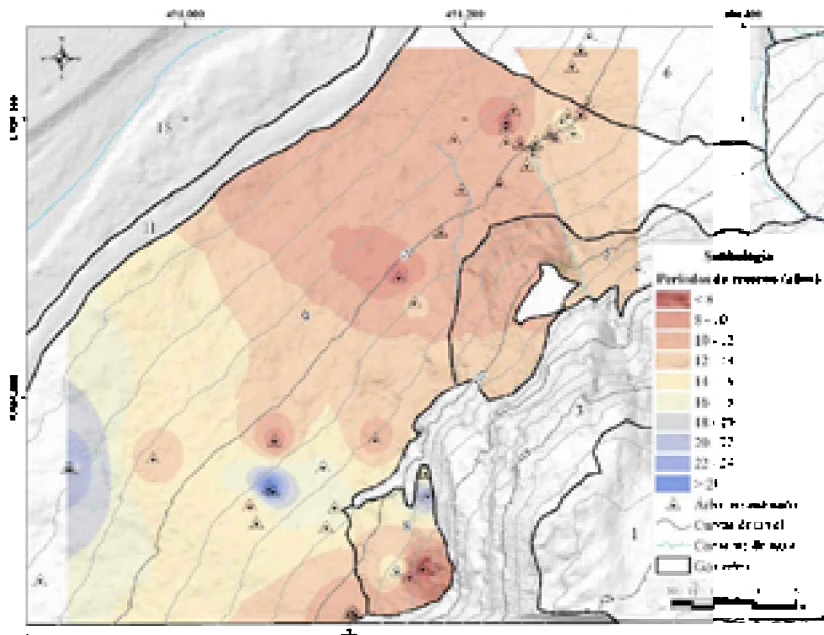


Figura 19. Períodos de retorno de GD para la masa forestal del escarpe norte del parque provincial Stawamus Chief, Squamish, Canadá. Los intervalos designan el número de años que transcurren entre dos alteraciones del crecimiento reconstruidas en un árbol.

Adicionalmente, la reconstrucción dendrocronológica de los patrones de regeneración de los bosques naturales ha llevado a determinar las tasas de expansión forestal que se pueden utilizar para modelar escenarios futuros y refinar los cambios de la morfología de los ríos. La dendrocronología mejoró considerablemente los resultados del análisis de

imágenes de satélite y modelamiento espacial en sistemas de información geográfica. Estas reconstrucciones son particularmente importantes para las áreas que están más expuestas al peligro directo de avalanchas, flujos de escombros e inundaciones con el fin de prevenir las consecuencias de tales fenómenos ante un escenario de cambio climático (Ciolli *et al.*, 2017). Por lo tanto, es importante que se realicen más investigaciones dendrogeomorfológicas, especialmente, en América Central y del Sur, el subcontinente indio, África, Europa del Norte y del Este y Rusia, donde se ha realizado una investigación básica limitada. Pero también, en todo el mundo donde las personas, los recursos naturales y la infraestructura están expuestos a procesos geomórficos que se han convertido en eventos peligrosos (inundaciones y deslizamientos de tierra) en el pasado reciente. La investigación mencionada demuestra el uso potencial y la necesidad de expandir y mejorar los métodos dendrogeomorfológicos para cartografiar y comprender el patrón espacio-temporal de los procesos geomórficos en todo el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Manuel Eduardo Mendoza agradece al proyecto PAPIIT-UNAM y a Texas A&M University por la Halbouty visiting professor chair; nuestro sincero agradecimiento a Craig Walsh del distrito de Squamish por proporcionar la nube de puntos de LIDAR; igualmente a Antonio Navarrete, CIGA-UNAM, por el procesamiento de la nube de puntos LIDAR y Alejandro Carrera por la elaboración de los mapas finales.

REFERENCIAS

- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia-International Journal of Geography*. 105: 1-139.
- Allen, R., Bellingham, P., Wiser, S. (1999). Immediate damage by an earthquake to a temperate montane forest. *Ecology* 80, 708-714. DOI: 10.1890/0012-9658(1999)080[0708:IDBAET]2.0.CO;2
- Aulitzky, H. (1992). Die Sprache der "Stummen Zeugen". International Conference Interpraevent 1992, pp 139-174.
- Ballesteros-Cánovas, J.A., Stoffel, M., Benito, G., Rohrer, M., Barriopedro, D., García-Herrera, R., Beniston, M., y Brönnimann, S. (2019). On the extraordinary winter flood episode over the North Atlantic Basin in 1936. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1436 (1) Special Issue: Climate Sciences: 206-216. <https://doi.org/10.1111/nyas.13911>

- Ballesteros-Canovas, J.A., Stoffel, M., Bodoque, J.M., Bollschweiler, M., Hitz, O. and Díez-Herrero, A. (2010). Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. Following wounding by flash floods. *Tree-Ring Research*. 66(2): 93–103. <http://dx.doi.org/10.3959/2009-4.1>
- Ballesteros-Cánovas, J.A., Stoffel, M., St George, S. y Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39 (6): 794–816. <https://doi.org/10.1177/0309133315608758>
- Bannan, M.W. (1936). Vertical resin ducts in the secondary wood of the Abietineae. *New Phytol* 35 (1):11–46. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1936.tb06864.x>
- Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Martín-Duquea, J. F., Rubiales, J.M., Godfrey, A., Pedraza, J., Carrasco, R. M., y Sanz, M. A. (2006). Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena*, 64: 81–102 DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.002
- Bollschweiler, M. (2007). Spatial and temporal occurrence of past debris flows in the Valais Alps – results from tree-ring analysis. PhD thesis No. 1572. University of Fribourg. *GeoFocus* 20:1–182.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Schneuwly, D.M. y Bourqui, K. (2008). Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiol* 28(2):255–263. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.2.255>
- Braam, R. R., Weiss, E. E. J., y Burrough, A. (1987a). Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena*: 14, 573–584. DOI: 10.1016/0341-8162(87)90007-5
- Braam, R. R., Weiss, E. E. J., and Burrough, A. (1987b). Dendrogeomorphological analysis of mass movement: A technical note on the research method. *Catena* 14: 585–589. DOI: 10.1016/0341-8162(87)90008-7
- Butler, D. (2013). The field tradition in mountain geomorphology. *Geomorphology* 200: 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.021>
- Butler, D. y M. Stoffel (2013). John F. Shroder, Jr.'s 1978 and 1980 papers on dendrogeomorphology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 37(5): 717-721. <https://doi.org/10.1177/0309133313501107>
- Butler, D.R. and Malanson G.P. (1985). A history of high-magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, USA. *Mountain Research and Development* 5:175–182
- Butler, D.R., (1979). Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research* 11, 17–32.
- Butler, D.R., (1985). Vegetational and geomorphic change on snow avalanche paths, Glacier National Park. *Great Basin Naturalist* 45, 313–317.
- Butler, D.R., Sawyer, C.F. y Maas, J.A. (2010). An examination of the presence of traumatic resin ducts in annual tree rings of two species affected by snow avalanches in

- Glacier National Park, Montana, USA. In: Stoffel M, Bollschweiler M, Butler DR, Luckman BH [Eds.]. *Tree rings and natural hazards: A state-of-the-art*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, this volume.
- Carlón Allende, T., Macías, J.L., Mendoza, M.E. y Villanueva Díaz, J. (2020). Evidence of volcanic activity in the growth rings of trees in the Tacaná Volcano, Mexico-Guatemala. *Canadian Journal of Forest Research* 50: 52-72. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0214
- Carrara, P. E. y Carroll, T. R. (1979). The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado, *Earth Surf Process.*, 4: 307-317
- Casteller, A., Stöckli, V., Villalba, R. y Mayer, A.C. (2007). An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 39(2):218-228. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2007\)39\[218:AEODIO\]2.O.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2007)39[218:AEODIO]2.O.CO;2)
- Chalupová, O., Šilhán, K., Kapustová, V., Chalupa, V. (2020). Spatiotemporal distribution of growth releases and suppressions along a landslide body. *Dendrochronologia*. 60. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125676>
- Ciulli, M., Bezzi, M., Comunello, G. Laitempergher G., Gobbi, S., Tattoni C. y Cantiani, M.G. (2019). Integrating dendrochronology and geomatics to monitor natural hazards and landscape changes. *Applied Geomatics*. 11: 39-52. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0236-0>
- Clague, J.J. y Souther, J.G. (1982). The Dusty Creek landslide on Mount Cayley, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 19(3):524-539. <https://doi.org/10.1139/e82-043>
- Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A. [Eds.]. (1990). *Methods of dendrochronology— Applications in the environmental sciences*. Kluwer, London. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>
- Corona, C., Lopez-Saez, J. y Stoffel, M., (2014). Defining optimal sample size, sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstructions. *Quaternary Geochronology* 22: 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2014.02.006>
- Corona, C., Lopez-Saez, J., Stoffel, M., Bonnefoy, M., Richard, D., Astrade, L. y Berger, F. (2012). How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives. *Cold Regions Science and Technology* 74-75: 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.01.003>
- Dorren L.K.A. y Berger, F. (2006). Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree Physiology* 268(1): 63-71
- Douglass, A.E. (1941). Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry*. 39(10):825-831. <https://doi.org/10.1093/jof/39.10.825>

- Du, S. y Yamamoto, F. (2007). An overview of the biology of reaction wood Formation. *Journal of Integrative Plant Biology*. 49(2):131–143. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00427.x>
- Fantucci, R. y Sorriso-Valvo, M. (1999). Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). *Geomorphology*, 30(1-2): 165–174. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00052-5)
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M. y Vázquez-Selem, L. (2017). Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. *Geomorphology* 290(1).142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.003>
- Fritts, H.C. (1976). Tree rings and climate. Academic Press, London, UK.
- Giardino, J.R., Shroder Jr, J.F. y Lawson, M.P. (1984). Tree-Ring Analysis of Movement of a Rock-Glacier Complex on Mount Mestas, Colorado, U.S.A., *Arctic and Alpine Research*, 16 (3): 299-309. <https://doi.org/10.1080/00040851.1984.12004419>
- Gómez Castillo, G., Mendoza, M.E., Macias, J.L. y Vargas Rodríguez, N. (2020). Detailed geomorphology of mass movement processes in the El Estribo volcanic complex, Pátzcuaro, Michoacán, Mexico. *Journal of Maps* DOI: 10.1080/17445647.2020.1782784
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. y Reichenbach, P. (1999), Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. *Geomorphology*. 31 (1-4), 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Hitz, O. M., Gärtner, H., Heinrich, I., y Monbaron, M. (2008) Application of Ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents,
- Hosseinzadeh, M.M., Beyranvand, M.S. & Esmaili, R. (2020). Analysis of channel bank erosion rate using exposed roots of trees: a case study of lavij stream, northern Alborz Mountains, Iran. *Journal of Mountain Science*.17:1096–1105. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5558-9>
- Kaczka, R.J., Deslauriers, A. y Morin, H. (2010). High-precision dating of debris-flow events within the growing season. In: Stoffel M, Bollschweiler M, Butler DR, Koch, J., (2009). Improving age estimates for late Holocene glacial landforms using dendrochronology – some examples from Garibaldi Provincial Park, British Columbia. *Quaternary Geochronology* 4, 130–139. DOI: 10.1016/j.quageo.2008.11.002
- LaMarche, V. C. jr. (1968). Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California. US Geological Survey. *Professional paper* 352-I: 341-377. <https://doi.org/10.3133/pp352I>
- Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L. and Dikau, R. (1999). Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*. 30(1-2):33–52. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00043-4)
- Larson, P.R. (1994). The vascular cambium. Development and Structure. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-78466-8>

- Lopez-Saez, J., Corona, C., Stoffel, M., Astrade, L., Berger, F. y Malet, J.P. (2012). Dendrogeomorphic reconstruction of past landslide reactivation with seasonal precision: the Bois Noir landslide, southeast French Alps. *Landslides* 9: 189–203. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0284-6>
- Luchi, N., Ma, R., Capretti, P. y Bonello, P. (2005). Systemic induction of traumatic resin ducts and resin flow in Austrian pine by wounding and inoculation with *Sphaeropsis sapinea* and *Diplodia scrobiculata*. *Planta* 221(1):75–84. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1414-3>
- Lugon, R. y Stoffel, M. (2010). Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*. 73(3-4): 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.004>
- Lundström, T., Heiz, U., Stoffel, M., y Stöckli, V. (2007). Fresh-wood bending: linking the mechanic and growth properties of a Norway spruce stem. *Tree Physiol.*, 27, 1229–1241, 2007. DOI: 10.1093/treephys/27.9.1229
- Lundström, T., Jonsson, M.J., Volkwein, A. y Stoffel, M. (2009). Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: A detailed assessment using a new experimental method. *Tree Physiology* 29(3): 345–359. DOI: 10.1093/treephys/tpn030
- Lundström, T., Stoffel, M., and Stöckli, V. (2008). Fresh-stem bending of fir and spruce, *Tree Physiol.*, 28, 355–366. DOI: 10.1093/treephys/28.3.355
- Mainieri, R., Corona, C., Charatoire, J., Eckert, N., Lopez Saez, J., Stoffel, M., and Bourrier, F. (2020a). Dating of rockfall damage in trees yields insights into meteorological triggers of process activity in the French Alps. *Earth Surface Processes and Landforms* 45 (10): 2235–2250. <https://doi.org/10.1002/esp.4876>
- Mainieri, R., Favillier, A., Lopez-Saez, J., Eckert, N., Zgheib, T., Morel, P., Saulnier, M., Peiry, J.L., Stoffel, M. y Corona, C. (2020b). Impacts of land-cover changes on snow avalanche activity in the French Alps. *Anthropocene* 30:100244. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100244>
- Marin P. y Filion, L. (1992). Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research* 38 (3): 316–330 DOI: 10.1016/0033-5894(92)90041-G
- Mattheck, C. (1993). *Design in der Natur*. Rombach Wissenschaft, Freiburg.
- McAuliffe, J. R., Scuderi, L. A. and McFadden, L. D. (2006) Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: Landscape responses to climate variation during the last 400yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Glob. Planet. Change*, 50, 184–201 DOI: 10.1016/j.gloplacha.2005.12.003
- McCarthy, D.P., Luckman, B.H., (1993). Estimating ecesis for tree-ring dating of moraines – a comparative study from the Canadian Cordillera. *Arctic and Alpine Research* 25, 63–68.

- Oller P., Fischer J.T. y Muntán, E. (2020). The Historic Avalanche that Destroyed the Village of Àrreu in 1803, Catalan Pyrenees. *Geosciences*. 10(5), 169. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050169>
- Osterkamp, W.R., Hupp, C.R. y Stoffel, M. (2012). The interactions between vegetation and erosion: New directions for research at the interface of ecology and geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 37(1):23-36 DOI: 10.1002/esp.2173
- Oven, D., Levanič, T., Jež, J. y Kobal, M. (2019). Reconstruction of Landslide Activity Using Dendrogeomorphological Analysis in the Karavanke Mountains in nw Slovenia. *Forests*, 10 (11), 1009. <https://doi.org/10.3390/f10111009>
- Pánek, T., Šilhán, K., Tábořík, P., Hradecký, J., Smolková, V., Lenart, J., Brázdil, R., Kašičková, L. y Pazdur, A. (2011). Catastrophic slope failure and its proceedings: case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic). *Geomorphology* 130(3-4):352– 364. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.020>
- Paolini, L., Villalba, R. y Grau, H.R. (2005). Precipitation variability and landslide occurrence in a subtropical mountain ecosystem of nw Argentina. *Dendrochronologia*. 22(3):175–180. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.06.001>
- Papadopoulos, A.M., Mertzanis, A. y Pantera, A. (2007). Dendrogeomorphological observations in a landslide on Tymfristos mountain in Central Greece. In: Stokes, A., Spanos, I., Norris, J.E. and Cammeraat, E. [Eds.]. *Eco- and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 223–230. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5593-5_21
- Phillips, M.A. y Croteau, R.B. (1999). Resin-based defenses in conifers. *Trends Plant Science*. 4(5):184–190. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(99\)01401-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(99)01401-6)
- Pierson, T.C., (2007). Dating young geomorphic surfaces using age of colonizing Douglas fir in southwestern Washington and northwestern Oregon. USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 811–831. DOI: 10.1002/esp.1445
- Pilate, G., Chabbert, B., Cathala, B., Yoshinaga, A., Leplé, J.C., Laurans, F., Lapierre, C., Ruel, K. (2004). Lignification and tension wood. *Comptes Rendus Biologies*. 327(9-10):889–901. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2004.07.006>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C. y Stoffel, M. (2020). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology* 359: 107133. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>
- Ruel, J.J., Ayres, M.P. y Lorio, P.L. (1998). Loblolly pine responds to mechanical wounding with increased resin flow. *Canadian Journal Forest Research*. 28:596–602. <https://doi.org/10.1139/x98-030>
- Sachs, T. (1991). *Pattern formation in plant tissue*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511574535>

- Schneuwly, D.M., Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2009a). Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts. *Tree Physiology*. 29(2):281–289. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpno26>
- Schneuwly, D.M., Stoffel, M., Dorren, L.K.A. y Berger, F. (2009b). Three-dimensional analysis of the anatomical growth response of European conifers to mechanical disturbance. *Tree Physiology*. 29(10):1247–1257. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpo56>
- Schraml, K., Oismüller, M., Stoffel, M., Hübl, J. y Kaitna, R. (2015). Debris-flow activity in five adjacent gullies in a limestone mountain range. *Geochronometria* 42(1):60–66. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0007>
- Schweingruber, F., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., Bräker, O.U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8:9–39.
- Schweingruber, F.H. (1983). Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der *Dendrochronologie*. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Schweingruber, F.H. (1996). Tree rings and environment. Dendroecology. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Schweingruber, F.H. (2001). Dendroökologische Holz Anatomie. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Shigo, A.L. (1984). Compartmentalization—A conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Annual Review of Phytopathology*. 22:189–214.
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9(2): 168–185. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0)
- Sigafoos, R.H., Hendricks, E.L., (1969). The time interval between stabilization of alpine glacial deposits and establishment of tree seedlings. US Geological Survey Professional Paper 650B. US Geological Survey, Alexandria, VA, pp. B89–B93.
- Šilhán, K., Tichavský, R., Fabiánová, A., Chalupa, V., Chalupová, O., Škarpich V. y Tolasz, R. (2019). Understanding complex slope deformation through tree-ring analyses. *Science of the Total Environment*. 665: 1083–1094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.195>
- Šilhán, K. (2019). Tree-ring eccentricity in the dendrogeomorphic analysis of landslides – A comparative study. *Catena*. 174: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.002>
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J. and Stoffel, M. (2015). Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: examples from a regional dendrogeomorphic

- construction in the Crimean Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*. 40(2):243–251. <https://doi.org/10.1002/esp.3623>
- Šilhán, S. y Stoffel, M. (2015). Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology* 236:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.003>
- Solomina, O.N. (2002). Dendrogeomorphology: research requirements. *Dendrochronologia*. 20(1-2):233–245. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00019>
- Speer, J.H. (2010). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.8:187–202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2009). What tree rings can tell about earth-surface processes. Teaching the principles of dendrogeomorphology. *Geography Compass*. 3(3):1013–1037. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00223.x>
- Stoffel, M. y Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-ring research*. 70(1):3-20. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Stoffel, M. y Hitz, O.M. (2008). Rockfall and snow avalanche impacts leave different anatomical signatures in tree rings of *Larix decidua*. *Tree Physiology*. 28(11):1713–1720. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.11.1713>.
- Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas, J.A., Luckman, B.H., Casteller, A. y Villalba, R. (2019). Tree-ring correlations suggest links between moderate earthquakes and distant rockfalls in the Patagonian Cordillera. *Scientific Reports* 9, 12112. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48530-5>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. y Beniston, M. (2011b). Rainfall characteristics for periglacial debris flows in the Swiss Alps: past incidences—potential future evolutions. *Climatic Change*. 105:263–280. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0036-6>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. y Hassler, G.R. (2006a). Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity — a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31(11):1424–1437. <https://doi.org/10.1002/esp.1363>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Leutwiler, A. y Aeby, P. (2008b). Large debris-flow events and overbank sedimentation in the Illgraben torrent (Valais Alps, Switzerland). *The Open Geology Journal* 2 (1):18–29. <https://doi.org/10.2174/1874262900802010018>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Widmer, S. and Sorg, A. (2010). Spatio-temporal variability in debris-flow activity: a tree-ring study at Geisstriftbach (Swiss Alps) extending back to AD 1736. *Swiss Journal of Geosciences*. 103:283–292. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0014-4>

- Stoffel, M., Conus, D., Grichting, M., Lièvre, I. y Maître, G. (2008a). Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change*. 60(3-4):222–234. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.001>
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W. y Monbaron, M. (2005a). 400 years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37(3):387–395. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0387:YODAAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0387:YODAAT]2.0.CO;2)
- Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M. y Perret, S. (2005b). Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps) - a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 49:89–106.
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M. y Monbaron, M., (2005c). Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 68:224–241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.017>
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., Perret, S. and Kienholz, H. (2006b). Quantifying the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *Forest Ecology and Management*. 225(1-3):113–122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.030>
- Stoffel, M., Wilford D.J., (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation: Disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface Processes and Landforms* 37(1): 9-22 DOI: 10.1002/esp.2163
- Stoffel, M., Gärtner, H., Lièvre, I., Monbaron, M. (2003). Comparison of reconstructed debris-flow event years (Ritigraben, Switzerland) and existing flooding data in neighboring rivers. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings Volume 1: 243-253; Davos; Switzerland.*
- Stokes, M.A. y Smiley, T.L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago
- Strunk, H. (1989). Dendrogeomorphology of debris flows. *Dendrochronologia*. 7:15–25.
- Strunk, H. (1991). Frequency distribution of debris flow in the Alps since the “Little Ice Age”. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* 83: 71–81.
- Strunk, H. (1995). *Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung*. Roderer, Regensburg
- Strunk, H. (1997). Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 3181-2):137–151. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00031-3)

- Tichavský, R., Kluzová, O. y Šilhán, K. (2019). Differences between the responses of *European larch* (*Larix decidua* Mill.) and *Norway spruce* (*Picea abies* (L.) Karst) to landslide activity based on dendrogeomorphic and dendrometric data. *Geomorphology*. 330: 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.013>
- Timell, T.E. (1986). *Compression wood in Gymnosperms*. Springer, Berlin
- Vittoz, P., Stewart, G., Duncan, R., (2001). Earthquake impacts in old-growth *Nothofagus* forests in New Zealand. *Journal of Vegetation Science* 12, 417–426 DOI: 10.2307/3236856
- von Storch, H. y Navarra, A. [Eds.]. (1995). *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*. Springer, Berlin.
- Westing, A.H. (1965). Formation and function of compression wood in gymnosperms II. *The Botanical Review*. 34:51–78. <https://doi.org/10.1007/BF02858621>
- Winter, L.E., Brubaker, L.B., Franklin, J.F., Miller, E.A., DeWitt, D.Q., (2002). Initiation of an old-growth Douglas-fir stand in the Pacific Northwest: a reconstruction from tree-ring records. *Canadian Journal of Forest Research* 32, 1039–1056. DOI: 10.1139/x02-031
- Wolman, M.G. y Miller, J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*. 68(1):54–74.
- Zaginaev, V., Petrakov, D., Erokhin, S. Meleshko, A., Stoffel, M. y Ballesteros-Cánovas, J.A. (2019). Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan. *Global and Planetary Change*. 176: 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.003>

María Isabel Hernández Sánchez¹
Ana Cecilia Travieso Bello²

¹El Colegio de Veracruz

²Universidad Veracruzana

6

CAPÍTULO

DESARROLLO DE CAPACIDADES PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL SECTOR CAFETALERO

RESUMEN

El cambio climático es uno de los mayores desafíos para la humanidad en el siglo XXI. Este fenómeno es generalizado, rápido y se está intensificando. Para los próximos 20 años se prevé que la temperatura mundial alcance un calentamiento de 1,5 °C, situación que representa una amenaza a la dinámica territorial de los sistemas socioecológicos, entre ellos el cafetalero. A consecuencia de ello cambiarán las condiciones óptimas para la producción de café, por lo que se espera una reducción de la aptitud climática de las actuales áreas de producción. Por tanto, la reducción de los impactos y la vulnerabilidad del cambio climático es un gran reto para los productores, dado que requieren implementar medidas de adaptación efectivas a nivel local. En este contexto, el objetivo del presente estudio es analizar el desarrollo de estrategias para la adaptación al cambio climático en el sector cafetalero mediante una revisión de la literatura. A pesar de que existen barreras que limitan la adaptación, se encontró que los productores de café están adecuando, los productores de café están adoptando medidas tales como: variedades tolerantes a plagas y enfermedades, diversificación del cultivo, prácticas de conservación de suelo y manejo de sombra, entre otras. Además, las organizaciones de productores juegan un papel importante para el desarrollo y fortalecimiento de capacidades para la adaptación. Se concluye que la colaboración de todos los actores de la cadena productiva del café, el gobierno y las organizaciones civiles son fundamentales para superar las barreras de la adaptación y desarrollar capacidades.

Palabras clave: adaptación, cafecultura, cambio climático, capacidades, vulnerabilidad.

ABSTRACT

Climate change is one of the greatest challenges for humanity in the 21st century. This phenomenon is widespread, rapid and intensifying. Over the next 20 years it is predicted that the average global temperature will reach a warming of 1.5 °C, a situation that represents a threat to the territorial dynamics of social-ecological systems, including coffee production. Optimal conditions for coffee production will change, and a reduction in the climatic suitability of current production areas is expected. Therefore, reducing the impacts and vulnerability of climate change is a major challenge for producers, as they need to implement effective adaptation measures at the local level. In

this context, the objective of this study is to analyze the development of capacities for adaptation to climate change in the coffee sector through a literature review. It was found that, despite the existence of barriers that limit adaptation, coffee producers are adopting measures such as: pest and disease tolerant varieties, crop diversification, soil conservation practices and shade management, among others. In addition, producer organizations play an important role in developing and strengthening capacities for adaptation. It is concluded that the collaboration of all the actors in the coffee production chain, the government and civil organizations are fundamental to overcome the barriers to adaptation and develop capacities.

Keywords: adaptation, coffee farming, climate change, capacities, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

El café es uno de los principales productos agrícolas que se comercializan en los mercados internacionales y proporciona un medio de vida a 25 millones de familias productoras en el mundo (Organización Internacional del Café, 2019). En México, su cultivo ocupa una superficie de 710 000 hectáreas, distribuida en 14 estados y 480 municipios, y es fuente de empleo de más de 500 000 productores (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017). Se cultiva en un gradiente de cinco sistemas de producción: rústico, policultivo tradicional, policultivo comercial, monocultivo semisombreado y monocultivo bajo sol. Los mencionados van de un mínimo a un máximo de manipulación y/o transformación del sistema ecológico, especialización y uso de insumos externos (Moguel y Toledo, 1999). Dos terceras partes de la superficie sembrada se manejan en sistemas tradicionales (rústico y policultivo tradicional), de 25 a 35 % en sistemas especializados de sombra (policultivo comercial y monocultivo semisombreado), y solamente 10 % bajo sol (Moguel y Toledo, 2004). El método rústico se ha mantenido en áreas marginadas, donde los productores conservan tradiciones indígenas. Los policultivos tradicionales y comerciales son manejados principalmente por pequeños fabricantes, mientras que los sistemas de monocultivo semisombreado y bajo sol, por medianos y grandes productores (Escamilla y Díaz, 2016).

Los agroecosistemas cafetaleros son importantes en términos de biodiversidad, pues albergan numerosas especies de plantas y animales (árboles, epífitas, mamíferos, aves, insectos y reptiles) (Moguel y Toledo, 1999), y son proveedores de importantes servicios ecosistémicos como captura de carbono, conservación del suelo, refugio y hábitat para la biodiversidad, fijación de nitrógeno, regulación del microclima, captación y purifi-

cación de agua, polinización, fertilidad y conservación del suelo, control biológico, protección contra inundaciones, sequías y deslaves, belleza escénica, recreación, conservación de la cultura y resguardo de recursos genéticos (Soto, 2007; Williams Linera *et al.*, 2007; Manson *et al.*, 2008).

Los sistemas cafetaleros son socioecológicos, es decir, “sistemas complejos, dinámicos e integrados por condiciones naturales e interacciones entre personas que se encuentran en constante proceso de adaptación, aprendizaje y autoorganización” (Godoy *et al.*, 2019, p. 44). La cafeticultura mexicana, como sistema de tal carácter, ha experimentado crisis recurrentes ocasionadas por factores sociales, económicos y ambientales; por tanto, los cafeticultores han desarrollado estrategias organizativas y tecnológicas para enfrentarlas (Venegas *et al.*, 2020).

El cambio climático es otro desafío para la cafeticultura, porque el cultivo de café es sensible a cambios de temperatura y precipitación, así como a eventos climáticos extremos (Hernández Sánchez y Travieso Bello, 2021). Diversos estudios refieren que el cambio climático reducirá el área apta para el cultivo de café en las actuales regiones productoras (Läderach *et al.*, 2010; Davis *et al.*, 2012; Bunn *et al.*, 2015; Ovalle Rivera *et al.*, 2015). La reducción de las áreas aptas para la producción podría conducir a mayores fluctuaciones en la oferta, especialmente para los cafés de alta calidad o marcas con denominación de origen y, en consecuencia, a una volatilidad de los precios (Hagggar y Schepp, 2012; Verburg *et al.*, 2019). El cambio climático representa una amenaza tanto para los cafeticultores como para todos los actores involucrados en la industria del café (Dufera, 2017). El principal desafío es la construcción de conocimientos, incentivos y capacidades dentro de las organizaciones e instituciones, que en conjunto favorezcan la gestión adaptativa de este sistema socioecológico a nivel local, regional y global (Folke, 2006).

El fomento y desarrollo de la capacidad adaptativa del sector cafetalero es indispensable para incrementar su resiliencia, reducir su vulnerabilidad y contribuir a la sustentabilidad. En este contexto, el objetivo de este artículo es analizar el desarrollo de capacidades para la adaptación al cambio climático en el sector cafetalero mediante una revisión de la literatura. Se organiza de la siguiente manera: en la sección *Vulnerabilidad, adaptación, capacidad adaptativa y desarrollo de capacidades* se examinan los conceptos de vulnerabilidad, adaptación al cambio climático, capacidad adaptativa, resiliencia y su importancia en el desarrollo de capacidades para la reducción de la vulnerabilidad al cambio climático. En la sección *Impactos del cambio climático en la producción de café* se realiza una síntesis de las evidencias de los impactos del cambio climático en la producción de café. En *Medidas de adaptación y desarrollo de capacidades en el sector cafetalero* se presenta una revisión de las medidas de adaptación y el desarrollo de capacidades en el sector. Y finalmente, se presentan las *Conclusiones*.

VULNERABILIDAD, ADAPTACIÓN, CAPACIDAD ADAPTATIVA Y DESARROLLO DE CAPACIDADES

Las sociedades se han adaptado a una variedad de estímulos, entre estos, el clima. Sin embargo, el cambio climático plantea nuevos riesgos que ponen en contingencia los medios de subsistencia, la biodiversidad, la salud —humana y de los ecosistemas—, infraestructura y los sistemas alimentarios (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático, 2019a).

La vulnerabilidad es el grado en que un sistema es incapaz de enfrentar los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad y los fenómenos extremos. Está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesta un sistema, su sensibilidad, y capacidad de adaptación (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001). Por su parte, la adaptación es el ajuste de un sistema para moderar los impactos del cambio climático, aprovechar las nuevas oportunidades o enfrentar las consecuencias (Adger *et al.*, 2003). Actualmente, es un tema central en la agenda climática mundial; en la Conferencia de Partes 16, los países introdujeron la adaptación como componente importante de la acción climática. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y el Acuerdo de París la reconocen como un desafío mundial.

Smith y Wandel (2006) sostienen que existen varios tipos de adaptación y pueden clasificarse de distintas maneras según el sistema (natural o humano), el tiempo de acción (reactivo, anticipatorio o concurrente), la intención (autónoma o planeada), el alcance espacial (local o extendido) y la forma (tecnológica, conductual, financiera, institucional e informativa). Se trata de manifestaciones de la capacidad adaptativa y representan formas de reducir la vulnerabilidad; no obstante, son específicas a cada situación y lugar: lo que funciona en una instancia o grupo quizás fracase en otro; por es necesario diseñar medidas de adaptación para cada caso específico (Smith y Pilifosova, 2003). En ese aspecto, las medidas de adaptación que ofrecen beneficios para el desarrollo en el corto plazo y reducen la vulnerabilidad o incrementan la resiliencia en el largo plazo son las más atractivas (Mimura *et al.*, 2014).

El éxito de la adaptación requiere el reconocimiento de una necesidad de cambio, el conocimiento de las opciones disponibles, la capacidad de evaluarlas y la habilidad de implementar la más adecuada (Smith y Pilifosova, 2003). Dicha necesidad se refiere a lo indispensable para implementar opciones que moderen los impactos. La priorización de las necesidades provee una base para seleccionar opciones de adaptación importantes, ya que no será posible implementar todas las opciones debido a las limitaciones de recursos y capacidades. Para tal fin, se requiere de información sobre los riesgos y las vulnerabilidades (Noble *et al.*, 2014).

Las opciones de adaptación incluyen una gama de acciones que se pueden organizar en tres categorías: físicas, sociales e institucionales. Las medidas físicas comprenden aspectos estructurales e ingenieriles, aplicación de tecnologías, uso de los ecosistemas y sus servicios para cubrir las necesidades de adaptación. El rubro social se refiere a recursos educativos, informativos y de comportamiento para reducir la vulnerabilidad, mientras que el área institucional considera instrumentos económicos, incentivos, regulaciones y políticas para promover la adaptación (Noble *et al.*, 2014).

Además, la falta de conocimiento y tecnología, la implementación de los métodos de adaptación puede verse afectada por barreras que es posible categorizar en: físicas, biológicas, económicas, financieras, de recursos humanos, socioculturales y de gobernanza e instituciones (Klein *et al.*, 2014; Magrin, 2015; Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2017), y se presentan a continuación:

- Físicas: la tasa y magnitud del cambio climático y las características del entorno local.
- Biológicas: la aptitud de los organismos para hacer frente al creciente estrés climático. Por ejemplo, la capacidad de aclimatación, el cambio de comportamiento y la velocidad de migración.
 - Económicas: la falta de acceso a los recursos monetarios y los medios de vida suficientes.
 - Financieras: el acceso al capital financiero puede restringir la implementación de medidas de adaptación.
- Recursos humanos: la falta de capacidades individuales, organizativas y sociales para la obtención de información, la adopción y el uso de tecnología, así como el liderazgo respecto a la priorización de políticas públicas.
 - Sociales y culturales: las normas sociales, la identidad, el apego a un lugar, los valores, las visiones del mundo y las creencias sobre la percepción del riesgo, la admisión de medidas de adaptación, la distribución de la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa de los diferentes miembros de la sociedad.
- Gobernanza e instituciones: la ausencia de coordinación entre los diversos integrantes de las redes de gobernanza, la centralización del gobierno y el poder, y la escasa información o capacidad profesional para seleccionar y aplicar las opciones de adaptación.

La base para el desarrollo de medidas de adaptación es la capacidad adaptativa (Speelman *et al.*, 2014), y se define como el potencial de un sistema para responder con éxito a la variabilidad, e incluye ajustes tanto en el comportamiento como los recursos y las tecnologías (Adger *et al.*, 2007). Dicho potencial contra los impactos del cambio climático es dinámico, pues puede mejorarse e incluso empeorarse (Pérez de Madrid,

2019); y los factores de los que depende son los recursos económicos, educación, tecnología, información, instituciones, infraestructura, capacidades de gestión, capital social y equidad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001; Smith y Pilifosova, 2003).

A través del desarrollo y fortalecimiento de la capacidad de adaptación se puede reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de las poblaciones y ecosistemas ante el cambio climático (Speelman *et al.*, 2014; Iza, 2019); la resiliencia se refiere a la “capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y mantener sus funciones, así como la de renovarse y reorganizarse” (Balvanera *et al.*, 2017, p. 142). En consecuencia, se puede contribuir a que los individuos, grupos y organizaciones dispongan de las habilidades, recursos, conocimientos, redes y mecanismos de orden para responder a los impactos del cambio climático (del Valle, 2022), aparte de asegurar el éxito de las medidas de adaptación (Levine y Encinas, 2007).

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ

El clima ha estado cambiando de manera natural a su propio ritmo desde el principio de los tiempos; no obstante, el ritmo de esa variación se ha acelerado (Kalra *et al.*, 2007). Las actividades humanas han provocado un calentamiento global de aproximadamente 1.0 °C con respecto a los niveles preindustriales y es probable que el incremento llegue a 1.5 °C entre 2030 y 2052 (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019b). Más aún, el acrecimiento de la temperatura ha provocado un aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías en algunas regiones y la intensidad de las precipitaciones fuertes a escala mundial (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019a).

Lo anterior representa una amenaza para la producción de café a nivel global: las condiciones óptimas para su producción se verán perturbadas, pues la distribución de las precipitaciones y la temperatura del aire interfieren en la fenología del cultivo y, por tanto, en la productividad y calidad (Haggar y Schepp, 2012). Las plantas de café son sensibles a los cambios en el clima. El rango de temperatura óptimo para el café de la variedad arábica es de 18 a 21 °C, la presencia de la sombra contribuye a mantenerlo fresco durante el día y más cálido durante la noche (Lin, 2007); por otro lado, arriba de 23 °C, el desarrollo y la maduración de las cerezas (frutos) se acelera. Respecto a las necesidades hídricas, los cultivos de café requieren suelos húmedos durante los periodos de crecimiento vegetativo y fructificación, y suelos más secos en los de maduración y cosecha (Haggar y Schepp, 2012).

La variabilidad climática ha sido uno de los factores responsables de la fluctuación de los rendimientos de café a nivel mundial; sin embargo, se espera que el cambio climático

genere modificaciones sobre dónde y cómo se producirá en el futuro (Kasterin *et al.*, 2010). Es probable que se produzcan cambios drásticos en las actuales regiones productoras; para 2050 Läderach *et al.* (2010) predicen una disminución del 32 % de las áreas con mayor aptitud para producir café de calidad (alto contenido de acidez) en las regiones cafetaleras del estado de Veracruz, México. Ovalle Rivera *et al.* (2015) pronostican una reducción de la aptitud climática para el cultivo de café arábigo en zonas bajas e incrementos en las zonas de mayor altitud. La región de Mesoamérica sería la más afectada con una disminución promedio del área apta de hasta el 30 %; las mayores pérdidas son para México (29 %) y las menores para Guatemala (19 %). A su vez, Bunn *et al.* (2015) estiman que el cambio climático reducirá el área global apta para el cultivo de café en aproximadamente un 50 % en todos los escenarios de emisiones. Brasil y Vietnam, los dos principales países productores en el mundo, podrían experimentar reducciones sustanciales del área idónea para el cultivo del grano; mientras que algunas regiones de África Oriental y Asia podrían volverse más adecuadas.

La modificación de las actuales zonas de cultivo impactará a los productores y potencialmente provocará que la producción migre a áreas que actualmente están cubiertas por bosque (Killen y Harper, 2016). Esta deforestación puede derivar en la pérdida de biodiversidad, aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, e impactos negativos sobre la disponibilidad de agua (Viguera *et al.*, 2017). En este sentido, Schroth *et al.* (2009) señalan que el cambio en las condiciones óptimas será menos favorable para la producción de café de calidad, y una menor rentabilidad puede obligar a los productores a abandonar el café de sombra y posiblemente a cambiar el uso de suelo, lo que conllevaría a una pérdida y fragmentación del sistema agroforestal.

Por otro lado, los cambios en temperatura y precipitación pueden favorecer la incidencia de plagas y enfermedades, amplían el rango altitudinal en el que sobreviven la broca del café (*Hypothenemus hampei*) y el hongo que causa la roya (*Hemileia vastatrix*) (Läderach *et al.*, 2011). El cambio climático ejercerá presión sobre la cadena de valor del café, y podría conducir a mayores fluctuaciones en el suministro del mismo y, en consecuencia, una volatilidad de los precios. Por tanto, si no se fortalece la capacidad adaptativa, hay una alta probabilidad de que ocurran alarmantes pérdidas económicas en la industria cafetalera.

Miles de pequeños agricultores dependen del café para obtener ingresos, y los probables impactos sociales en estas regiones son preocupantes, ya que la industria del café es un componente substancial de las economías locales. Por tanto, es necesario desarrollar e implementar medidas para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia del sistema socioecológico del café (Läderach *et al.*, 2011; Verburg *et al.*, 2019).

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y DESARROLLO DE CAPACIDADES EN EL SECTOR CAFETALERO

A lo largo de la historia, los sistemas naturales y socioeconómicos se han ido adaptando a los cambios climáticos. Los agricultores han adquirido conocimientos y experiencias que les han permitido acoplarse; en el caso del sistema socioecológico del café, son varios los estudios que demuestran que los productores están implementando un conjunto de medidas de adaptación. Por ejemplo, Frank *et al.* (2011) encontraron que productores chiapanecos adoptaron el cambio a variedades de café más resistentes a la sequía o al exceso de humedad, la diversificación del cultivo y económica, las prácticas de conservación de suelo (barreras vivas, terrazas y compostaje), los árboles de sombra y la formación de cooperativas que promueven la producción orgánica. En el caso de Turbay *et al.* (2014), se identificaron las estrategias implementadas por cafeticultores de dos cuencas andinas colombianas para enfrentar la variabilidad climática: renovación con variedades resistentes a roya, agroforestería, coberturas vegetales, uso de abonos orgánicos, asociación de cultivos, fertilización adecuada y prácticas culturales, agremiación, comercialización diferenciada y participación comunitaria principalmente. Sin embargo, aunque tales medidas contribuyen a generar resiliencia frente a los extremos climáticos, no están igualmente distribuidas entre los productores de una misma cuenca, ni entre las dos.

Ruiz (2015) encontró que los productores de café de la cuenca del río Huehetán, Chiapas, han intentado enfrentar los impactos de algunos eventos hidrometeorológicos extremos (lluvias intensas, vientos fuertes y sequías prolongadas) mediante la diversificación de las variedades (robusta y arábica), y la introducción de árboles con pluralidad frutal y comercial. Pero también comenzaron a migrar y a trabajar como jornaleros para variar sus fuentes de ingreso y que sus medios de vida sean más flexibles y estables. De ese modo han conseguido fortalecer sus habilidades para enfrentar, administrar y superar los riesgos de desastres relacionados con el clima en el corto plazo. Sin embargo, la autora enfatiza que se requieren medidas oportunas y eficientes que reduzcan su vulnerabilidad e incrementen su resiliencia.

En comunidades cafetaleras de Nicaragua y Guatemala, para alcanzar la sustentabilidad y la seguridad alimentaria, los productores han optado por el cambio de variedades de café tolerantes a roya, prácticas de conservación de suelos, manejo integrado de plagas, producción orgánica, manejo de sombra, cultivos alternos, uso óptimo del agua del beneficio, fertilización y venta de café en cereza. Además, las comunidades de Guatemala son más resilientes, pues tienen una estructura interna fuerte en comparación con las comunidades de Nicaragua, que dependen de los apoyos de organismos internacionales y gubernamentales (Bucardo *et al.*, 2016).

Nguyen y Nguyen (2019) reportan que la sequía ha afectado la producción de café del Altiplano Central de Vietnam, lo que ha provocado que la productividad disminuya en un 50 % y, por ende, se reduzcan los ingresos de los productores. Por ello los artesanos de café han tenido que desarrollar tácticas para enfrentar la escasez de agua; se clasifican en estrategias de afrontamiento y de adaptación. Entre las primeras, los autores identificaron principalmente la excavación de más pozos¹, la profundización de los mismos, la compra de agua para compartirla con familiares o vecinos y los cambios en los horarios de riego. Las segundas corresponden a la práctica de cultivos intercalados (pimienta y aguacate) en las plantaciones de café, la reducción de cafetos para introducir otros cultivos (yuca y maíz), la diversificación de los medios de vida y la implementación de técnicas para ahorro de agua en la producción. Con el objetivo de apoyar la transformación de los productores, los autores recomiendan asistencia técnica y financiera a corto y mediano plazo, cambios institucionales en la planeación del uso de suelo, inversión en planes de riego y reforestación a largo plazo.

Viguera *et al.* (2019) señalan que los pequeños productores de Costa Rica han comenzado a implementar acciones para enfrentar los impactos del cambio climático en sus sistemas productivos y en sus medios de vida. Las prácticas de adaptación más frecuentes fueron la siembra de árboles en la finca e incremento del uso de agroquímicos (herbicidas, plaguicidas y fertilizantes), como respuesta al aumento de temperatura. El manejo y la conservación de suelo y agua fueron implementados debido a los cambios en la precipitación. El uso de variedades mejoradas, los cambios al calendario agrícola y la diversificación del cultivo fueron poco frecuentes. Los autores señalan que las prácticas implementadas son insuficientes para cubrir las necesidades de adaptación, requieren asistencia técnica, financiamiento, coordinación entre grupos, prevención y diseño de estrategias de atenuación ante distintos eventos hidrometeorológicos, así como políticas públicas y planeaciones para facilitar la adaptación de los pequeños productores de café.

En la zona centro del estado de Veracruz, Hernández Sánchez y Travieso Bello (2021) identificaron las medidas implementadas por dos organizaciones cafetaleras, para enfrentar los efectos adversos del cambio climático y reducir su vulnerabilidad actual y futura; estas son renovación de cafetales con variedades tolerantes a plagas y enfermedades, diversificación del cafetal, modificación del calendario agrícola, manejo de sombra, prácticas de conservación de suelo y agua, diversificación de fuentes de ingreso, comercialización diferenciada y organización social. Las autoras observaron diferencias entre las organizaciones e incluso entre productores de un mismo organismo. Recomiendan la incorporación de medidas que incluyan instrumentos económicos e incentivos, así como regulaciones y políticas que favorezcan la capacidad adaptativa.

1 La mayoría de los productores de la región regaban sus cafetales con agua subterránea de pozos individuales.

En la Tabla 1 se presenta una síntesis de las medidas de adaptación implementadas por los cafecultores, clasificadas en estructurales o físicas y sociales. La clasificación que propone Noble *et al.* (2014) incluye las medidas institucionales, pero ninguno de los estudios revisados registró medidas de este tipo.

Tabla 1. Medidas de adaptación al cambio climático implementadas por productores de café.

REFERENCIA (PAÍS)	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	
	ESTRUCTURALES O FÍSICAS	SOCIALES
Frank <i>et al.</i> (2011) México (Chiapas).	Cambio a variedades más resistentes. Diversificación del cultivo. Prácticas de conservación de suelo. Árboles de sombra. Producción orgánica.	Diversificación económica. Organización/cooperativas.
Turbay <i>et al.</i> (2014) Colombia.	Renovación de cafetales con variedades resistentes a roya Agroforestería. Coberturas vegetales. Abonos orgánicos. Asociación de cultivos. Fertilización y prácticas culturales.	Agremiación. Comercialización diferenciada. Participación comunitaria.
Ruiz (2015) México (Chiapas).	Diversificación de variedades de café. Diversificación del cultivo.	Diversificación de fuentes de ingreso. Emigración.
Bucardo <i>et al.</i> (2016) Nicaragua y Guatemala.	Cambio de variedades de café. Conservación de suelos. Producción orgánica (transición). Manejo integrado de plagas. Manejo de sombra. Cultivos alternos. Optimización del uso del agua. Fertilización .	Venta de café cereza.

REFERENCIA (PAÍS)	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	
	ESTRUCTURALES O FÍSICAS	SOCIALES
Nguyen y Nguyen (2019) Vietnam.	Excavación de pozos. Profundización de pozos. Compra de agua. Compartición de agua. Cambio en los horarios de riego. Técnicas de ahorro de agua. Cultivos intercalados. Reconversión productiva.	Diversificación de los medios de vida.
Viguera <i>et al.</i> (2019) Costa Rica.	Siembra de árboles. Incremento del uso de pesticidas, herbicidas y plaguicidas. Incremento del uso de fertilizantes. Prácticas de manejo y conservación del suelo y agua.	Ninguna.
Hernández Sánchez y Travieso Bello (2021) México (Veracruz).	Renovación de cafetales con variedades tolerantes a plagas y enfermedades. Diversificación del cafetal. Modificación del calendario agrícola. Manejo de sombra del cafetal. Prácticas de conservación del suelo y agua.	Diversificación de fuentes de ingreso. Comercialización diferenciada. Organización social.

Dentro de las medidas de adaptación estructurales o físicas, la adopción de variedades tolerantes a plagas y enfermedades es la estrategia que la mayoría de los estudios repor-

tó, esto se debe al brote atípico de roya que devastó regiones de América Latina y que se atribuye principalmente a un aumento de la temperatura y los cambios en las precipitaciones. En cuanto a las de índole social, destacan la diversificación de las fuentes de ingreso y la organización. Un estudio ha reportado la migración como opción, sin embargo, la autora señala que ha provocado desigualdad dentro de la comunidad y un incremento de las mujeres campesinas que asumen la responsabilidad de la subsistencia del hogar; además, las remesas de los migrantes no han generado mayores oportunidades de inversión local, ni la reactivación de la economía agrícola. En este sentido, la emigración ha mitigado la pobreza, aliviado el hambre y sofocado el descontento social (Ruiz, 2015). Al respecto, la Organización Internacional para las Migraciones (2018, p. 36) considera que “la migración es una prueba de que la adaptación ha fracasado”. Por otro lado, la organización social ha sido un elemento clave en la implementación de estas medidas, porque facilita a los productores el acceso a información, recursos, mercados y tecnología.

Se identificó que las medidas implementadas por los cafeticultores son autónomas, reactivas y efectivas en el corto plazo. Sin embargo, se requiere la implementación de instrumentos económicos, incentivos, regulaciones y políticas que faciliten la adaptación al cambio climático en el largo plazo y contribuyan a reducir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia del sistema sociológico del café. Al respecto, Kurukulasuriya y Rosenthal (2003) mencionan que, si bien los agricultores deben resistir y minimizar los impactos adversos de la variabilidad climática a corto plazo, será necesario un conjunto diferente de acciones para reducir la vulnerabilidad a los impactos futuros del cambio climático.

Por otro lado, la adaptación de los pequeños productores también se relaciona con la cadena de suministro global de café que se rige por los comerciantes y las industrias que determinan el precio, así como por los requisitos del mercado (Baca *et al.*, 2014). Debido a esto, Läderach *et al.* (2010) mencionan que los operarios deberán desarrollar estrategias específicas a sus entornos, mientras que otros actores de la cadena del café tendrán que invertir en la construcción de redes de colaboración, compartir conocimientos de manera más amplia y realizar inversiones estratégicas en conjunto para continuar en el negocio.

Para la mayoría de los pequeños agricultores, la implementación de cualquier medida se ve limitada fundamentalmente por la falta de acceso a redes de conocimiento, capacitación, apoyo organizacional, recursos económicos y financieros (Verburg *et al.*, 2019). En el caso de los pequeños industriales, se detectaron principalmente barreras de conocimiento y tecnológicas, económicas, financieras y de gobernanza e institucionales (Tabla 2).

Tabla 2. Principales barreras para la adopción de medidas de adaptación al cambio climático de los productores de café.

CATEGORÍA	BARRERAS
Conocimiento y tecnología	Falta de información. Datos meteorológicos precisos en las regiones cafetaleras. Estudios sobre la vulnerabilidad de los productores de café y los factores que la impulsan. Efectividad de las opciones de adaptación, los costos y los beneficios. Investigación sobre nuevas variedades de café. Arábigo de alta calidad que se adapten mejor a temperaturas más altas.
Económicas	Recursos escasos. Bajos ingresos. Precios bajos del café. Volatilidad del mercado internacional del café.
Financieras	Acceso limitado a créditos para invertir en la implementación de medidas de adaptación.
Gobernanza e instituciones	Carencia de políticas públicas, planes y programas que promuevan la adaptación.

Para superar los obstáculos mencionados es indispensable el desarrollo y fortalecimiento de la capacidad adaptativa del sector cafetalero, se requiere la intervención de los actores de la cadena productiva, el gobierno y las organizaciones civiles. Para lograrlo, se sugiere impulsar el financiamiento, los programas de seguro de cosechas, esquemas de pago por servicios ambientales, promoción de prácticas y procesos agroecológicos, así como fortalecer la organización social y las instituciones.

CONCLUSIONES

El cambio climático representa una amenaza a la dinámica territorial del sistema socioecológico del café. El incremento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación y el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos provocarán variaciones en las actuales regiones productoras. Se prevé una reducción del área apta de cultivo, pérdida de la calidad del grano y disminución de los rendimientos, lo que puede provocar el abandono de cultivos o vicisitudes en los usos del suelo y con ello la fragmentación del agroecosistema cafetalero y la pérdida de servicios ecosistémicos.

Los productores de café están implementando medidas de adaptación que van desde la implementación de variedades tolerantes a plagas y enfermedades, diversificación del cultivo, manejo de sombra, prácticas de conservación del suelo y agua, diversificación de las fuentes de ingreso y organización social, entre otras. Los principales impedimentos para la implementación de medidas son de conocimiento y tecnología, económicas, financieras y de gobernanza e instituciones.

Para hacer frente a los efectos del cambio climático es necesario el fortalecimiento de la capacidad adaptativa para reducir la vulnerabilidad, incrementar la resiliencia y contribuir a la sustentabilidad del sector cafetalero. Será necesaria la intervención del Estado, de todos los actores de la cadena productora de café, investigadores y organizaciones de la sociedad civil. Por ello, es fundamental la participación unánime de las partes involucradas para garantizar el éxito de la adaptación.

REFERENCIAS

- Adger, W. N., Huq, S., Brown, K., Conway, D. y Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies*, 3(3), pp. 179-195.
- Adger, W. N., Agrawala, S., Mirza, M. M. Q., Conde, C., O'Brien, K., Pulhin, J., Pulwarty, R., Smith, B. y Takahashi, K. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. En Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. y Hanson, C. E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 717-743. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Baca, M., Läderach, P., Haggart, J., Schroth, G., y Valle, O. (2014). An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. *PLoS ONE*, 9(2), e88463. DOI: 10.1371/journal.pone.0088463.
- Balvanera, P., Astier, M., Gurri, F. D. y Zermeño Hernández, I. (2017). Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas sociocológicos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.005>
- Bucardo, E., van Zonneveld, M., Betanco, B., y Baltazar, F. (2016). *Análisis de vulnerabilidad de comunidades cafetaleras en Nicaragua y Guatemala*. <https://alliancebioiversityciat.org/es/node/3435>

- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle, O. y Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climate Change*, 129, pp. 89-101.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). *Adaptación al cambio climático en el sector agropecuario en América Latina y el Caribe*. Recuperado de https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesispp_cc_adaptacion_al_cambio_climatico_en_alac.pdf
- Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., y Moat, J. (2012). The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. *PLoS ONE*, 7(11). DOI:10.1371/journal.pone.0047981
- Dufura, E. (2017). Impacts of climate change on global coffee production industry: Review. *African Journal of Agricultural Research*, 12(9), pp. 1607-1611. DOI: 10.5897/AJAR2017.12147.
- Escamilla, E., y Díaz, S. (2016). *Sistemas de cultivo de café en México* (2.ª ed.). Centro Nacional de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico.
- Frank, E., Eakin, H. y López Carr, D. (2011). Social identity, perception and motivation in adaptation to climate risk in the coffee sector of Chiapas, México. *Global Environmental Change*, 21, pp. 66-76. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2010.11.001
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, pp. 253-267. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002
- Godoy, Y., Pellegrini, N. y Herrera, F. (2019). Comparación de los agroecosistemas como sistemas socioecológicos. Caso de Estudio: Horticultura Larense, Venezuela. *Teckhné*, 22(1), pp. 44-49.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2019^a). *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*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/srccl_spm_es.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019^b). *Calentamiento global de 1.5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Resumen para responsables de políticas*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

- Haggar, J. y Schepp, K. (2012). *Coffee and climate change. Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. Climate Change, Agriculture and Natural Resources*. Natural Resources Institute, University of Greenwich.
- Hernández Sánchez, M. I. y Travieso Bello, A. C. (2021). Medidas de adaptación al cambio climático en organizaciones cafetaleras de la zona centro de Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(23), pp. 1-14. Recuperado de <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3462/1545>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Iza, A. (2019). *Gobernanza para la adaptación basada en ecosistemas*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales. Recuperado de <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.EPLP.89.es>
- Kalra, N., Chander, S., Pathak, H., Aggarwal, P. K. Gupta, N. C., Sehgal, M. y Chakraborty, D. (2007). Impacts of climate change on agriculture. *Outlook on Agriculture*, 36(2), pp. 109-118.
- Killen, T. y Harper, G. (2016). *Coffee in the Twenty First Century. Will climate change and demand lead to new deforestation?* Conservation International. Recuperado de <https://www.conservation.org/docs/default-source/publication-pdfs/ci-coffee-report.pdf>
- Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K., y Shaw, M. R. (2014). Adaptation opportunities, constraints, and limits. En Field, C. B., V. R., Barros, Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. y White, L. L. (eds.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 899-943, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kurukulasuriya, P. y Rosenthal, S. (2003). *Climate change and agriculture. A review of impacts and adaptations*. World Bank.
- Läderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramírez, J., Pérez, P.E, Schepp, K. y Eitzinger, A. (2010). Predicted impact of climate change on coffee-supply chains. En W.L. Filho (ed.), *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*, pp. 703-723. Springer-Verlag.
- Läderach, P., Haggar, J., Lau, C., Eitzinger, A., Ovalle, O., Baca, M. Jarvis, A. y Lundy, M. (2011). Café mesoamericano: Desarrollo de una estrategia de adaptación al cambio climático. *Políticas en Síntesis* no. 2. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Recuperado de http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/11/politica_sintesis2_c_afe_mesoamericano.pdf

- Levine, T. y Encinas, C. (2007). Adaptación al cambio climático: Experiencia en América Latina. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 23(3), pp. 41-47.
- Lin, B.B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144, pp. 85-94. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.009
- Magrin, G. O. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/39842>
- Manson, R. H., Contreras, A., y López Barrera, F. (2008). Estudios de la Biodiversidad en cafetales. En Manson, R. H., Hernández Ortiz, V., Gallina, S., Mehltreter, K. (eds.), *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, manejo y conservación*, pp. 1-14. Instituto de Ecología, A. C., Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Mimura, N., Pulwarty, R. S., Duc, D. M., Elshinnawy, I., Redsteer, M. H., Huang, H. Q., Kkem, J. N. y Sanchez Rodriguez, R. A. (2014). Adaptation planning and implementation. En Field, C. B., V. R., Barros, Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. y White, L. L. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Moguel, P., y Toledo, V. M. (1999). Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología Política*, 18, pp. 23-36. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/20743031>
- Moguel, P. y Toledo, V. M. (2004). Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. CONABIO. *Biodiversitas*, 55, pp. 1-7. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/institucion/conabio_espanol/doctos/Biodiv55.pdf
- Noble, I. R., Huq, S., Anokhin, Y. A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F. P., Osman Elasha, B. y Villamizar, A. (2014). Adaptation needs and options. En Field, C. B., V. R., Barros, Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. y White, L. L. (eds.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Nguyen, P. L. y Nguyen, M. D. (2019). Drought adaptation and coping strategies among coffee farmers in the Central Highlands of Vietnam. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 8(1), pp. 52-66. DOI: 10.15640/jaes.v8n1a6

- Organización Internacional del Café. (2019). Informe sobre el desarrollo cafetero de 2019. Crecer para prosperar: viabilidad económica como catalizador de un sector cafetero sostenible. Recuperado de <http://www.ico.org/documents/cy2018-19/ed-2318c-overview-flagship-report.pdf>
- Organización Internacional de las Migraciones. (2018). Migración y cambio climático (Serie de Estudios de la OIM sobre la migración 31). Recuperado de https://publications.iom.int/system/files/pdf/mrs-31_sp.pdf
- Ovalle Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. y Scroth, G. (2015). Projected shifts in *coffea arabica* suitability among mayor global producing regions due to climate change. *Plos One*, 10(4), e0124155. Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>
- Pérez de Madrid, (2019). Capacidades. En A. Iza *Gobernanza para la adaptación basada en ecosistemas*, pp. 27-44. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales. Recuperado de <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.EPLP.89.es>
- Ruiz, L. E. (2015). Adaptive capacity of small-scale coffee farmers to climate change impacts in the Soconusco region of Chiapas, México. *Climate and Development*, 7(2), pp. 100-109. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1080/17565529.2014.900472>
- Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., Castillejos, T., García, J., Soto, L., Hernández, R., Eitzinger, A. y Ramírez, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, México. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14, 605-625. DOI 10.1007/s11027-009-9186-5
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017-2030: Café mexicano*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf
- Smith, B. y Pilifosova, O. (2003). From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction. En Smith, J. B., Klein, R. J. T., Huq, S. (eds.), *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*. Imperial College Press.
- Smith, B. y Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, pp. 282-292. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008
- Soto, L. (2007). Diversidad y otros servicios ambientales de los cafetales. *Ecofronteras*, pp. 2-9. Recuperado de <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/927>
- Speelman, E. N., Groot, J. C. J., García Barrios, L.E., Kok, K., Keulen, H. y Tittonell, P. (2014). From coping to adaptation of change in land-use management and social organization in a Biosphere Reserve community, México. *Land Use Policy*, 41, pp. 31-44. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.04.014>

- Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J. J. y Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 95-112. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n85/n85a8.pdf>
- Venegas, A., Soto, L. Balente, O. y Álvarez, G. (2020). Transformaciones de la caficultura en Chiapas: un análisis de la crisis desde la perspectiva del ciclo de renovación adaptativa. *Sociedad y Ambiente*, 23, pp.1-31. DOI: 10.31840/sya.vi23.2188
- del Valle, B. (2022). Actuaciones y capacidades de las Organizaciones de la Sociedad Civil involucradas en la adaptación al cambio climático como un proceso hacia el Desarrollo Sustentable: caso Golfo de México 2010-2018 [tesis de doctorado, El Colegio de Veracruz].
- Verburg, R., Rahn, E., Verweij, P., van Kuijk, M. y Ghazoul, J. (2019). An innovation perspective to climate change adaptation in coffee systems. *Environmental Science and Policy*, 97, pp. 16-24. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.03.017>
- Viguera, B., Martínez, M. R., Donatti, C., Harvey, C. y Alpízar, F. (2017). Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación. Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CAS-CADA, Conservación Internacional-Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Viguera, B., Alpízar, F., Harvey, C. A. Martínez, M. R. y Saborío, M. (2019). Percepciones de cambio climático y respuestas adaptativas de cafecultores costarricenses de pequeña escala. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), pp. 333-351. doi:10.15517/am.v30i2.32905
- Williams Linera, G., Guillén, A., Gómez, O. y Lorea, F. (2007). Conservación en el centro de Veracruz, México. El bosque de niebla. ¿Reserva archipiélago o corredor biológico? En Halffiter, G., Guevara, S. y Melic, A. (eds.), *Hacia una cultura de conservación de la diversidad biológica. Monografías Tercer Milenio (m3m) Vol. 6*, pp. 303-310. Sociedad Entomológica Aragonesa (SEA). Recuperado de <http://sea-entomologia.org/PDF/PDFSM3MVOL6/Pdf32303310032WilliamsLineraetal.pdf>

Antonio Luna Díaz Peón^{1, 2 y 4}
Virginia Lagunes Barradas^{1, 3 y 4}
Cristopher Alejandro Campuzano Flores^{3 y 4}

¹Universidad Veracruzana

²Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica, A.C.

³Maestría en Sistemas Computacionales, Instituto
Tecnológico Superior de Xalapa

⁴REDESCLIM

7

CAPÍTULO

**ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS EXTREMOS
CLIMÁTICOS DEL ESTADO DE ZACATECAS**

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en el análisis histórico de los valores extremos de temperatura y precipitación del estado de Zacatecas. Existen 159 estaciones climatológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional, algunas con más de 100 años, las cuales carecen de una distribución espacial y temporal uniforme. Al considerar las reglas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial, se buscaron los valores extremos climáticos almacenados tanto en las estaciones operativas como en las suspendidas. Los casos más representativos se complementaron mediante una consulta documental en fuentes periodísticas y gubernamentales de México. Se halló que el registro más antiguo es del 1 de agosto de 1902, la temperatura máxima fue de 48.0 °C el 5 de enero de 1968, la mínima fue de -20.0 °C el 13 de diciembre de 1997 y la precipitación más alta fue de 168.0 mm el 29 de abril de 1965. Se conjetura que los registros de extremos climáticos en Zacatecas están desactualizados. Finalmente, se cimentan las bases para evaluar la calidad de la información para futuras investigaciones a partir de una auditoría automatizada de los registros.

Palabras clave: análisis histórico documental, análisis temporal en bases de datos, calidad de datos climáticos, extremos climáticos.

ABSTRACT

The present research focuses on the historical analysis of extreme values of temperature and precipitation in the Mexican state of Zacatecas. There are 159 climatological stations administered by the National Meteorological Service, some of them more than 100 years old, which lack a uniform spatial and temporal distribution. Considering the rules established by the World Meteorological Organization, we searched for the extreme climatic values stored in both operational and suspended stations. The most representative cases were complemented by means of a documentary query in journalistic and governmental sources in Mexico. It was found that the oldest record is from August 1, 1902, the maximum temperature was 48.0 °C on January 5, 1968,

the minimum was -20.0°C on December 13, 1997 and the highest precipitation was 168.0 mm on April 29, 1965. It is concluded that the records of climatic extremes in Zacatecas are outdated. Finally, the basis is laid to evaluate the quality of the information for future research by means of an automated audit of the records.

Keywords: historical documentary analysis, temporal analysis in databases, quality of climatic data, climatic extremes.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el clima se define como la media y la variabilidad de la temperatura, precipitación y viento de un lugar durante un periodo que puede abarcar desde meses hasta miles de años; depende, además, de las variables de latitud y altitud. Se acostumbra realizar una descripción estadística del sistema climático (OMM, 2021) en lapsos de 30 años.

Por su parte, según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el clima es el estado más frecuente de la atmósfera en un sitio determinado; comprende los extremos y todas las variaciones en un tiempo extenso, y es un conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo. Por todo lo anterior, el SMN concuerda en que, para establecer el clima de un lugar determinado, se necesitan registros de por lo menos 30 años (SMN, 2021).

El estado de Zacatecas cuenta con 10 subtipos climáticos (INEGI, 2021). Para medirlos, hay emplazada una red de 159 estaciones climatológicas de consulta pública del SMN, quien depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y es el encargado oficial de administrar y almacenar la información climatológica a nivel nacional (SMN, 2021). No obstante, la distribución espacial de la red climatológica de Zacatecas se encuentra fuera de los lineamientos de la OMM (2011); por ejemplo, en algunos sitios se cuenta con registros de más de 100 años y en otros apenas desde el año 2000. Casi toda la información está disponible en línea y el resto se puede solicitar directamente en las dependencias del SMN.

La red de monitoreo climatológico de Zacatecas almacena los nombres de las estaciones, coordenadas (altitud, latitud y longitud), cuenca hidrológica a la que pertenece, entidad federativa y las fechas de datos disponibles (inicio y fin para las que ya no están en función). Asimismo, compila datos de temperatura (máxima, mínima y promedio), precipitación (diaria, acumulada mensual y acumulada anual) y, en algunas instancias, evaporación y viento.

Esta investigación se enfoca en los valores extremos de la temperatura y precipitación registrados históricamente con base en las normas de la Organización Meteorológica

Mundial (OMM, encargada de reglamentar los estudios climatológicos), descritas en las Guías de Prácticas Hidrológicas y en las Guías de Prácticas Climatológicas (OMM, 2011). En México la calidad de la información climatológica normada, respecto a los lineamientos, es deficiente, como algunos investigadores lo han documentado. Luna Díaz Peón, Valdés Rodríguez y Villanueva Solís (2018) mencionan que la carencia se debe a que, aunque existen 5491 estaciones climatológicas en México, sólo 3154 estaban en operación hasta junio de 2021; el resto de las estaciones están suspendidas. Para empeorar las cosas, se hallaron fallas por deterioro y colocación inadecuada en los instrumentos por parte de un personal inexperto. Por su parte, Coria *et al.* (2016) destacan la necesidad de corroborar la información climatológica de México.

La incertidumbre de los datos repercute en la realización de los pronósticos meteorológicos, ya que los modelos se alimentan de esa información y pueden sobreestimar o subestimar los valores reales, como lo documentó Iriza (2016). Más aún, en el caso de los estudios de cambio climático se evidenció que la desprolija distribución espacial complica los escenarios futuros de las investigaciones climáticas (Becker y Berbery, 2008; Carrera Hernández y Gaskin, 2007; Cattle *et al.*, 2002; Gilleland *et al.*, 2010; Janowiak *et al.*, 2005; Moral, 2010). A pesar de ello, México ha participado en los estudios sobre cambio climático global con la información oficial existente (Bruckner, *et al.*, 2014; Conde y Gay, 2008; Delgado y Gay, 2010; IPCC, 2007). Por lo antes expresado, es necesario garantizar la confiabilidad de la cobertura de las estaciones climatológicas. Cabe mencionar que se han llevado a cabo investigaciones climatológicas para el estado de Zacatecas sobre cambio climático y se han construido índices de este fenómeno en función de la temperatura máxima (Pita Díaz y Ortega Gaucin, 2019; Aranda, 2015); incluso se ha ponderado en qué medida se verán impactadas algunas plantaciones (Medina García *et al.*, 2014).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Zacatecas tiene una población de 1 622 000 habitantes distribuida en 56 municipios (inegi, 2021). Su clima es poco documentado al igual que sus valores extremos climatológicos de temperatura y precipitación. Por este motivo, la presente investigación acomete analizar el clima de la región para examinar la afirmación popular de que "nunca se habían presentado extremos climáticos como los actuales en la entidad".

METODOLOGÍA

Como primer paso se encomendó en marcha la consulta vía Internet en bases de datos climatológicos del SMN (2021), considerando las estaciones en operación y las suspendidas. Se utilizaron las claves de identificación asignadas de acuerdo a la ubicación de

los equipos: a cada estado corresponde un código numérico; y a su vez cada estación requiere una identificación compuesta del código estatal seguido del un número de serie (Figura 1).



Figura 1. Mapa de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional.

Fuente: SMN (2021).

Debido a su abundancia, los datos recabados se almacenaron en archivos separados por variable para su procesamiento. Cada estación presenta registros diarios de precipitación (mm), evaporación (mm), temperaturas máxima y mínima (°C), también el número de serie, nombre, estado, municipio, situación, organismo o dependencia que lo administra, latitud, longitud y altitud, así como la fecha de última actualización (la cual podría discordar con el último dato de registro). El informe se presenta mediante una serie de tiempo continuo, no obstante, algunos registros son incompletos; por ejemplo, la estación 32058 del municipio de Trancoso muestra una laguna del 1 de octubre al 30 de noviembre de 2018 (Figura 2). Fue necesario cotejar y, en su caso, corregir las estaciones que presentaban este problema, sustituyendo las fechas faltantes con celdas vacías para construir una base de datos continua en serie de tiempo.

Posteriormente, se ordenaron las bases por número de serie, cada una con sus respectivas variables de temperatura y precipitación. Al respecto, la OMM menciona que las observaciones sumarias, tales como las temperaturas extremas o las precipitaciones totales correspondientes a un periodo desde las 08:00 horas de un día hasta las 08:00 del siguiente, discreparán con las efectuadas desde las 00:00 hasta las 24:00 horas (OMM, 2011).

CNA-SMN-CG-GRU-GRU-CLIMATOLOGIA
 BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA
 DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A MARZO 2020, CON
 LA INFORMACION SUPLENIDA POR LAS OFICINAS REGIONALES

ESTACION : 32058
 NOMBRE : TRANCOSO
 ESTADO : ZACATECAS
 MUNICIPIO : TRANCOSO
 SITUACION : OPERANDO
 ORGANISMO : CONASA-ODE
 CVE-SMN : Nulo
 LATITUD : 32.744
 LONGITUD : -102.360
 ALTITUD : 2,200 msnm

EMISION : 06/04/2020

FECHA	PRECIP (MM)	EVAP (MM)	TMAX (°C)	TMIN (°C)
01/01/1961	0	3	30	7
02/01/1961	0	2.9	18	3
03/01/1961	0	2.7	20	2
04/01/1961	0	4.2	20	4
05/01/1961	0	3.8	20	5
06/01/1961	0	6.3	21	7
07/01/1961	0	4.9	17	3
08/01/1961	0	4.4	12	1
09/01/1961	0	3.3	11	1
10/01/1961	0	4	20	1
11/01/1961	0	4	15	4
12/01/1961	0	3.9	17	3
13/01/1961	0	7	20	1
14/01/1961	0	2.8	17	2
15/01/1961	0	3.8	18	1
16/01/1961	0	2	14	1
17/01/1961	0	4.4	10	3
18/01/1961	0	3.4	12	4
19/01/1961	6.4	3.6	19	4
18/09/2018	42.5	Nulo	25	15
19/09/2018	27.5	Nulo	24	13
20/09/2018	0	Nulo	26	14
21/09/2018	1.5	Nulo	22	13
22/09/2018	0	Nulo	26	13.5
23/09/2018	0	Nulo	24	13
24/09/2018	0	Nulo	23	13
25/09/2018	0	Nulo	26	11
26/09/2018	0	Nulo	24	11
27/09/2018	0	Nulo	25	10
28/09/2018	0	Nulo	23	10
29/09/2018	0	Nulo	22	11
30/09/2018	0	Nulo	23	12
01/11/2018	0	Nulo	24.5	8.5
02/11/2018	0	Nulo	23	6
03/11/2018	0	Nulo	28	6.5
04/11/2018	0	Nulo	23	6
05/11/2018	0	Nulo	23	7.5
06/11/2018	1.9	Nulo	23	6
07/11/2018	1	Nulo	22	10
08/11/2018	0	Nulo	20	7
09/11/2018	0	Nulo	22	2
10/11/2018	0	Nulo	21	2
11/11/2018	0	Nulo	20	5
12/11/2018	1.2	Nulo	18	5
13/11/2018	0	Nulo	18.5	8
14/11/2018	0	Nulo	19	-7
15/11/2018	0	Nulo	19	-5
16/11/2018	0	Nulo	19	0
17/11/2018	0	Nulo	21	4
18/11/2018	0	Nulo	20	6

Discontinuidad

Figura 2. Estación climatológica 32058 “Trancoso”. Fuente: SMN (2021).

A continuación, se estimó la calidad de las bases de datos climatológicas. Esta valoración se ejecutó comprobando que las temperaturas máximas no fueran menores que las mínimas ni el promedio, y que las temperaturas mínimas no superasen las máximas ni

el promedio (Edenhofer *et al.*, 2014; Kunreuther *et al.*, 2014; OMM, 2011). Además, se revisó que las coordenadas de la estación fuesen precisas y correctas (Figura 3). Acto seguido, se contempló la posibilidad de otros errores, en línea con las reglas establecidas por la OMM. Finalmente, se sopesaron inconsistencias en los datos, tales como fechas repetidas y faltantes, se identificaron las estaciones en operación y las suspendidas, tal como lo recomiendan Luna Díaz Peón *et al.* (2018).

Se indagaron los extremos climáticos históricos de cada una de las estaciones; es decir, se registraron las fechas de la temperatura máxima (Txx) y la mínima (Tnn), así como del valor más elevado de precipitación Px. Se consultó, para cada caso, los acervos periodísticos de México lo acontecido en esa fecha y el día siguiente. Adicionalmente, se buscaron fuentes oficiales de carácter gubernamental para verificar si existe información a destacar.

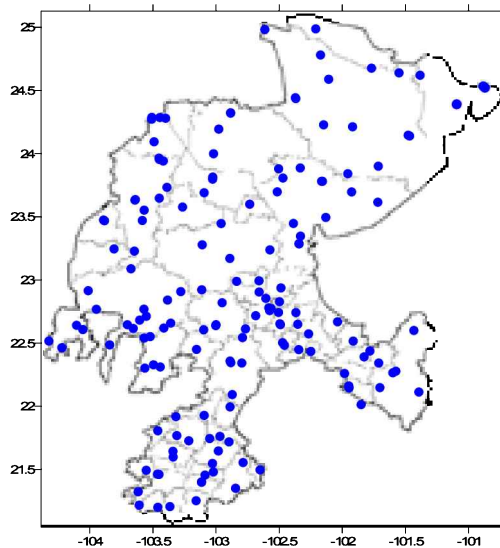


Figura 3. Mapa de las 159 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas.

Fuente: SMN (2021).

RESULTADOS

Se encontraron los valores extremos climáticos de las 159 estaciones de Zacatecas con su respectiva fecha de registro. Para la variable de temperatura se consideran los datos máximos (Txx) y mínimos (Tnn); para la precipitación solo el máximo (Px). Debido a la ingente información obtenida en la investigación, únicamente se muestra el análisis de los cinco valores extremos de cada variable para 32 estaciones (32001 a 32032) en la Tabla 1.

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

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	MUNICIPIO	TXX	FECHA	TNN	FECHA	PX	FECHA
32001	Agua Nueva	Villa de Cos	40.0	04/06/1982	-14.0	09/12/2017	142	09/10/1990
32002	Boca del Tesorero	Jerez	39.5	11/05/1972	-9.5	27/11/1974	66.5	02/02/2010
32003	Calera	Calera	37.5	05/05/1991	-1.01	14/01/1975	120.0	23/06/1970
32004	Camacho (SMN)	Mazapil	43.0	31/05/2018	-16.0	15/11/2018	78.0	21/10/1958
32005	Cañitas de Felipe Pescador	Cañitas de Felipe Pescador	42.0	11/05/1978	-12.0	24/04/1957	87.0	24/05/1950
32006	El Cazadero	Sain Alto	38.0	10/07/1977	-12.0	13/12/1997	82.8	29/09/1976
32007	Cedros	Mazapil	45.0	15/10/1992	-14.0	04/02/2011	90.0	11/07/1987
32009	Jerez de García Salinas (SMN)	Jerez	41.0	27/05/1973	-7.0	01/01/1967	59.5	18/08/1985
32010	Caopas	Mazapil	40.5	01/05/1983	-12.0	16/12/1997	67.0	17/09/1972
32011	Concepcion de la Norma	Mazapil	38.0	18/04/2009	-12.0	08/04/2012	120.0	27/08/1945
32012	Chalchihuites (DGE)	Chalchihuites	37.0	15/09/1965	-8.0	29/12/1963	73.5	16/06/1981
32013	El Chique	Tabasco	41.0	26/06/1961	-3.0	31/12/1963	75.2	03/07/1995
32014	El Encinal	Villa de Cos	36.0	28/04/1961	-12.0	25/02/1961	50.0	14/07/1968
32015	El Rusio	Villa Hidalgo	41.0	03/06/1982	-13.0	18/01/2006	71.5	26/07/2006
32016	El Platanito	Valparaíso	46.5	09/06/1971	-3.0	27/12/2001	108.5	12/01/1987
32017	El Tecomate	Jalpa	44.0	21/11/1997	-7.0	09/01/1997	76.5	13/06/1986
32018	El Sauz	Fresnillo	40.0	03/06/1982	-10.5	24/01/1955	67.2	10/07/1986
32019	Excame	Tepechitlan	42.0	13/06/2014	-11.0	14/12/1997	101.0	25/06/1988
32020	Fresnillo	Fresnillo	39.0	02/04/1985	-10.5	14/12/1997	90.0	17/06/2015
32021	Colonia González Ortega	Sombrerete	44.0	25/05/1989	-12.0	13/12/1997	106.0	08/06/2008
32022	Gruñidora	Mazapil	42.5	08/06/1989	-15.0	09/12/2017	120.0	14/07/2002
32023	Guadalupe de las Corrientes	Villa de Cos	37.0	10/04/1950	-15.0	24/01/1955	84.5	02/05/1947
32024	Guadalupe Victoria	Noria de Ángeles	38.0	10/05/2003	-7.0	14/12/1997	95.5	06/06/2004
32025	Huanusco	Huanusco	44.0	31/05/2018	-5.5	11/01/1997	75.0	24/06/2015
32026	Jerez de García Salinas (DGE)	Jerez	39.0	09/09/1992	-7.0	21/01/1988	69.3	08/09/1993
32027	Jiménez del Teul	Jiménez del Teul	40.0	27/05/1998	-10.5	23/01/1972	77.0	25/11/1982
32028	Juan Aldama	Juan Aldama	39.5	03/06/1982	-14.0	13/12/1997	80.0	29/09/1976
32029	Juchipila (SMN)	Juchipila	43.0	10/06/1993	-5.0	10/01/1996	98.0	09/07/1987
32030	La Florida	Valparaiso	42.0	07/05/2010	-14.0	18/01/2006	85.0	17/08/1969
32031	La Bufa (OBS)	Zacatecas	40.0	04/12/1964	-14.0	02/01/1959	99.7	21/08/1987
32032	La Villita	Tepechitlán	44.5	31/05/2018	-6.0	14/02/1960	82.1	10/07/1963

Fuente: SMN (2021).

RESULTADOS DE LA ESTACIÓN MÁS ANTIGUA

El primer registro en el estado de Zacatecas corresponde al 1 de agosto de 1902: la estación climatológica 32068 “Pinos”, ubicada en el municipio de Pinos a una altura de 2385 msnm (22.282778° N, 101.580833° O), actualmente sigue en operación y registra datos. La temperatura máxima histórica fue de 34.5 °C el 25 de mayo de 2011; la mínima fue de -7.0 °C el 13 de diciembre de 1997; a su vez, la precipitación máxima histórica alcanzó los 128.5 mm. Aunque se trata de la estación más antigua, lamentablemente se reportó un 54.6 % de datos faltantes, y que solo son representativos los periodos del 1/ febrero/1953 al 1/septiembre/1961 y del 5/abril/1990 al 31/diciembre/2018, e incluso en esos lapsos faltan datos (Figura 4).

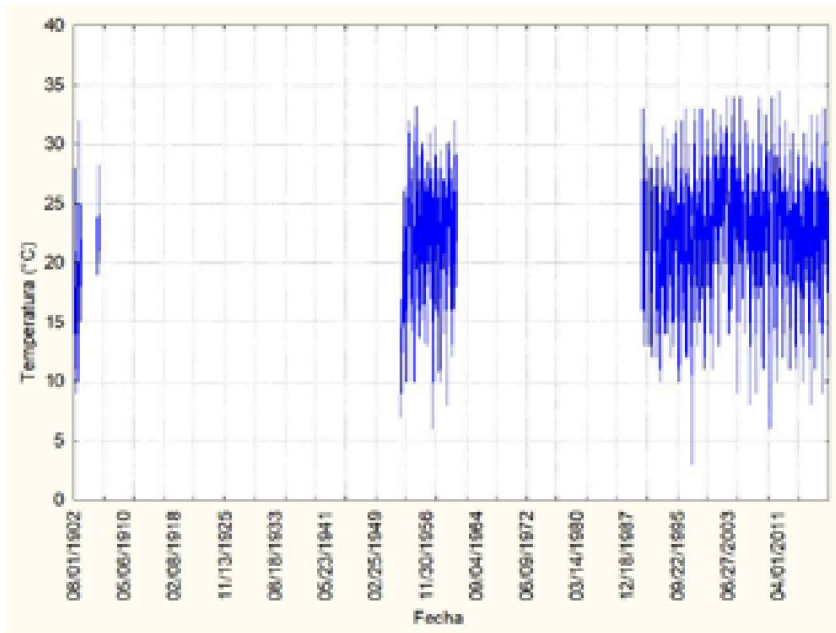


Figura 4. Temperatura máxima diaria de la estación climatológica 32068 “Pinos”. Fuente: SMN (2021).

RESULTADOS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA

Los valores se ordenan por importancia (primero los más antiguos en el caso de coincidencia). El registro máximo histórico fue de 48.0 °C y aparece en tres estaciones, aunque en diferente fecha: Mazapil, Tenayuca y la Pitaya (Tabla 2).

Tabla 2. Estaciones climatológicas que registraron las temperaturas máximas históricas del estado de Zacatecas.

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	TXX	FECHA
32036	Mazapil	Mazapil	48.0	05/01/1968
32097	Tenayuca	Apulco	48.0	17/04/1988
32181	La Pitaya	Jalpa	48.0	05/04/2007
32069	San Juan Capistrano	Valparaíso	47.0	30/06/1980
32152	Apozol	Apozol	47.0	06/06/2015

Fuente: SMN (2021).

Se destaca que, para el caso de la estación 32036 “Mazapil”, la temperatura máxima del 4 de enero de 1968 fue de 30.5 °C; y el 6 de enero, de 26.0 °C, según consta en los registros oficiales del SMN (2021). Dichos valores ponen en tela de juicio la medición de 48 °C apuntada el 5 de enero de 1968.

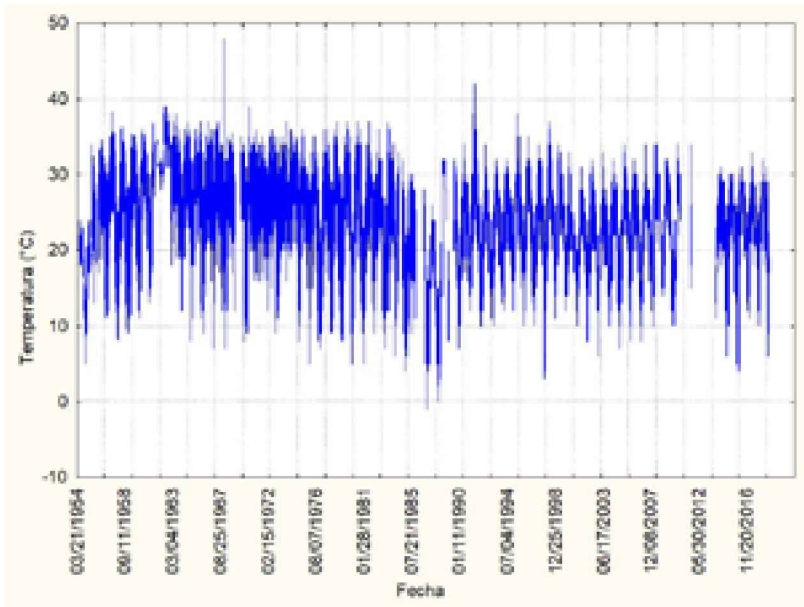
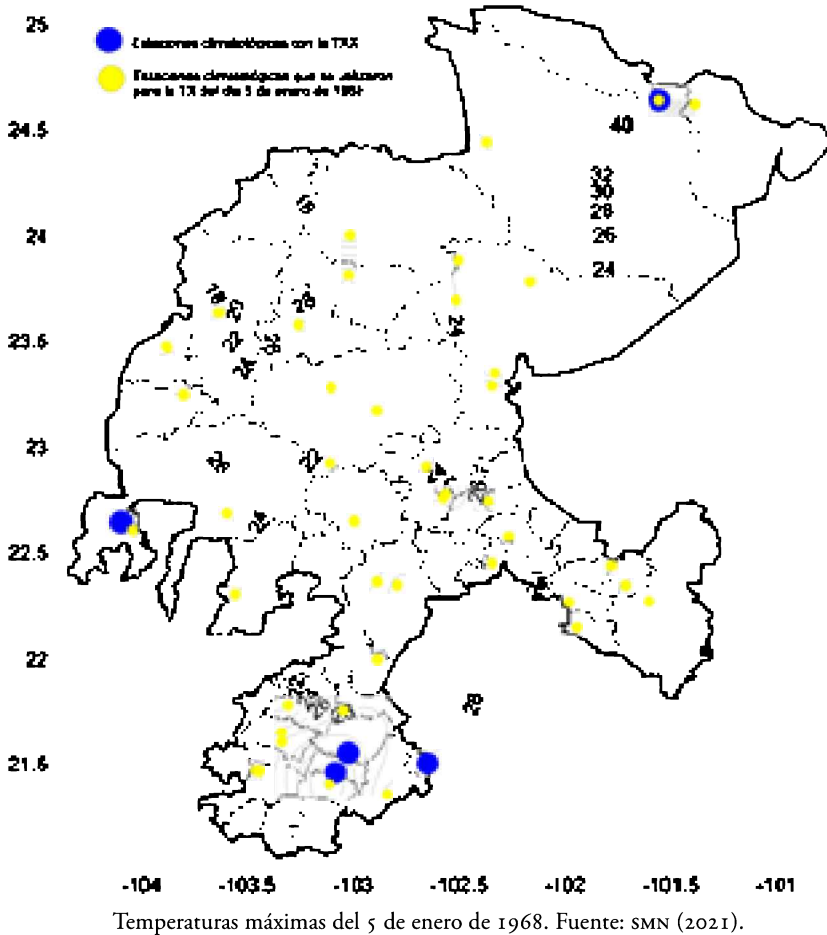


Figura 5. Temperatura máxima diaria de la estación climatológica 32036 “Mazapil” del estado de Zacatecas. Fuente: SMN (2021).

Además, la estación Tenayuca marcó su máximo el 17 de abril de 1988, y la Pitaya el 5 de abril de 2007 (Tabla 2); en ambos casos, sucedió a causa de la elevación de temperatura. En contraste, la estación Mazapil registró su máximo en enero, un mes invernal.

Para revisar la posibilidad de error, se trazó el mapa de isotermas correspondiente al 5 de enero de 1968 (Figura 6) aprovechando la información de 44 estaciones (puntos en color amarillo) pertinente a la misma fecha. Se reveló que los 48.0 °C de la estación 32036 “Mazapil” (puntos en color azul) ubicada al noreste son probablemente errados, pues la estación climatológica con el segundo valor más alto fue Juchipila, ubicada al sur, con 37.0 °C, y la siguiente fue El Platanito, al oeste-suroeste, con 30.5 °C.



Para el caso de los registros de TXX no se encontraron notas periódicas en los medios de comunicación de prensa escrita del estado o del país, ni reportes oficiales del Gobierno Estatal.

RESULTADOS DE LA TEMPERATURA MÍNIMA

Los cinco valores más bajos sucedieron en los municipios de Sombrerete, Villa de Cos, General Pánfilo Natera y Mazapil; destaca que estas cifras se han presentado en los últimos 24 años, en contraste con las temperaturas máximas extremas (Tabla 3).

Tabla 3. Estaciones climatológicas que presentaron las temperaturas mínimas extremas históricas del estado de Zacatecas.

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	TNN	FECHA
32123	Mesillas	Sombrerete	-20.0 °C	13/12/1997
32151	Sierra Vieja	Villa de Cos	-18.0 °C	28/11/2011
32186	El Saladillo	General Pánfilo Natera	-16.5 °C	18/01/2006
32004	Camacho (SMN)	Mazapil	-16.0 °C	15/11/2018
32048	San Benito	Mazapil	-16.0 °C	09/12/2017

Fuente: SMN (2021).

La temperatura mínima diaria de la estación climatológica 32123 “Mesillas” muestra un comportamiento uniforme en sus registros, con su respectiva variabilidad interanual y anual; sin embargo, sobresale su histórico de -20.0 °C, el valor más bajo en el estado de Zacatecas (Figura 7).

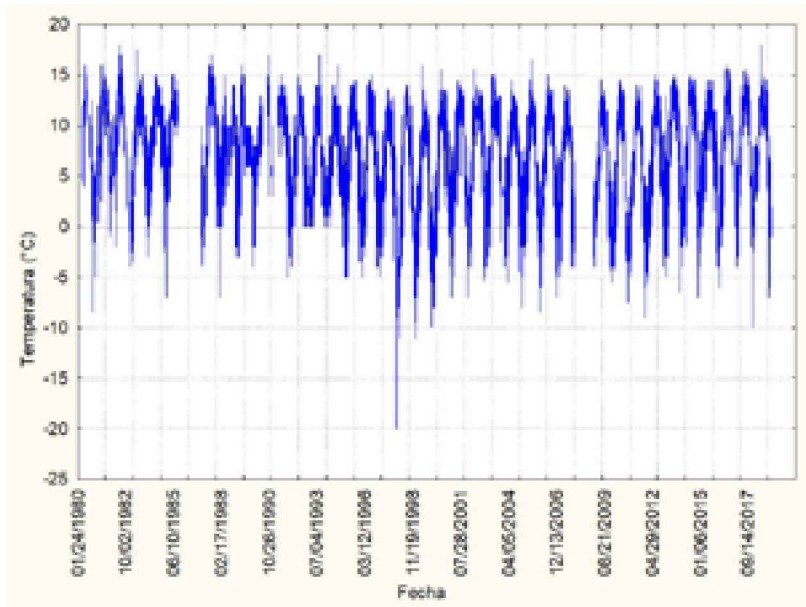


Figura 7. Temperatura mínima diaria de la estación climatológica 32123 “Mesillas”. Fuente: SMN (2021).

Para analizar de manera puntual el caso de la temperatura mínima histórica de Zacatecas, registrada el 13 de diciembre de 1997 en la estación climatológica 32123 “Mesillas”, en el municipio de Sombrerete, se trazó el mapa de isotermas que muestra el comportamiento en todo el estado (Figura 8). Los registros de temperatura mínima para ese día yacieron por debajo de los cero grados Celsius en 100 de las 106 estaciones; más aún en 33 la temperatura fue inferior a -10.0°C .

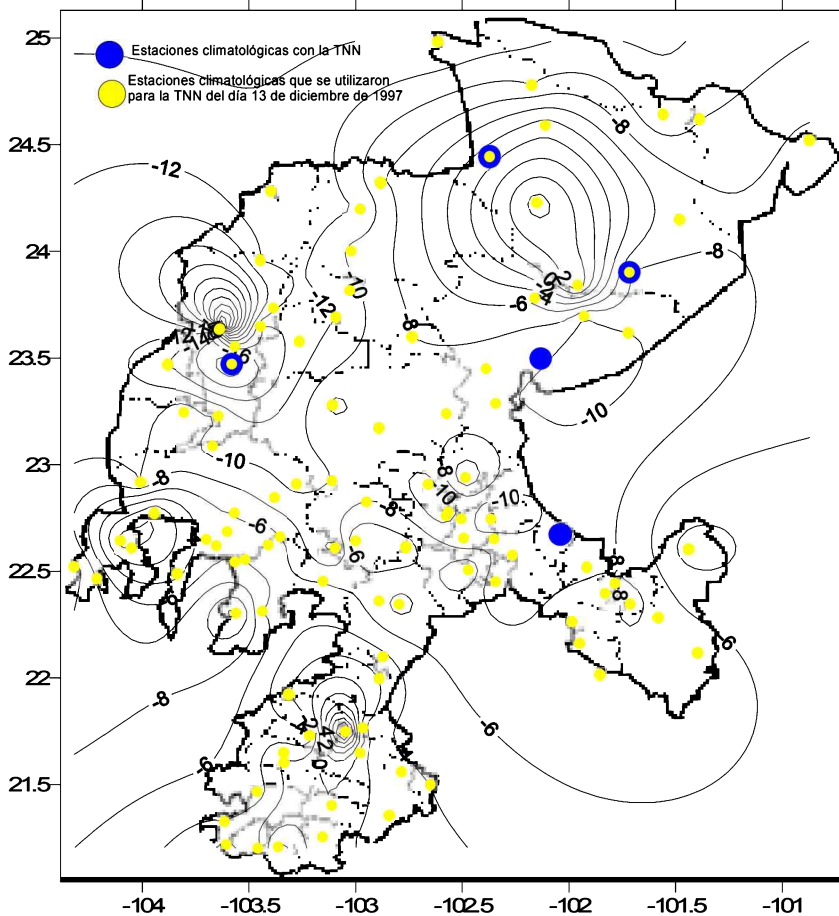


Figura 8. Temperatura mínima del 13 de diciembre de 1997 del estado de Zacatecas. Fuente: SMN (2021).

En notas periodísticas se encontró que, debido al intenso frío, las tuberías y tomas de agua sufrieron rupturas y colapsos; las calles se cubrieron de blanco, y se reportó que “La Bufa parecía una postal de Suiza” (DEMEMORIA, 2019; Imagen en Zacatecas, 2019). Las fotografías capturadas dan cuenta de la magnitud del evento (Figura 9).



Figura 9. Nevada del 13 de diciembre de 1997 en el estado de Zacatecas. La temperatura mínima registrada por el Observatorio Meteorológico de Zacatecas "La Bufa" fue de -7.7°C .
Fuente: imagen en Zacatecas (2019).

RESULTADOS DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación histórica más alta registrada en el estado corresponde a la estación 32062 "Villanueva" (SMN), ubicada en el municipio del mismo nombre (dicha estación se encuentra actualmente suspendida). El segundo registro histórico máximo de precipitación corresponde a la 32090 "E.T.A. 144 Colonia González Ortega", del municipio de Sombrerete (lamentablemente también suspendida); ambas estaciones coinciden en su último registro el 31 de diciembre de 1985. Por lo anterior, se consideraron siete datos máximos de precipitación (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones climatológicas que presentaron las precipitaciones máximas extremas históricas del estado de Zacatecas.

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	SITUACIÓN	PX	FECHA
32062	Villanueva (SMN)	Villanueva	Suspendida	168	29/04/1965
32090	E.T.A. 144 Colonia González Ortega	Sombrerete	Suspendida	160	18/12/1975
32184	Los Fresnos	Tlaltenango de Sánchez Román	Activa	155	02/09/2011

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	SITUACIÓN	PX	FECHA
32054	Sombrerete (DGE)	Sombrerete	Activa	150	27/08/1946
32001	Agua Nueva	Villa de Cos	Activa	142	09/10/1990
32187	Espíritu Santo	Pinos	Activa	140	12/01/1987
32045	Río Grande (SMN)	Río grande	Activa	135	19/07/1952

Fuente: SMN (2021).

La estación 32184 “Los Fresnos”, en el municipio Tlaltenango de Sánchez Román (actualmente operativa), midió 155 mm el 2 de septiembre de 2011. En esta ubicación, se han rebasado en dos ocasiones los 100 mm de acumulado diario (Figura 10).

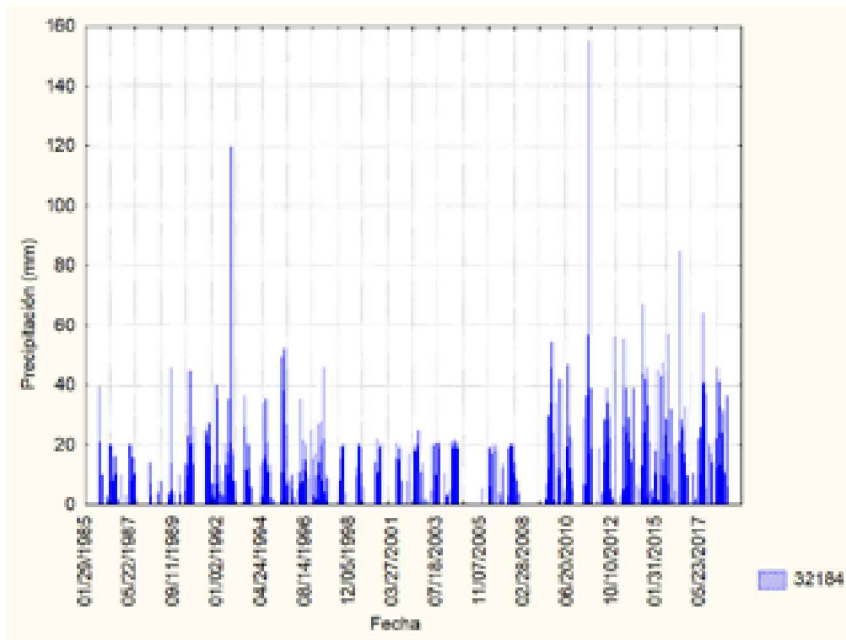


Figura 10. Precipitación diaria de la estación climatológica 32184 “Los Fresnos” del estado de Zacatecas. Fuente: SMN (2021).

Para estudiar dicho nivel de precipitación en la estación Los Fresnos, se plasmó el mapa de isoyetas correspondiente al 2/septiembre/2011. Los resultados muestran que 117 de 124 estaciones climatológicas registraron precipitación. De ellas 10 apuntaron magnitudes superiores a 50 mm; el segundo valor más alto de esa fecha fue de 80.0 mm en la estación climatológica 32142 “Tierra y Libertad”, del municipio Villa de Cos. La precipitación más intensa se concentró en la porción sur-suroeste del estado de Zacatecas y los registros mínimos en el noreste (Figura 11).

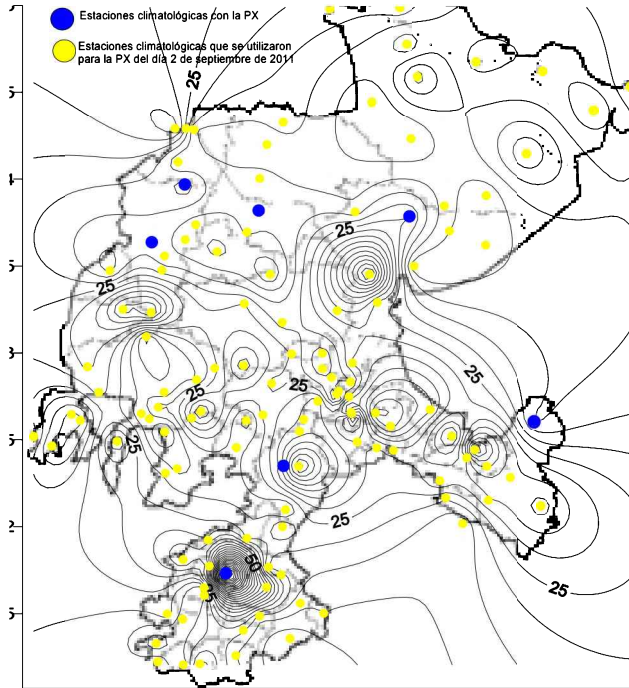


Figura 11. Precipitación acumulada en 24 h del 2 de septiembre de 2011 en Zacatecas. Fuente: SMN (2021).

Las fuentes periodísticas, entre ellas Zacatecas Online (2011), destacaron el evento con información de inundaciones y algunos deslaves, sin que se registraran pérdidas de vidas humanas (Figura 12).



Figura 12. Inundación causada por la precipitación del día 2 de septiembre de 2011 en Zacatecas. Fuente: Zacatecas Online (2011).

Las autoridades del Centro Nacional de Prevención de Desastres emitieron un comunicado anunciando los desastres del 2011. Sin embargo, para Zacatecas fue por sequía severa y no por inundación (CENAPRED, 2011).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores extremos climáticos del estado de Zacatecas no son recientes; en algunos casos, como en la temperatura máxima, datan de hace más de 40 años (por esa razón discrepa la evidencia periodística en Internet). Además, se evidenció que dichos registros contienen graves errores que comprometen la precisión de las investigaciones. Para el caso de las temperatura mínimas, los valores alcanzan magnitudes por debajo de 0 °C, algunos incluso pasan a ser noticias en las fuentes periodísticas. Por otra parte, aunque la precipitación extrema ha ocasionado inundaciones y deslaves, predominan los rangos inferiores a los 100.0 mm; es decir, son lluvias de corta duración y alta intensidad, lo que propicia un incremento del riesgo por fenómenos hidrometeorológicos.

En todo caso, la falta de una base de datos confiable limita el estudio a una especulación. Se recomienda analizar la calidad de la información para futuras investigaciones a partir de una auditoría automatizada de los diversos errores que pueden presentarse en los datos climatológicos del SMN almacenados a nivel nacional.

REFERENCIAS

- Aranda, D. F. C. (2015). Búsqueda del cambio climático en la temperatura máxima de mayo en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(3), 143–160. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1196>
- Becker, E. J., y 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, I.A., Mulugetta, Y., 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., Wisser, R., y 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., y 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., y 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>
- CENAPRED. (2011). DESASTRES 2011 AUTORIZADOS EN 2012. <http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/36/9/imagenes/2012.pdf>
- Conde, A. C., y 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., y 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., y 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.).
- DEMEMORIA. (2019). Las históricas nevadas de 1997, la mitad del país bajo el frío. <https://www.dememoria.mx/nacional/las-historicas-nevadas-de-1997-la-mitad-del-pais-bajo-el-frio/>
- 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>
- Gilleland, E., Ahijevych, D. A., Brown, B. G., y Ebert, E. E. (2010). Verifying forecasts spatially. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1365-1373. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2819.1>
- Imagen en Zacatecas. (2019). En fotos: la nevada de 1997 en Zacatecas. 20. <https://imagenzac.com.mx/capital/en-fotos-la-nevada-de-1997-en-zacatecas/>
- INEGI. (2021). 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., y 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., y 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>
- Kunreuther, H., Gupta, S., Bosetti, V., Cooke, R., Dutt, V., Duong, M. H., Held, H., Llanes-Regueiro, J., Patt, A., Shittu, E., y 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 Díaz Peón, A., Valdés Rodríguez, O. A., y Villanueva Solís, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (p. 317). <http://colver.com.mx/2018/SustentabilidadDesarrollo.pdf>
- Medina García, G., Ruiz Corral, J. A., Zegbe, J. A., Ruiz Soria, J., Rodríguez Moreno, V., y Díaz Padilla, G. (2014). Impacto potencial del cambio climático en la región productora de durazno en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10, 13. <https://www.researchgate.net/publication/270509780>
- 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>
- Pita Díaz, O., y Ortega Gaucin, D. (2019). Artículo: COMEII-19017. COMEII, 1. www.riego.mx
- SMN. (2021). *Servicio Meteorológico Nacional*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Zacatecas Online. (2011). Deja inundacion damnificados. Revisado el 2 de septiembre <https://zacatecasonline.com.mx/>

David Romero¹
José Francisco León Cruz²

¹Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida,
Universidad Nacional Autónoma de México

²Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

8

CAPÍTULO

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO POR CICLONES TROPICALES EN MÉXICO

RESUMEN

Los ciclones tropicales implican una gran variedad de peligros, por ejemplo, fuertes vientos, precipitaciones extremas, mareas de tormenta, inundaciones y deslizamientos. En México, los ciclones tropicales son las amenazas naturales más serias, frecuentes y costosas para las poblaciones afectadas. El presente trabajo de investigación tiene por objetivo la caracterización del riesgo por ciclones tropicales en México a través del análisis de sus tres componentes: el peligro, la vulnerabilidad y la exposición. El primero se estimó por medio de probabilidades de presencia de vientos relativos a categorías de tormentas tropicales y huracanes en una malla hexagonal, a partir del archivo internacional de mejores prácticas para la gestión del clima (IBTRACS, por sus siglas en inglés) y los campos de vientos del NCEI-NOAA para el periodo de 1970 a 2020. La vulnerabilidad se aproximó a partir de la construcción de indicadores con datos sociodemográficos del último Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI; con dichos indicadores, se realizó un análisis factorial y se creó un índice ponderado. Finalmente, la exposición se determinó a partir de la densidad poblacional. Cada uno de estos índices se agregó a una escala municipal y su conjunto permitió el cómputo del riesgo asociado a ciclones tropicales en México. Los resultados muestran altos niveles de riesgo relacionados, principalmente, con la componente de peligro, por ejemplo, sobre zonas costeras como la Riviera Maya y el sur de la Península de Baja California. De igual manera, los mismos se asocian a condiciones de marginación y pobreza (aspectos relacionados con la vulnerabilidad) en regiones como Veracruz, Guerrero, Michoacán y Jalisco. Calcular los índices usando los municipios como unidades de muestreo, permite la visualización espacial del riesgo a gran escala y facilita la identificación de regiones con un alto nivel de peligrosidad y vulnerabilidad ante los ciclones tropicales en México.

Palabras clave: desastres, exposición, fenómenos hidrometeorológicos, índices, peligro, riesgo, vulnerabilidad.

ABSTRACT

Tropical cyclones involve a wide variety of hazards, for example, strong winds, extreme rainfall, storm surges, flooding and landslides. In Mexico, tropical cyclones are the most serious, frequent and costly natural hazards for the affected populations. The

objective of this research is to characterize tropical cyclone risk in Mexico by analyzing its three components: hazard, vulnerability and exposure. The first was estimated by means of wind probabilities for tropical storm and hurricane categories in a hexagonal grid based on the International Best Practices for Climate Management (IBTRACS) and the NCEI-NOAA wind fields for the period 1970 to 2020. Vulnerability was approximated from the construction of indicators with sociodemographic data from the latest INEGI Population and Housing Census 2020; with these indicators, a factor analysis was performed and a weighted index was constructed. Finally, exposure was determined based on population density. Each of these indices was aggregated at the municipal scale and together they allowed the computation of the risk associated with tropical cyclones in Mexico. The results show high levels of risk related mainly to the hazard component, for example, over coastal areas such as the Riviera Maya and the southern part of the Baja California Peninsula. Similarly, they are associated with conditions of marginalization and poverty (aspects related to vulnerability) in regions such as Veracruz, Guerrero, Michoacán and Jalisco. Calculating the indices using municipalities as sampling units allows the spatial visualization of risk at a large scale and facilitates the identification of regions with a high level of hazard and vulnerability to tropical cyclones in Mexico.

Keywords: disasters, exposure, hydrometeorological phenomena, indices, hazard, risk, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

El costo por los desastres crece continuamente en todo el mundo (CRED, 2017); entre ellos, los ciclones tropicales tienen el mayor impacto socioeconómico en las regiones costeras de América del Norte y Mesoamérica. Los efectos adversos por ciclones dependen de factores como la ubicación, producción total y el capital de las actividades económicas, el número y la intensidad de los sistemas, así como las características geográficas de las áreas afectadas (Nordhaus, 2006). Por ejemplo, la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) estimó los impactos económicos anuales de los ciclones tropicales desde 1980 hasta 2019 en ese país: para 2013, el daño total se valuó en 417.9 mil millones de dólares; dos años después, fue de unos 530 mil millones de dólares; en 2019, 945.9 mil millones de dólares. Actualmente a nivel global, las pérdidas económicas por huracanes son exorbitantes en comparación con las ocurridas hace unas décadas, debido a una mayor presencia de infraestructura en las áreas costeras (Homewood, 2019). Este breve análisis muestra que la destrucción causada por los ciclones va en aumento.

En el contexto nacional y de acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021), en el periodo entre 2000 y 2020, se emitieron 33 701 declaratorias de emergencia, desastre y contingencia climatológica. El 21.37 % (7203 casos) se relacionó con ciclones tropicales, demostrando la importancia de estos fenómenos para el país (CENAPRED, 2021). Una estimación del costo por huracanes que impactaron a México reveló una pérdida de 1752 millones de dólares por el huracán Wilma en 2005; 12 000 millones de pesos por Odile en 2014; y 567 millones por Gilberto en 1988, según la Asociación Mexicana de Seguros A. C. Para este mismo evento se estimaron 225 pérdidas humanas de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés). Es importante mencionar que también se han registrado consecuencias importantes de ciclones con una velocidad de viento relativamente baja, pero lluvias abundantes. Un ejemplo reciente es el caso de la tormenta tropical Cristóbal, que provocó graves inundaciones en Yucatán en 2020 (Lomas Barrié *et al.*, 2021). Todo lo anterior permite contextualizar el riesgo, y sus componentes, asociado a ciclones tropicales en México y el mundo.

El riesgo surge de la convolución del peligro, la vulnerabilidad y la exposición en un momento y lugar determinados (McGlade *et al.*, 2019; Kron, 2002). El peligro es la posibilidad de ocurrencia de un evento, ya sea de origen natural o antropogénico, que puede tener efectos adversos en un área (Cardona *et al.*, 2012). También es comúnmente definido como el potencial de un fenómeno natural o inducido por el ser humano para causar daños (Kamranzad *et al.*, 2020). En cuanto a la vulnerabilidad, se define como la propensión a ser afectado negativamente por un fenómeno natural o antropogénico (Lavell *et al.*, 2012); se trata de un concepto multidimensional y posee procesos acumulativos y en cascada (McGlade *et al.*, 2019). Finalmente, la exposición se refiere al inventario de elementos, población y recursos económicos en un área donde pueden ocurrir eventos peligrosos (Cardona *et al.*, 2012; McGlade *et al.*, 2019). El nivel de exposición se asocia a la localización de la población, así como los bienes y servicios, por lo que posee una significativa componente territorial (Koks *et al.*, 2015).

Para el análisis de fenómenos naturales como los ciclones tropicales, existen dos fundamentos que permiten la evaluación de su potencial peligrosidad: la frecuencia y la intensidad (Shi *et al.*, 2020). La primera se define como la cantidad de ocasiones en que ocurre un evento determinado por unidad de tiempo, y la segunda, como una medida de la fuerza con que dicho fenómeno se manifiesta en un lugar dado. En las cuencas del Atlántico Norte y del Pacífico Noreste, donde se ubica México, la intensidad se mide en la escala Saffir-Simpson como una función de las velocidades de viento sostenido durante 1 minuto. Según dicha escala, las tormentas tropicales tienen vientos sostenidos de al menos 34 nudos (63 km/h), mientras los huracanes se caracterizan por vientos sostenidos de mínimo 64 nudos (119 km/h). Para el territorio mexicano, la máxima

velocidad de viento registrada es de 175 nudos (346 km/h), y está asociada al huracán Patricia, que impactó en los estados de Colima y Jalisco en 2015.

El estudio de la vulnerabilidad a ciclones tropicales es recurrente en la literatura especializada, nacional e internacional, como es el caso de Pielke *et al.* (2003), Pita *et al.* (2013) y Marín Monrroy *et al.* (2020). Independientemente del enfoque que estas investigaciones tomen, buena parte de los estudios busca explicar la función que desempeñan las condiciones socioambientales en la probabilidad que tienen las poblaciones de sufrir daños. Cambios en las condiciones económicas, políticas y culturales, entre otras, son precisas para evidenciar el papel de la sociedad en la generación de situaciones de riesgo y la posibilidad de ocurrencia de desastres. Algunos estudios en México (Noh y Rodríguez Esteves, 2016; García Benítez y Adame Martínez, 2017) se han enfocado en determinar los elementos de la vulnerabilidad ante ciclones a nivel local, regional y nacional. De igual forma, el CENAPRED cuenta con su propio índice de vulnerabilidad social, utilizado para la estimación del riesgo por ciclones en el país (CENAPRED, 2006). Es importante mencionar que es necesaria una actualización constante de estos índices, dado que la vulnerabilidad es una componente dinámica.

En la presente investigación se establece una caracterización del riesgo asociado a ciclones tropicales en México. Para lograrlo, se utiliza un enfoque donde el riesgo es el producto del peligro, la amenaza y la vulnerabilidad. La sección dos detalla las fuentes de datos y los métodos empleados en la construcción de los índices. En la sección tres se describen los resultados obtenidos y se discute la distribución espacial de los niveles de riesgo ante tormentas tropicales y huracanes; para finalizar, se muestran las conclusiones.

DATOS Y MÉTODOS

DATOS FÍSICOS

Los datos de ciclones tropicales se obtuvieron de las bases de registros para el Atlántico Norte y Pacífico Noreste-Central del IBTRACS versión 0400 (Knapp *et al.*, 2010, 2018). La información, disponible en formato de *shapefiles*, comprende los ciclones tropicales registrados desde 1851 en el Atlántico Norte y desde 1876 en el Pacífico Noreste y Central. La base de datos del Atlántico cuenta con 120 234 registros, mientras la del Pacífico enlista 92 024. Los datos relevantes para la zona incluyen la agencia responsable de los datos, la posición geográfica en grados con dos decimales, el número del sistema, su clave, la fecha y hora, la velocidad máxima de viento sostenido expresado en nudos y la distancia a tierra. Aunque otros datos, como la presión atmosférica, no están disponibles para todos los registros. Para la zona de estudio son pertinentes los

datos de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), los cuales tienen un intervalo temporal de 6 horas y velocidades de viento expresadas en múltiplos de 5 (90, 95 o 100 nudos). Asimismo, son empleables los informes del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC, por sus siglas en inglés), los cuales corresponden a periodos de 3 horas máximo, y la mayor parte de los datos de vientos también en múltiplos de 5 (las zonas de velocidades máximas para cada sistema suelen tener una mayor precisión). Para diferentes propósitos se obtuvieron las capas de puntos relativos a la ubicación del ojo del ciclón tropical en el momento del registro y las capas de polilíneas que corresponden a las trayectorias.

Desde la era de los satélites se ha detectado una mayor cantidad de sistemas (Vecchi y Knutson, 2011), principalmente para la cuenca Pacífico Noreste (Farfán *et al.*, 2013). En lo que respecta al Atlántico Norte, la serie de tiempo más confiable inicia desde mediados de la década de 1940, gracias a los aviones cazadores de huracanes (Landsea, 2013; Neumann, 1993). Por otro lado, el satélite de observación de televisión por infrarrojos comenzó a monitorear en 1960 y, como resultado, las tormentas tropicales se han observado con mayor continuidad desde entonces (Lee *et al.*, 2012; Liu y Chan, 2013). Dado que la metodología de seguimiento es homogénea en ambos océanos desde 1970 (Farfán *et al.*, 2013), en este análisis se seleccionó el periodo de datos de 1970 a 2020 con el propósito de evitar el sesgo espacial.

A fin de conocer las zonas de impacto de cada ciclón, se obtuvieron también los datos de campos de viento (*wind swath*) incluidos en los archivos de mejores trayectorias (*best tracks*) que el NHC pone a disposición para cada sistema de manera independiente a través de su página web. Tales archivos contienen las zonas de vientos sostenidos con velocidades mínimas de 34 y 64 nudos, relativas a las tormentas tropicales y los huracanes, respectivamente. La base de datos que acompaña las formas también incluye el periodo en que los vientos fueron activos en la zona y la clave del sistema. Se descargaron las capas disponibles de los 495 sistemas ocurridos entre 2008 y 2020. Los contornos de los polígonos, confeccionados con segmentos de orientación sur/norte y este/oeste, muestran un margen de error de ± 2.5 km.

DATOS SOCIOECONÓMICOS

Las cifras requeridas para el análisis de la vulnerabilidad y, se extrajeron del censo de población y vivienda 2020 (INEGI, 2021). Se emplearon los productos tabulados a nivel municipal del cuestionario básico y del ampliado. A partir de las variables disponibles en las bases de datos, se construyó un total de 17 indicadores (16 asociados al índice de

1 Disponible: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/>

vulnerabilidad y I para la exposición) de las características socioeconómicas del país. Los criterios de selección y los procesos para el cálculo de tales indicadores se detallan en la siguiente sección. Se trabajó con un total de 2469 unidades espaciales, mismas que representan cada uno de los municipios de México para el año 2020.

MÉTODOS

El peligro relacionado con las amenazas por tormentas tropicales y huracanes se evaluó con base en las probabilidades de ocurrencia en el territorio nacional. Para este propósito, se aplicaron metodologías para convertir todas las trayectorias con velocidades de viento seleccionadas en los campos de viento y, posteriormente, se realizó el conteo y el cálculo de las probabilidades a partir de unidades de muestreo homogéneas.

Es importante mencionar que los campos de vientos solo están disponibles para los sistemas posteriores al año 2008, por tanto, para años anteriores fue necesario modelarlos a partir de la estimación de los radios. Nederhoff *et al.* (2019) proponen un cálculo de radios en cuatro cuadrantes para zonas de viento características de tormentas tropicales y de vientos máximos, pero no consideran el cálculo para zonas de viento de huracanes. Asimismo, dicha metodología es difícilmente aplicable a trayectorias. En consecuencia, se desarrolló un método para medir las distancias de los bordes de campos de vientos de cada lado de las trayectorias de los campos de viento iniciales, para acoplarlos a los datos de puntos, y seleccionar únicamente los puntos con las velocidades mínimas consideradas en el estudio. Con tal objetivo, en el sistema de información geográfica ArcGIS, se transformaron las zonas a líneas y se cortaron con base en las trayectorias, agregando un atributo correspondiente a cada lado (izquierda o derecha) en función del sentido de circulación del sistema. Este proceso se llevó a cabo para ambas velocidades (34 y 64 nudos, representativas de tormentas tropicales y huracanes) y se creó una capa de tipo vectorial (*shapefile*) de conjunto para cada una. Estas capas se importaron al programa estadístico R (R Core Team, 2020) mediante la paquetería “sf” (Pebesma, 2018), donde se calcularon las distancias geodésicas entre los puntos de los sistemas y las líneas de campos de viento de ambos lados, gracias a la fórmula inversa de Vincenty para elipsoides (Apgar y Yu, 2016), considerando el *datum* wgs 1984. Tanto la fuerza de Coriolis para cada punto como las velocidades de traslación del ciclón tropical se calcularon también en R; estas últimas se obtuvieron de la longitud de los segmentos. Para cada cuenca se calcularon los radios derecho e izquierdo promedios relativos a las velocidades mínimas de las categorías de tormenta tropical y huracán por quintil de fuerza de Coriolis y velocidad de traslación. Finalmente, gracias al cómputo de estos valores fue posible asignar a cada segmento los radios correspondientes según

los rangos definidos en el paso anterior. Estas capas relativas a cada categoría de ciclón se importaron nuevamente a ArcGIS, donde se crearon las zonas de influencia considerando las diferencias entre las cuencas y los lados. Los campos de viento faltantes del NHC fueron así suplidos por las zonas modeladas.

Para determinar la probabilidad de ocurrencia se necesita el conteo de los sistemas por unidades espacialmente homogéneas en todo el territorio; el diseño más apropiado para este propósito es una malla hexagonal (Elsner *et al.*, 2011). La malla se creó en la paquetería “sp” (Pebesma y Bivand, 2015) empleando el sistema de proyección cónica conforme de Lambert usado por el INEGI para la cartografía de México a escala nacional, y una apertura de malla de 50 km, con el fin de evitar sesgos latitudinales relativos a las proyecciones geográficas. La capa de hexágonos se unió en ArcGIS con los campos de viento de forma separada para cada categoría de ciclones y, posteriormente, a la transformación de estas debida al cambio de sistema de proyección. En la siguiente etapa, las capas resultantes se disolvieron en función de las celdas, contando para cada una, el número de campos de viento cruzados. Finalmente, las probabilidades anuales de ocurrencia de ciclón tropical (PCT) con categoría de tormenta tropical y de huracán se calcularon considerando la distribución de Poisson, uno de los modelos de probabilidad discreta más útiles e importantes para la descripción de los datos de conteo (Elsner y Jagger, 2013). La fórmula empleada fue la siguiente:

$$PCT = \exp\frac{-n}{t}$$

Donde, t es el número de campos de viento registrados en el periodo t , expresado en años.

Los índices de peligro para tormenta tropical y huracán (IPTT y IPH) se determinaron en función de los quintiles de los valores de probabilidad, excluyendo del análisis los valores nulos. Así, los niveles corresponden a números enteros de 0 a 5. Una vez calculado el IP, se trabajó con los datos socioeconómicos a fin de obtener los proxis de la vulnerabilidad y exposición. Como se ha mencionado anteriormente, la vulnerabilidad es un concepto multidimensional que abarca, por ejemplo, las características sociales, culturales, políticas, económicas y físicas (Kamranzad *et al.*, 2020). Estudios previos han demostrado cómo diversos rasgos sociodemográficos determinantes de la vulnerabilidad ante las amenazas naturales (Cutter *et al.*, 2003, Koks, *et al.*, 2015, Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015) se estiman comúnmente a través de indicadores representados por las relaciones entre variables.

Para esta investigación, la metodología seleccionada en el cálculo de la vulnerabilidad consistió en un enfoque mixto, basado en el análisis espacial y modelado estadístico. En este sentido, se distinguen cuatro etapas primordiales: la construcción de indicado-

res, la elaboración de un análisis estadístico multivariante, la definición del índice de vulnerabilidad, y su correspondiente mapeo. Dicho proceso metodológico se basa en investigaciones previas efectuadas en Estados Unidos (Cutter *et al.*, 2003) y replicadas alrededor del mundo (de Loyola Hummell *et al.*, 2016; Frigerio *et al.*, 2016; Siagian *et al.*, 2014). Destaca que, si bien el índice se construyó a partir de indicadores enfocados a la vulnerabilidad ante ciclones tropicales, sus resultados pueden emplearse para otras amenazas de origen hidrometeorológico, por ejemplo, tormentas severas, granizadas, eventos extremos de precipitación e incluso tornados.

Para la primera etapa del estudio, la selección de indicadores se basó en el consenso general de la comunidad científica sobre los factores que influyen en la vulnerabilidad. Las características socioeconómicas, la edad, el nivel educativo, el género, la infraestructura, el acceso a servicios médicos y la ocupación se consideran algunos de los factores más importantes (Cutter *et al.*, 2003; Frigerio y De Amicis, 2016; Schmidtlein *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2014). Para el presente estudio se construyeron 16 indicadores que buscaban reflejar las características de la población que la tornan susceptible de sufrir daños por el impacto de ciclones tropicales. Los indicadores, así como su impacto en la vulnerabilidad, se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores seleccionados para el índice de vulnerabilidad social.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	IMPACTO
PM65	Población mayor de 65 años	+
PM05	Población menor de 5 años	+
PFEM	Población femenina	+
PHLI	Población que habla alguna lengua indígena	+
PDIS	Población con discapacidad	+
PANA	Población analfabeta	+
PEPB	Población con educación postbásica	-
PEAC	Población económicamente activa	-
PSSD	Población sin derechohabencia a servicios de salud	+
VPTI	Viviendas con piso de tierra	+
VICU	Viviendas con un solo cuarto	+
VSEL	Viviendas sin electricidad	+
VSRT	Viviendas sin radio ni televisión	+
VSIN	Viviendas sin acceso a Internet	+
VPEN	Viviendas con paredes endebles	+
VTEN	Viviendas con techos endebles	+

Los indicadores permitieron un análisis estadístico multivariante. Para esta etapa del proyecto se eligió el enfoque sugerido por Cutter *et al.* (2003). Se seleccionó el análisis factorial, una técnica de reducción de dimensiones que permite disminuir las variables de entrada para el índice de vulnerabilidad. Y dado que los indicadores generados tenían diferentes unidades de medida, fue necesaria una normalización previa al análisis estadístico. En este sentido, se estableció una normalización conforme a la puntuación Z, es decir, una escala común cuya media es 0 y desviación estándar 1.

En el análisis factorial se adoptó un método de rotación ortogonal varimax con normalización de Kaiser, que permite una mayor separación entre los factores extraídos y facilita la interpretación de la matriz de componentes (Frigerio *et al.*, 2016). Se seleccionaron todos aquellos factores que presentaban un valor propio mayor que 1. Es importante mencionar que se realizaron el test de Kaiser, Meyer y Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett a través de la matriz de correlaciones. Los resultados de ambos, 0.85 para KMO y $p < 0.001$ para el test de Bartlett, confirmaron la aplicabilidad del análisis factorial (Frigerio *et al.*, 2016; Siagian *et al.*, 2014).

Se definió un total de cinco factores que explicaron el 72 % de la varianza. Resultados similares se han reportado en la literatura previamente (Frigerio *et al.*, 2016, Cutter *et al.*, 2003, Siagian *et al.*, 2014). Los factores, así como el porcentaje de la varianza total explicada, se clasifican en: características estructurales (23 %), educación (19 %), edad y movilidad (14 %), género (9 %) y salud (8 %). La dirección de estos factores y su impacto en la vulnerabilidad se estableció a partir de las cargas factoriales que los componen.

El índice de vulnerabilidad se precisó con base en los resultados de la etapa anterior. En este sentido, la metodología original propuesta por Cutter *et al.* (2003) asigna el mismo peso para cada uno de los factores identificados. No obstante, en este análisis se optó por emplear la propuesta sugerida por Siagian *et al.* (2014) a fin de construir un índice con ponderaciones desiguales. Las puntuaciones del índice de vulnerabilidad (IV) se establecieron según el porcentaje de varianza explicada de cada factor respecto del total. De este modo, el factor con mayor varianza explicada contribuye en mayor proporción a las puntuaciones del IV (Siagian *et al.*, 2014). Finalmente, los resultados se agregaron a nivel municipal mediante un sistema de información geográfica. Con el propósito de generar cinco niveles de vulnerabilidad (desde *muy baja* hasta *muy alta*), se empleó un sistema de clasificación basado en desviaciones estándar (Cutter *et al.*, 2003). La fórmula para el cálculo del índice de vulnerabilidad se muestra enseguida:

$$IV = \frac{F1 \times 23}{72} + \frac{F2 \times 19}{72} + \frac{F3 \times 14}{72} + \frac{F4 \times 09}{72} + \frac{F5 \times 08}{72}$$

Donde F1 corresponde al factor de las características estructurales, F2 al de educación, F3 al de edad y movilidad, F4 al género y F5 a la salud.

Finalmente, para calcular la exposición se manejó la densidad poblacional municipal en 2020, según datos del INEGI (2021), y de la capa espacial del marco geoadministrativo nacional del mismo año. Con miras a conseguir valores de densidad más fieles, se descartaron los cuerpos de agua interiores y lagunas costeras cuya superficie fuera superior a 50 km². Los niveles del índice de exposición (IE), de 1 a 5, se establecieron en función de los quintiles de los valores de densidad. Los índices de riesgo finales (IRTT y IRH) se obtuvieron de la multiplicación de IPTT e IPH con el IV e IE. Y de la misma manera que para los índices de peligro, se clasificaron los datos no nulos en quintiles y se asignó la categoría del quintil relativo al rango: *muy bajo*, *bajo*, *medio*, *alto*, *muy alto*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PELIGRO

Las probabilidades anuales de ocurrencia de al menos una tormenta tropical se presentan en la Figura 1, con valores entre 0 en el Norte de Chihuahua y 0.62 al extremo suroeste de la península de Baja California. Estas tasas se traducen en los niveles de peligro asociado a tormentas (IPTT) representados en la Figura 2. La zona sin registros es considerablemente reducida, lo cual muestra la marcada penetración de los sistemas ciclónicos después de su arribo, particularmente desde el Golfo de México. Así, los niveles de peligro *bajo* y *muy bajo* se concentran en las partes más alejadas de las costas, además de los estados costeros de Chiapas, Baja California y Sonora. Aunque la ciclogénesis del Pacífico se dé en las aguas cercanas al estado de Chiapas, la circulación de los sistemas hacia el noroeste impide que la entidad se vea afectada (Romero Vadillo y Zaytsev, 2007). A su vez, gracias a la corriente de California y las aguas marinas frías resultantes de surgencias, los estados del norte están protegidos (Huyer, 1983).

Las zonas de mediana probabilidad (> 0.2), que son relativas a por lo menos un sistema de cada cinco años en promedio, se encuentran en la costa del Atlántico, exceptuando parcialmente el estado de Tabasco. Del lado del Pacífico, las probabilidades son continuas desde el norte del estado de Oaxaca hasta el sur de los estados de Baja California y Sonora. Las zonas de mayor probabilidad (> 0.4), es decir, aquellas con índices de peligro *alto* a *muy alto*, se concentran en el sur de la Península de Baja California, la costa del Mar Caribe en Quintana Roo, y en una franja costera que va de Guerrero a Jalisco. Cabe destacar que estas zonas corresponden a las regiones de más reciente desarrollo turístico, incluyendo lugares como Cancún, la Riviera Maya, Los Cabos y Puerto Vallarta. La categoría *muy alto* cubre la mayor parte de la península de Yucatán, así como franjas costeras importantes de los estados del Pacífico, de Guerrero a Baja California Sur, además de porciones de los estados de Veracruz y Tamaulipas.

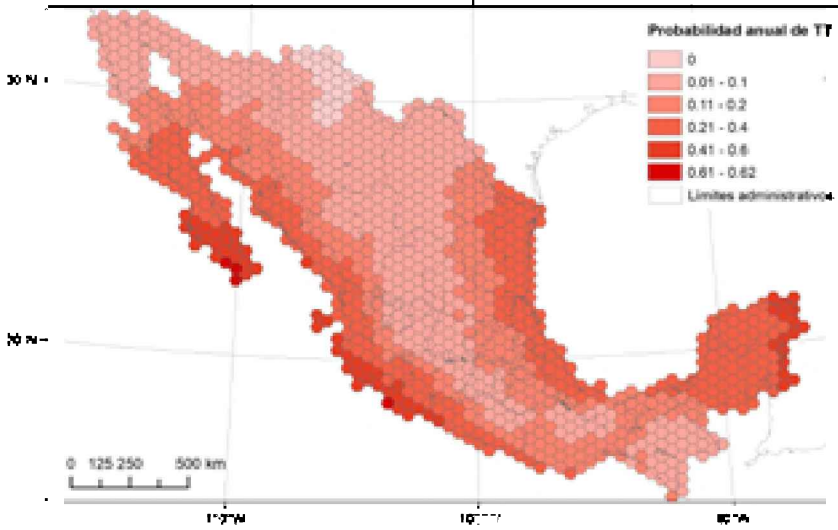


Figura 1. Probabilidad anual de tormentas tropicales (TT) para el periodo 1970-2020.

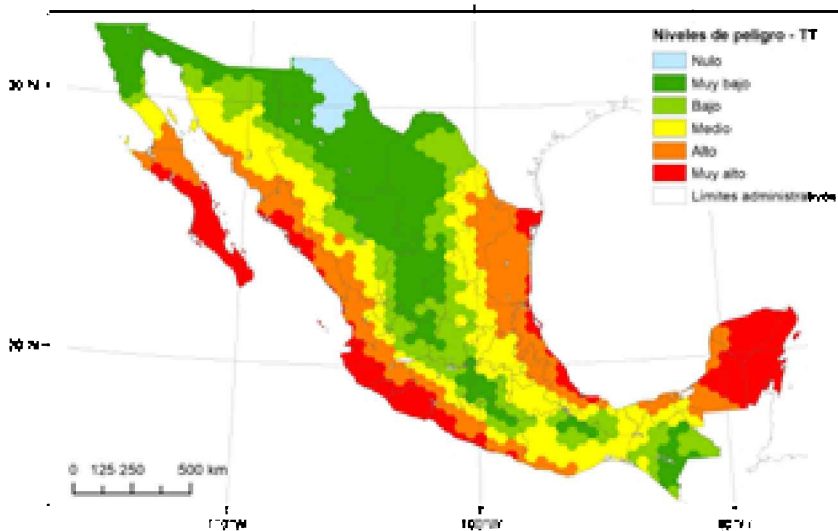


Figura 2. Índice de peligro asociado a TT.

Las probabilidades anuales de huracanes calculadas a partir de los registros de 1970 a 2020 (Figura 3) permiten observar cómo las cordilleras montañosas del país forman barreras naturales que obligan a una disipación rápida de los sistemas (Lin *et al.*, 2002),

impidiendo su permanencia con categoría de huracán en las zonas más continentales. En el mapa, esto se traduce en grandes zonas de probabilidad 0, es decir, donde el índice de peligro por vientos de huracán (IPH) es nulo (Figura 4). Otro de los efectos observados es cómo las condiciones locales más críticas pueden tener una disipación más lenta, igual que en la península de Yucatán, o menos amplitud, como en las planicies costeras de Tamaulipas y Sinaloa, donde se muestran niveles de peligro *medio* y *bajo*. Resalta que el estudio se ejecutó considerando los sistemas de ciclones tropicales a partir de 1970 para evitar el sesgo entre las dos cuencas oceánicas debido a las diferentes metodologías y la probable falta de registros en el Océano Pacífico antes de esta fecha. De hecho, es posible que existan registros de huracanes anteriores a 1970 en zonas para las cuales se calcularon probabilidades nulas; en consecuencia, es necesario considerar la eventualidad del peligro por huracanes para zonas de IPH nulo y niveles *medios* y *altos* de IPTT, como algunos autores lo han calculado para la cuenca mexicana del atlántico al consultar datos desde 1851 (Ihl, y Frausto, 2014).

La zona de mayor incidencia de huracanes es el extremo sur de la península de Baja California, el único lugar con hexágonos cuyas probabilidades de ocurrencia van desde 0.15 hasta 0.181. Tiene, por lo tanto, un IPH *muy alto* y comparte este carácter con sus cercanías: el sur de la costa del estado de Jalisco y Los Mochis en Sinaloa para la cuenca del Pacífico y el norte de Quintana Roo, Tuxpan, Veracruz, y la laguna Madre para la del Atlántico. Los niveles *altos* de IPH se encuentran cerca de los citados, así como en el centro y sur de Sinaloa, en la costa michoacana y cerca de Chetumal, Quintana Roo. Estas zonas de IPH *alto* y *muy alto* corresponden a las trayectorias más frecuentes de los ciclones tropicales.

Los lugares de mayor peligro coinciden con las que Ihl y Frausto (2014) denotaron para el Atlántico; no obstante, este trabajo permite ver condiciones de peligro más equiparables entre el norte de Tamaulipas, Tuxpan y el Caribe mexicano. Las discrepancias pueden ser el producto de diferencias metodológicas, sesgos en los registros anteriores a 1970 o de una acentuación de las frecuencias de sistemas en el Golfo de México durante la última década. Por otro lado, comparando los resultados obtenidos con aquellos presentados por Baeza Ramírez y Jiménez Espinoza (2016), se encuentran diferencias principalmente hacia el sur de la península de Yucatán y al norte de la península de Baja California. Nuevamente, tales discrepancias pueden asociarse a la diversidad metodológica, aunque también a las unidades de análisis, porque la escala municipal corresponde a la más empleada por diversos autores.

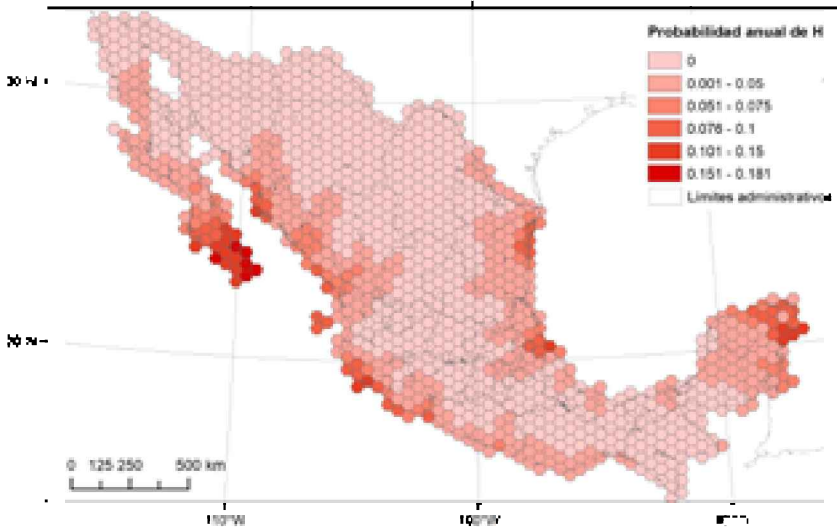


Figura 3. Probabilidad anual de huracanes (H) para el periodo 1970-2020.

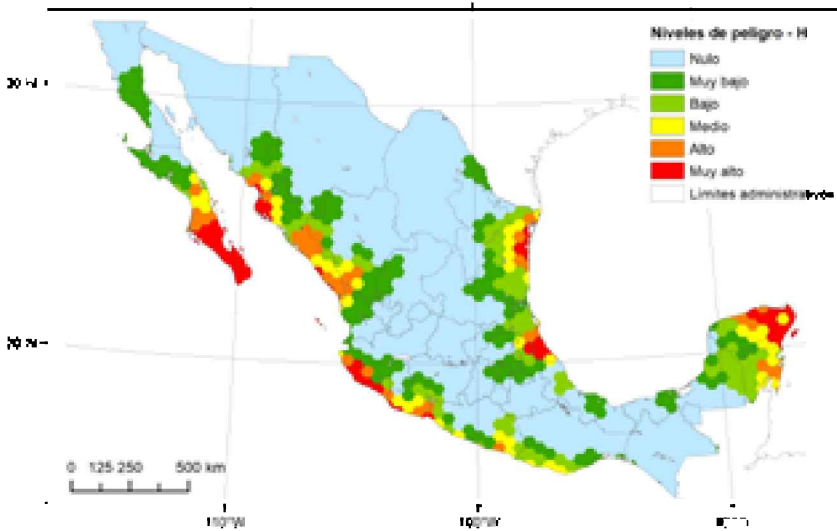


Figura 4. Índice de peligro asociado a huracanes (H).

VULNERABILIDAD

Derivado del análisis estadístico de las variables socioeconómicas y la construcción del índice ponderado, se trazó un mapeo de los niveles de vulnerabilidad ante ciclones tropicales en México (Figura 5). Como se mencionó anteriormente, el índice de vulnerabilidad fue el producto de cinco rubros: *características estructurales, educación, edad y movilidad, género y salud*.

Las características estructurales se refieren a la solidez, fuerza y resistencia con que están construidas las viviendas (por ejemplo, la deficiencia estructural se ve en casas de techos y paredes endebles), así como el acceso a los servicios básicos. El factor de educación se relaciona con los niveles de analfabetismo y el acceso a educación postbásica como contrapeso. La población vulnerable por edad y movilidad incluye a los menores de 5 años y mayores de 65, así como a aquellas personas con alguna discapacidad. El factor de género está relacionado con la porción femenina de la población; y el factor de salud, la cobertura de los servicios médicos.

La distribución de los niveles de vulnerabilidad tiene una clara correlación con el grado de marginación (CONAPO, 2020). En este sentido, se identifica el sur de México, comprendido por los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, como la región más vulnerable en el país. De igual forma, resaltan el sur de Chihuahua, el oeste y sur de Durango, el este de Nayarit, el sur de San Luis Potosí, el norte de Veracruz y el sur de Campeche. Un porcentaje considerable de estas regiones está habitado por pueblos indígenas, por ejemplo, los yaquis y tarahumaras en Chihuahua, los huicholes en Nayarit y los mayas en Campeche. Se destacan en este mismo rubro las regiones Huasteca entre Veracruz, Hidalgo y San Luis Potosí, la Selva Lacandona, los Altos de Chiapas, y las regiones Mixtecas en Oaxaca, donde el acceso a los recursos es limitado, por lo que gran parte de la población queda expuesta ante fenómenos peligrosos. La correlación entre pobreza, marginación, exclusión y vulnerabilidad social ha sido tema de amplia discusión en la bibliografía (Busso, 2005; Cardona *et al.*, 2012; Foschiatti, 2004), y actualmente se reconoce como una de las directrices en el estudio de los desastres.

Por otro lado, las regiones menos vulnerables se localizan principalmente sobre los territorios de más industrialización, desarrollo económico y densidad de población, así como actividad turística e inversión, pues el acceso a los recursos económicos permite procesos de recuperación acelerados y facilita el desarrollo de edificaciones menos endebles ante el impacto de amenazas naturales. Algunos ejemplos son La Paz y Los Cabos en Baja California Sur, Tijuana en Baja California, la región agrícola de Sinaloa, el corredor industrial de Guanajuato y Querétaro, la Zona Metropolitana del Valle de México y el municipio de Toluca en el Estado de México, Monterrey y sus conurbados en Nuevo León, Nuevo Laredo en Tamaulipas, y por supuesto, la costa del estado de Quintana Roo en el Caribe.

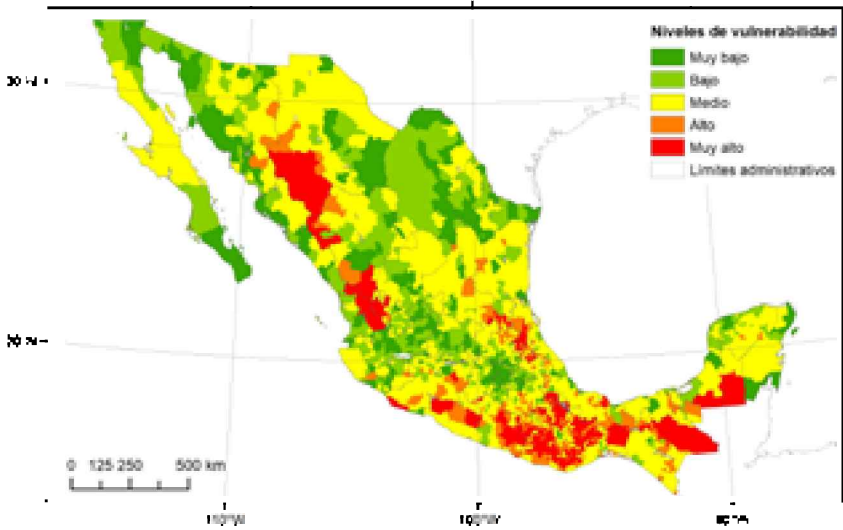


Figura 5. Índice de vulnerabilidad asociado a ciclones tropicales en 2020.

EXPOSICIÓN

Los niveles de exposición calculados a través de la densidad poblacional se muestran en la Figura 6. Al igual que la vulnerabilidad, se considera un elemento dinámico en el análisis del riesgo. Asimismo, diversos estudios señalan el importante rol del crecimiento poblacional en el aumento tanto de las pérdidas asociadas al impacto de fenómenos naturales como en el número de los desastres, principalmente en países en vías de desarrollo (Noji, 2005; Zhou *et al.*, 2014; Zúñiga y Villoria, 2018).

En la década de los 30, la población mexicana rondaba los 16 millones de habitantes. Para la década de 1970, la cifra alcanzó casi los 48 millones; posteriormente, a comienzos del presente siglo, dicho valor se duplicó con creces, superando los 97 millones de habitantes. Finalmente, el censo nacional de 2020 registró a 126 millones de personas. La explosión demográfica descrita constituye una posible explicación parcial del aumento en la ocurrencia de los desastres en el país.

Para el análisis aquí presentado, se pueden reconocer dos patrones fundamentales en la distribución de los altos niveles de exposición: en primer lugar, regiones aisladas, como Tijuana en Baja California, las Zonas Metropolitanas de Monterrey y Guadalajara en Nuevo León y Jalisco respectivamente, Juárez en Chihuahua, Benito Juárez en Quintana Roo y Mérida en Yucatán, entre otros; un segundo patrón corresponde a municipios co-

nurbados, principalmente sobre la región central del país, la Ciudad de México, el Estado de México, el sur de Morelos, la región central de Puebla, el sur de Tlaxcala, el corredor industrial de Guanajuato y Querétaro, etcétera. La distribución bimodal de los altos niveles de exposición corresponde a la concentración de las actividades económicas en pequeñas porciones del territorio nacional. En contraste, las extensiones del territorio que muestran niveles de exposición sumamente bajos, se asocian al limitado acceso de actividades económicas en la región, por ejemplo, en los estados de Chihuahua, Baja California, Baja California Sur, Durango, Zacatecas, Coahuila, Tamaulipas, Campeche y Quintana Roo.

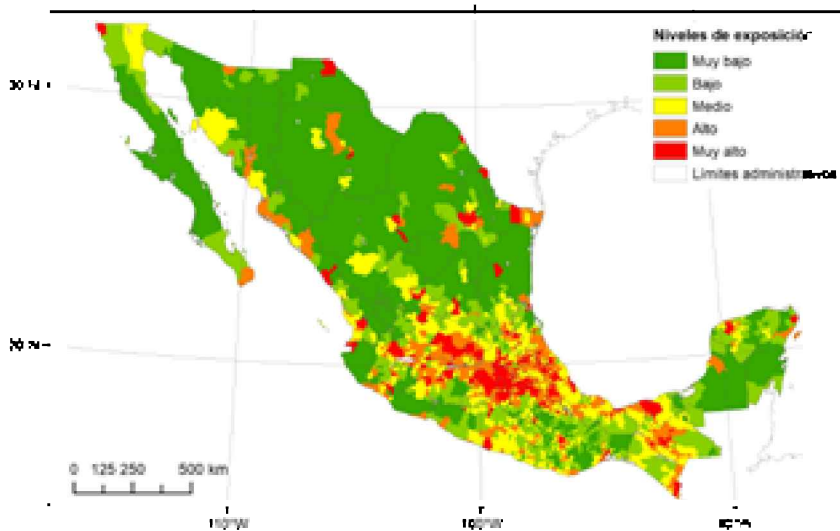


Figura 6. Índice de exposición en 2020.

RIESGO

Los niveles de riesgo reflejan la combinación entre vulnerabilidad, peligro y exposición. Los resultados de este trabajo permiten determinar los lugares con grandes poblaciones vulnerables a tormentas tropicales (Figura 7) y huracanes (Figura 8). Para el primer caso, el efecto del viento no constituye el factor principal de la amenaza, sino las fuertes lluvias aunadas a los sistemas, las cuales pueden generar inundaciones (Perevochtchikova y Lezama de la Torre, 2010) y deslizamientos (Lugo-Hubp *et al.*, 2005); se observan zonas críticas principalmente en Guerrero, Veracruz, Tierra Caliente en Michoacán, partes de Hidalgo, Puebla, Tabasco y el norte de Chiapas. Si bien estas ubica-

ciones no presentan los niveles más altos de probabilidad de ocurrencia de tormentas (Figura 1), sí poseen niveles de peligro y vulnerabilidad *altos a muy altos*.

Con este mismo patrón se incluyen municipios del estado de Yucatán, el más densamente poblado de la península. De hecho, algunos de los delimitados por esta investigación fueron de los que sufrieron mayores afectaciones por la tormenta Cristóbal en 2020, mientras otros en el noreste ostentan una vulnerabilidad *alta* (Soares Moraes *et al.*, 2011). La Riviera Maya, de acuerdo con los resultados del estudio, obtuvo bajos niveles de vulnerabilidad y, en consecuencia, se encuentra sujeta a riesgos *medios*. Solamente la ciudad de Cancún, ubicada en el municipio de Benito Juárez, muestra un riesgo *alto*, resultante de la combinación entre una frecuencia alta de tormentas tropicales y una densidad poblacional elevada. Al igual que esta cabecera municipal en Quintana Roo, son visibles en el mapa (Figura 7) municipios dispersos con niveles de riesgo *alto* y *muy alto* en Colima, Sonora y Tamaulipas, correspondientes a zonas de mayor urbanización y cercanas a las costas.

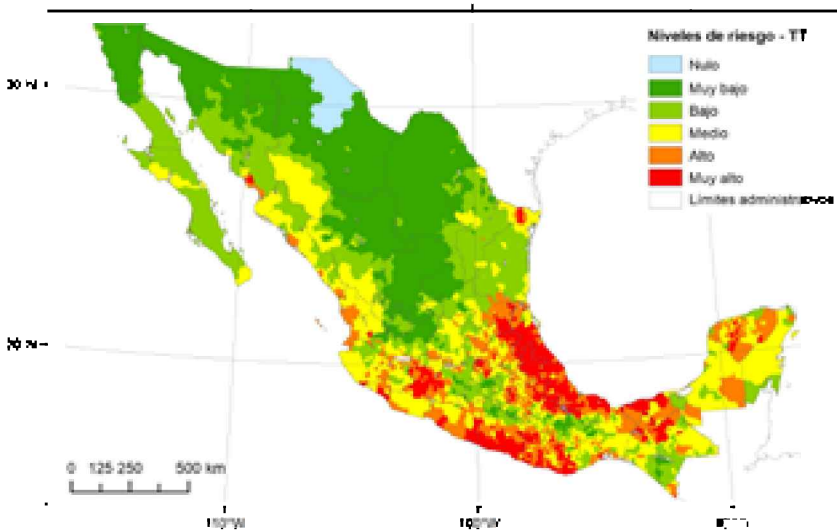


Figura 7. Índice de riesgo asociado a tormentas tropicales (IT).

El mapa del índice de riesgo relativo a huracanes (Figura 8) exhibe que, a pesar de experimentar la probabilidad de ocurrencia más alta, el extremo austral de Baja California Sur (Los Cabos) presenta un riesgo *alto* a causa de su baja vulnerabilidad y densidad poblacional moderada. Por otra parte, los municipios poco poblados del norte de Quintana Roo tienen asignado un riesgo *medio*, a diferencia del municipio de Benito Juárez, donde es *muy alto*; de hecho, este último es el único en presentar tal nivel de riesgo por

huracán y a la vez una vulnerabilidad *baja*. Otras localidades en esta misma categoría se ubican en zonas vulnerables de franjas costeras (Sonora, Sinaloa, Jalisco, Colima, Guerrero, Oaxaca y Yucatán) y zonas montañosas marginadas (entre Veracruz, Puebla y Guerrero). En términos generales, los niveles de riesgo más altos por huracanes se concentran en dos zonas para cada cuenca: en el Atlántico, el norte de la Península de Yucatán y el norte de Veracruz; en la cuenca del Pacífico, a lo largo de un corredor desde Oaxaca hasta Jalisco, y otro del norte de Nayarit al sur de Sonora.

Los resultados mostrados son coincidentes en cuanto a ubicaciones espaciales con los reportados por el CENAPRED en su sistema cartográfico de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos (Jiménez Espinoza *et al.*, 2012); no obstante, hay diferencias en los niveles reportados. Por ejemplo, el presente análisis tiende a subestimar, con respecto al CENAPRED, los niveles de riesgo para la península de Yucatán y sobrevalorar para la región de la Huasteca, al norte de Veracruz y al sur de Guerrero. Es importante mencionar que el CENAPRED agrupa la gama de ciclones tropicales, mientras que los resultados aquí mostrados distinguen entre vientos de tormenta tropical y huracán. Otra fuente de las discrepancias observadas podría estar relacionada con el uso de datos socioeconómicos más recientes (2020 para este estudio) y su impacto en las variables de exposición y, sobre todo, vulnerabilidad.

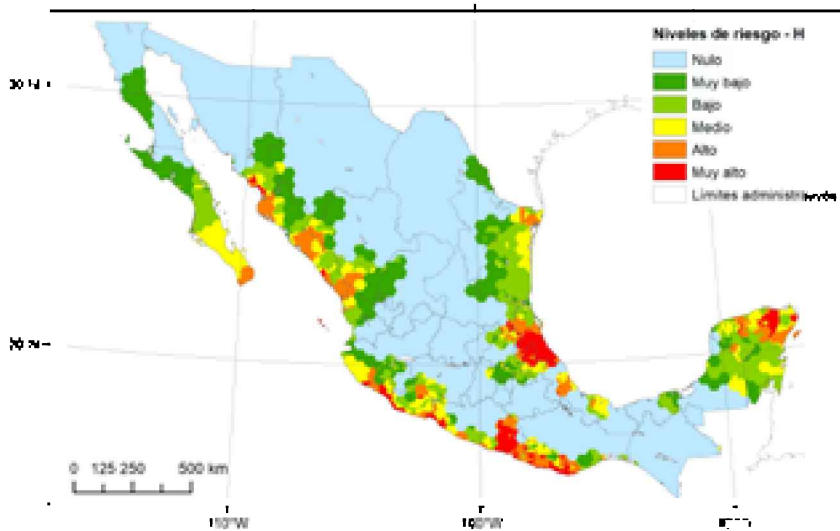


Figura 8. Índice de riesgo asociado a huracanes (H).

Los índices de peligro y, por consecuencia de riesgo, están derivados del análisis espacial de los campos de viento relativos a tormentas tropicales y huracanes; sin embargo, la

velocidad del viento, aunque determinante de la capacidad destructiva de los ciclones tropicales, no es el único factor importante. De hecho, la cantidad de lluvia depende más de la velocidad de traslación, del tamaño del sistema, de su historia de vientos previa al arribo y de la topografía subyacente (Touma *et al.*, 2019), y puede causar pérdidas económicas fuera de las zonas de vientos intensos (Xi *et al.*, 2020) o bien en ausencia de estos vientos en caso de depresiones tropicales. En este sentido, Ihl y Frausto (2014) destacaron la importancia de la cantidad de lluvias y de la velocidad de traslación en la magnitud de los desastres producidos por ciclones tropicales en la Península de Yucatán. Otro estudio reciente ha descrito el rol de los ciclones tropicales en la generación de eventos extremos de precipitación a lo largo de la costa del Pacífico, principalmente en el estado de Colima (León Cruz *et al.*, 2022). Asimismo, a nivel nacional se ha identificado cómo la variable de precipitación resulta fundamental al analizar el riesgo asociado a los ciclones tropicales en México (Domínguez *et al.*, 2021). Estudios relacionados con la precipitación y los campos de vientos como el aquí presentado, ofrecen una visión complementaria de los riesgos que los ciclones tropicales representan para el país.

CONCLUSIÓN

En esta investigación se graduó el riesgo asociado a vientos por ciclones tropicales en México a nivel municipal. A partir de los datos de las mejores trayectorias (IBTRACS) se determinó el nivel de peligro ante tormentas tropicales y huracanes (de categoría 1 o mayor en la escala Saffir-Simpson). El peligro se evaluó a partir de las probabilidades, de ocurrencia de las dos categorías de ciclones. El cálculo de estas probabilidades en un ámbito territorial, se desarrolló a partir de métodos de análisis espacial para la modelación de las zonas de impacto de los sistemas y para su conteo en una red homogénea. Los resultados muestran que el país puede verse afectado por tormentas tropicales a lo largo de las zonas costeras. También, los recurrentes patrones de trayectorias causan a algunas zonas un alto nivel de peligro ante huracanes, principalmente en el norte de Quintana Roo y el sur de la Península de Baja California.

La vulnerabilidad se estimó a través de indicadores socioeconómicos construidos a medida, un análisis estadístico multivariante y la generación de un índice ponderado. Finalmente, la densidad poblacional se utilizó para explicar la exposición. Dichas componentes del riesgo permitieron definir los niveles *nulo*, *muy bajo*, *bajo*, *medio*, *alto* y *muy alto*. El análisis factorial se mostró como una herramienta eficaz para la determinación de la vulnerabilidad asociada a ciclones tropicales en el país, pues da cuenta del 72 % del total de la varianza. Se observa una fuerte correlación entre la vulnerabilidad y los niveles de pobreza/marginación. También se identificó la correspondencia entre

las zonas vulnerables y las regiones donde se localizan los pueblos indígenas. El sur de Chihuahua, el oeste de Nayarit, el norte de Chiapas, el sur de Campeche y el estado de Oaxaca exhiben los niveles más altos de esta componente del riesgo. El índice de vulnerabilidad generado contiene variables directamente relacionadas con el peligro ante ciclones tropicales, como son los materiales de construcción de techos y paredes, y se encuentra actualizado por los datos socioeconómicos al año 2020. El cómputo de dicho medidor permitió identificar las regiones vulnerables ante ciclones tropicales que comúnmente quedan fuera de consideración dada su lejanía de los litorales.

Asimismo, el índice de exposición basado en las densidades poblacionales municipales registradas para el censo 2020, se integró con los índices de peligro y vulnerabilidad para la obtención de los índices de riesgo ante tormenta tropical y huracán. Las zonas serranas y costeras, particularmente en Guerrero y Veracruz, donde se puede encontrar población relativamente densa en condiciones de pobreza, están sujetas a los riesgos vinculados a huracanes y tormentas tropicales. Más aún, los municipios de relativamente reciente desarrollo turístico, como Cancún-Riviera Maya o Los Cabos, han tenido un crecimiento poblacional que les conlleva a experimentar altos o muy altos niveles de riesgo. Esta situación podría reforzarse por el atractivo de estas zonas (García de Fuentes *et al.*, 2019), a pesar de que han experimentado los efectos destructivos de “Wilma” y “Odile” respectivamente, los huracanes más costosos en términos financieros que se hayan registrado en México.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA302220. También, se agradece a Luis Carlos Martínez Romero por su apoyo técnico.

REFERENCIAS

- Apgar, J., y Yu, C. (2016). Neighboring zipcodes with a new distance mapping method for better accuracy. 2016 IEEE 13th International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2016.7479034>
- Baeza Ramírez, C., y Jiménez Espinoza, M. (2016). *Actualización de los índices de peligro y riesgo por presencia de ciclones tropicales a nivel municipal (para el periodo 1949-2015)*. Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/73.pdf

- Busso, G. (2005). Pobreza, exclusión y vulnerabilidad social. *Usos, limitaciones y potencialidades para el diseño de políticas de desarrollo y de población*, VIII Jornadas Argentinas de Estudios de Población (AEP). Tandil: Buenos Aires, 1–39.
- Cardona, O. D., Van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., Sinh, B. T., y Décamps, H. (2012). Determinants of risk: Exposure and vulnerability. En *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 65–108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>
- CENAPRED. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*. Secretaría de Gobernación México, DF. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf>
- CENAPRED. (2021). *Sistema de Consulta de Declaratorias 2000—2021*. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- CONAPO. (2020). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2020* [Nota técnica]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/671313/Nota_tecnica_IMEFM_2020.pdf
- CRED. (2017). EM-DAT, *The International Disaster Database*. EM-DAT, The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED. <http://www.emdat.be/>
- Dominguez, C., Jaramillo, A., y Cuéllar, P. (2021). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions?. *International Journal of Climatology*, 41, E3307-E3324. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>
- Elsner, J. B., Hodges, R. E., y Jagger, T. H. (2011). 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., y Jagger, T. H. (2013). *Hurricane Climatology: A Modern Statistical Guide Using R*. Oxford University Press, USA.
- Farfán, L. M., Alfaro, E. J., y Cavazos, T. (2013). Characteristics of tropical cyclones making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970–2010. *Atmósfera*, 26(2), 163–182. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71070-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71070-1)
- Foschiatti, A. M. H. (2004). Vulnerabilidad global y pobreza. Consideraciones conceptuales. *Revista Geográfica Digital*, 1(2), 1–20. <http://hdl.handle.net/11336/51214>
- García de Fuentes, A., Jouault, S., y Romero, D. (2019). Representaciones cartográficas de la turistificación de la península de Yucatán a medio siglo de la creación de Cancún. *Investigaciones Geográficas*, 100, 19. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.60023>

- García-Benítez, M., y Adame-Martínez, S. (2017). Propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad por ciclones tropicales en ciudades expuestas. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 19(2), 35–58. <https://quivera.uaemex.mx/article/view/9749>
- Guzmán Noh, G., y Rodríguez Esteves, J. M. (2016). Elementos de la vulnerabilidad ante huracanes. Impacto del huracán Isidoro en Chabihau, Yobain, Yucatán. *Política y cultura*, 45, 183–210. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=50188-77422016000100183&lng=es&synrm=iso
- Homewood, P. (2019). TROPICAL HURRICANES *In the age of global warming*. GWPf. <https://www.thegwpf.org/content/uploads/2019/01/Homewood-Hurricanes.pdf>
- Huyer, A. (1983). Coastal upwelling in the California current system. *Progress in Oceanography*, 12(3), 259–284. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(83\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0079-6611(83)90010-1)
- Ihl, T., y Frausto, O. (2014). El cambio climático y los huracanes en la Península de Yucatán. Frausto, O. *Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*. Chetumal, México: Universidad de Quintana Roo, 42-49.
- Jiménez Espinoza, M., Baeza Ramírez, C., Matías Ramírez, L. G., y Eslava Morales, H. (2012). *Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos*. Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Methodologias/Hidrometeorologico.pdf>
- Kamranzad, F., Memarian, H., y Zare, M. (2020). Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 430. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070430>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., y Schreck, G. J. (2018). *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4*. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/data/international-best-track-archive-for-climate-stewardship-ibtracs/v04r00/access/>
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., y Neumann, C. J. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying Tropical Cyclone Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), 363–376. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G., y Botzen, W. J. (2015). Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental science y policy*, 47, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013>
- Kron, W. (2002). Keynote lecture: Flood risk= hazard × exposure × vulnerability. *Flood defence*, 82–97. <http://www.civil.ist.utl.pt/~joana/DFA-riscos-net/2007-08/kron%20-%20oflod%20risk%20=%20hazard.pdf>
- Landsea, C. W. (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>

- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., Muir-Wood, R., Myeong, S., Moser, S., y Takeuchi, K. (2012). Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. En *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 25–64). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.004>
- Lee, H. S., Yamashita, T., y Mishima, T. (2012). Multi-decadal variations of ENSO, the Pacific Decadal Oscillation and tropical cyclones in the western North Pacific. *Progress in Oceanography*, 105, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.04.009>
- León Cruz, J., Díaz-Peón, A., y Rodríguez-García, H. (2022). Eventos extremos de precipitación en Colima, México (1981-2018). *Investigaciones Geográficas*, (107). <https://doi.org/10.14350/rig.60516>
- Lin, Y.-L., Ensley, D. B., Chiao, S., y Huang, C.-Y. (2002). Orographic Influences on Rainfall and Track Deflection Associated with the Passage of a Tropical Cyclone. *Monthly Weather Review*, 130(12), 2929–2950. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2929:OIORAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2929:OIORAT>2.0.CO;2)
- Liu, K. S., y Chan, J. C. L. (2013). Inactive Period of Western North Pacific Tropical Cyclone Activity in 1998–2011. *Journal of Climate*, 26(8), 2614–2630. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00053.1>
- Lomas Barrié, C. T., Hernández Cerda, M. E., y Azpra Romero, E. (2021). Cristóbal, la tormenta tropical del 2020 que dejó precipitaciones atípicas en la Península de Yucatán. *Entorno Geográfico*, 21, 125–156. <https://doi.org/10.25100/eg.voi21.11296>
- Lugo Hubp, J., Zamorano Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., y Alcántara-Ayala, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causas y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 17. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000200212yInsg=esynrm=iso
- Marín Monroy, E. A., Hernandez Trejo, V., Ojeda Ruiz de la Pena, M. A., Aviles Polanco, G., y Barbara, N. L. (2020). Assessment of socio-environmental vulnerability due to tropical cyclones in La Paz, Baja California Sur, Mexico. *Sustainability*, 12(4), 1575. <https://doi.org/10.3390/su12041575>
- McGlade, J., Bankoff, G., Abrahams, J., Cooper-Knock, S. J., Cotecchia, F., Desanker, P., Erian, W., Gencer, E., Gibson, L., y Girgin, S. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction 2019*. UN Office for Disaster Risk Reduction.
- Nederhoff, K., Giardino, A., van Ormondt, M., y Vatvani, D. (2019). Estimates of tropical cyclone geometry parameters based on best-track data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2359–2370. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2359-2019>
- Neumann, C. J. (1993). *Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean*, 1871-1992. (Vol. 6, No. 2). National Climatic Data Center.

- Noji, E. K. (2005). Disasters: Introduction and state of the art. *Epidemiologic reviews*, 27(1), 3–8. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxio07>
- Nordhaus, W. (2006). *The Economics of Hurricanes in the United States* (Núm. w12813; p. w12813). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w12813>
- Pebesma, E. J. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E. J., y Bivand, R. S. (2015). Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5(2). <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- Perevochtchikova, M., y Lezama de la Torre, J. 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>
- Pielke Jr, R. A., Rubiera, J., Landsea, C., Fernández, M. L., y Klein, R. (2003). Hurricane vulnerability in Latin America and the Caribbean: Normalized damage and loss potentials. *Natural Hazards Review*, 4(3), 101–114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:3\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(101))
- Pita, G. L., Pinelli, J.-P., Gurley, K. R., y Hamid, S. (2013). Hurricane vulnerability modeling: Development and future trends. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 114, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.12.004>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org>
- Romero-Vadillo, E., y Zaytsev, O. (2007). Tropical cyclone statistics in the Northeastern Pacific. *Atmósfera*, 20(2), 17. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8573>
- Shi, P., Ye, T., Wang, Y., Zhou, T., Xu, W., Du, J., Wang, J., Li, N., Huang, C., Liu, L., Chen, B., Su, Y., Fang, W., Wang, M., Hu, X., Wu, J., He, C., Zhang, Q., Ye, Q., ... Okada, N. (2020). Disaster Risk Science: A Geographical Perspective and a Research Framework. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(4), 426–440. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00296-5>
- Soares Moraes, D., Gutiérrez Montes, I., Romero Pérez, R., López Mera, R., y Pinto Decelis, G. (2011). *Capitales de la comunidad, medios de vida y vulnerabilidad social ante huracanes en la costa de yucateca: un acercamiento a través de la experiencia de San Felipe, Yucatán*. Serie técnica, Informe técnico no. 385. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica. Touma, D., Stevenson, S., Camargo, S. J., Horton, D. E., y Diffenbaugh, N. S. (2019). Variations in the Intensity and Spatial Extent of Tropical Cyclone Precipitation. *Geophysical Research Letters*, 46(23), 13992–14002. <https://doi.org/10.1029/2019GL083452>
- Vecchi, G. A., y Knutson, T. R. (2011). Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density. *Journal of Climate*, 24(6), 1736–1746. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>

- Xi, D., Lin, N., y Smith, J. (2020). Evaluation of a Physics-Based Tropical Cyclone Rainfall Model for Risk Assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 21(9), 2197–2218. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0035.1>
- Zhou, Y., Li, N., Wu, W., Wu, J., y Shi, P. (2014). Local spatial and temporal factors influencing population and societal vulnerability to natural disasters. *Risk analysis*, 34(4), 614–639. <https://doi.org/10.1111/risa.12193>
- Zúñiga, R. A. A., y Villoria, A. M. G. (2018). Desastres en México de 1900 a 2016: Patrones de ocurrencia, población afectada y daños económicos. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 42, e55. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.55>

Ofelia Andrea Valdés Rodríguez¹
Denise Freitas Soares de Moraes²

¹El Colegio de Veracruz

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

9

CAPÍTULO

**DESASTRES HIDROMETEOROLÓGICOS
EXTREMOS Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL
ESTADO DE VERACRUZ**

RESUMEN

El cambio climático exige nuevas estrategias para resolver problemas nacionales ante el incremento de los eventos hidrometeorológicos extremos y los riesgos de desastres. El objetivo de esta investigación es determinar los fenómenos hidrometeorológicos que más declaratorias por desastres registran en el estado de Veracruz, asimismo las posibles variaciones en temperatura y precipitación estatal y las políticas de protección civil hacia la participación ciudadana. Los resultados indican que las mayores afectaciones (81 %) se deben a lluvias, ciclones e inundaciones en municipios ubicados al norte y sur del estado. Desde 1985 la temperatura ha incrementado 0.02°C por año, mientras que la lluvia tiene un comportamiento oscilatorio. Pero a partir del 2013 se establece la participación social en la Ley Estatal de Protección Civil. Se concluye que desde el año 2000 las declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos han ascendido a razón de 2.3 por año y la temperatura ha aumentado 0.88°C , incrementando los riesgos de catástrofes. No obstante, la participación ciudadana en el sistema de Protección Civil aún es incipiente, por lo que se recomienda fortalecer este aspecto para reducir la vulnerabilidad a desastres.

Palabras clave: participación social, riesgos, Veracruz, vulnerabilidad.

ABSTRACT

Climate change demands new strategies to solve national problems due to the increase in extreme hydrometeorological events and disaster risks. The objective of this research is to determine the hydrometeorological phenomena with the highest number of disaster declarations in the state of Veracruz, the possible variations in temperature and state precipitation, and the civil protection policies towards citizen participation. The results indicate that the greatest effects (81%) are due to rains, cyclones and floods in municipalities located in the south and north of the state. Since 1985, temperature has increased 0.02°C per year, while rainfall has an oscillatory behavior. But only since 2013 has social participation been established in the State Civil Protection Law. It is concluded that since 2000 the declarations for hydrometeorological phenomena have increased at a rate of 2.3 per year and the temperature has increased 0.88°C , increasing the risks of catastrophes. However, citizen participation in the civil protection system

is still incipient, so it is recommended to strengthen this aspect in order to reduce vulnerability to disasters.

Keywords: social participation, risks, Veracruz, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS REGIONALES

Actualmente se reconoce que el cambio climático está ocasionando catástrofes severas en gran parte del planeta, y se teme que sigan proliferando especialmente en las regiones polares (IPCC, 2021). Para Latinoamérica y el Caribe, los modelos también pronostican incrementos sustanciales en las temperaturas máximas (Figura 1). Desde esta perspectiva, cabe mencionar que en el año 2000 se batiera récord de temperatura extrema a causa de estos desarrollos, especialmente en el norte de México, aunque con mayor incidencia de temperaturas cálidas que frías en todo el país; lo que también ha empeorado las categorías de huracanes que impactan a la región (OMM, 2021).

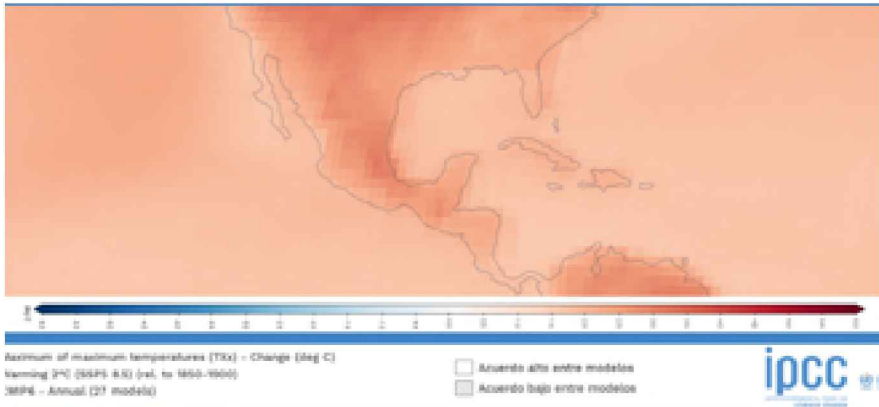


Figura 1. Incrementos en temperaturas máximas registrados en el periodo 1850-1900 en la región de México y el Caribe (IPCC, 2021).

Por su parte, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) ha establecido una serie de Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) para resolver problemáticas sociales y medioambientales, entre los que se encuentra el pronace de Energía y Cambio Climático (Conacyt, 2022). Sin embargo, la generación de proyectos apenas inició y aún se ignoran la situación estatal y la participación ciudadana en la protección civil para enfrentar las consecuencias del cambio climático, especialmente en los estados más vulnerables, donde se presentan de manera conjunta fenómenos hidrometeorológicos diversos.

VERACRUZ POR SU UBICACIÓN Y SU CLIMA ANTE LOS FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS

El estado de Veracruz se caracteriza por su diversidad climática, producto de su localización geográfica y orografía (Figura 2). Dispuesta sobre la llanura costera del Golfo de México, las Sierras y el eje Neovolcánico (INEGI, 2020; Moreno Casasola y Sánchez Vigil, 2014), por ello se experimentan cambios climáticos notables, desde los cálidos subhúmedos hasta los fríos de alta montaña. Aunque más del 94 % del territorio posee climas cálidos, las regiones montañosas registran templados, secos y fríos. Tal diversidad da origen a fenómenos hidrometeorológicos como ciclones tropicales, lluvias excesivas, heladas y sequías, cuya ocurrencia causa daños más allá de la capacidad financiera y operativa local, generando declaratorias de desastres (CENAPRED, 2021). No obstante, faltan análisis sobre las incidencias de estos fenómenos y su posible relación con el cambio climático. Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento de los fenómenos que han desencadenado declaratorias de desastres para establecer cuáles ocasionan los desastres más recurrentes. Asimismo, se debe averiguar si existen variaciones detectadas por los sistemas de monitoreo estatales, para evaluar sus posibles implicaciones sobre el comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos y cómo, a su vez, podrían impactar sobre la población de la entidad.

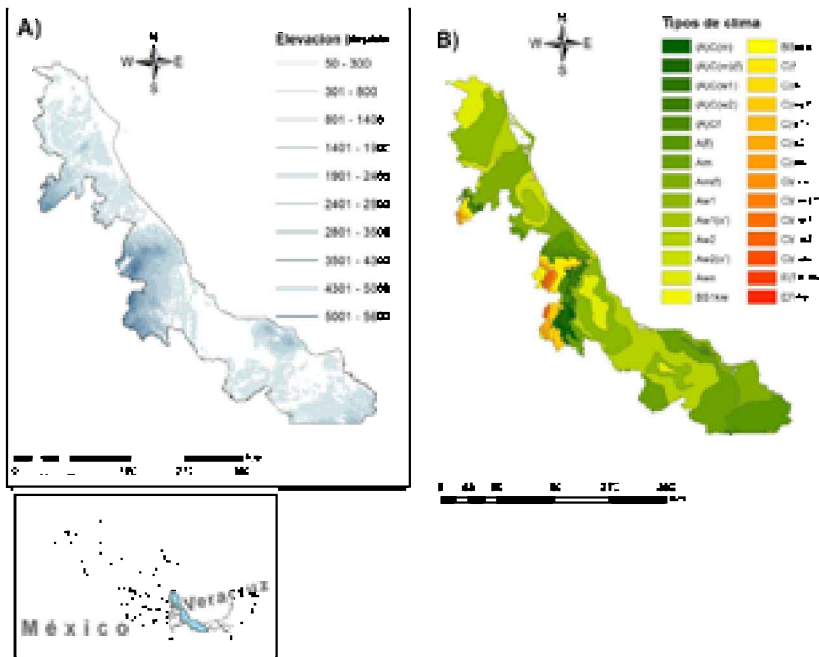


Figura 2. Ubicación del estado de Veracruz, A) hipsometría y B) climatología.

Fuente: INEGI (2018).

El objetivo de esta investigación es determinar los fenómenos que registran el mayor número de declaratorias de desastres en la entidad veracruzana, las variaciones en temperatura y precipitación estatal y las políticas de protección civil hacia la participación ciudadana.

METODOLOGÍA

BASES DE DATOS CONSULTADAS

Las catástrofes que aquejan al estado de Veracruz se localizaron en la base de datos del Sistema Nacional de Consulta de Declaratorias (CENAPRED, 2021); se consultó esta fuente para el periodo 2000 al 2020 ya que era el rango más amplio disponible al inicio de la investigación.

Para analizar los datos históricos climáticos se aprovecharon las bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021a) y los resúmenes mensuales de temperatura y lluvia desde 1985 hasta 2020, mismos que se complementaron con los datos emitidos por el Monitor de Sequía de México (SMN, 2021c). Con la información se elaboraron gráficos de tendencia mediante funciones de regresión lineal ($y = a + bx$) y cuadrática ($y = a + bx + cx^2$) para determinar el patrón de los fenómenos en el tiempo. Los resultados contrastaron con los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los datos más recientes reportados por el SMN, así como las investigaciones realizadas por expertos en el estado de Veracruz. Adicionalmente se consultó el Atlas Estatal de Riesgos de Veracruz (SPC, 2020) y la reglamentación de la Secretaría de Protección Civil del Estado para evaluar los aspectos de la protección civil, la prevención y la participación ciudadana.

ANÁLISIS GEOESPACIAL

Para evaluar los desastres desde una aproximación espacial, se realizaron los mapas de localización de las seis declaratorias más recurrentes por municipio y por número de ocurrencias, así como el número de declaratorias totales por municipio. Se consideraron también fenómenos similares y contrastantes (lluvias, ciclones e inundaciones contra sequías y temperaturas extremas) para determinar los municipios afectados por múltiples fenómenos, así como su relación con los niveles de precipitación y sequía registrados en las normales del SMN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FENÓMENOS QUE AFECTAN AL ESTADO DE VERACRUZ

La Tabla 1 muestra las principales declaratorias emitidas en Veracruz y el número de municipios afectados de acuerdo con las estadísticas del CENAPRED (2021). Los fenómenos que más desastres generan se pueden dividir en tres categorías:

1. Por exceso de agua (lluvias, ciclones tropicales e inundaciones).
2. Por temperaturas bajas (nevadas, heladas, granizadas y temperaturas bajas).
3. Por calor y déficit de agua (sequía y temperatura extrema).

El mayor número de desastres son ocasionados por el exceso de agua: las lluvias (que afectan al 100 % de los municipios), ciclones tropicales (99 %) e inundaciones (42 %); en segundo lugar se encuentran las bajas temperaturas, nevadas y granizadas (89 %) y finalmente las sequías y temperaturas extremas (81 %). Los deslizamientos, hundimientos, sismos y mareas rojas representan el menor porcentaje de ocurrencia y sus causas principales (excepto por los sismos) pueden deberse al factor humano agravados por cambios climáticos (Rodríguez Hernández *et al.*, 2020).

Tabla 1. Declaratorias de desastre en el estado de Veracruz desde 2000 hasta 2020.

FENÓMENO	DECLARATORIAS	PORCENTAJE DEL TOTAL	NÚMERO DE MUNICIPIOS AFECTADOS
Lluvias	2 526	46.7	212
Ciclones	1 552	28.7	211
Inundaciones	309	5.7	89
Sequías	233	4.3	118
Nevadas, heladas y granizadas	227	4.2	78
Bajas temperaturas	217	4.0	110
Fuertes vientos	161	3.0	94
Temperaturas extremas	102	1.9	53
Otros (deslizamientos, hundimientos, deslizamientos, sismos y mareas rojas)	62	1.5	59

Fuente: CENAPRED (2021).

TENDENCIAS HISTÓRICAS DE LAS CATÁSTROFES

Según los registros del CENAPRED (2021), las declaratorias por catástrofes debidas a lluvias tendían a incrementar hasta el año 2015, pero desde 2016 han menguado, igual que las causadas por ciclones tropicales a partir del 2013 (Figura 3A). Este comportamiento, no obstante, es impredecible debido al carácter multifactorial, que los modelos climáticos aún no pueden estimar (Moncilo *et al.*, 2019). De acuerdo con el IPCC (2021), el cambio climático está alterando los patrones de precipitación, intensificándolos en latitudes altas y atenuándolos en el subtropical, donde se localiza la mayor parte del estado de Veracruz.

Las declaratorias por bajas temperaturas han tendido a la baja desde 2006, y desde el 2015 por nevadas (Figura 3B). Por consiguiente es congruente al incremento de temperatura registrado en México y el Caribe desde finales del siglo pasado, el cual se atribuye a los gases de efecto invernadero (OMM, 2021). Del mismo modo, a nivel nacional, el número de días con bajas temperaturas y heladas no muestran tendencia a incrementar, de acuerdo con el último reporte del SMN (CGSM, 2020).

Por otra parte, la sequía tiene un comportamiento oscilatorio que alcanzó su pico máximo en 2019 con tendencia a incrementarse (Figura 3C). La situación reafirma los efectos derivados de los incrementos de temperatura registrados en la región, de acuerdo con el informe del IPCC (2021). En el resto del país, aunque 2020 fue menos seco que 2019, todavía se registró un déficit de precipitación de 2.7 % respecto a 1981-2010, según la Coordinación del SMN (2020). Este organismo indica que las temperaturas a nivel nacional manifiestan una tendencia al alza, con un promedio de 1.5 °C con referencia a una línea base que parte de 1953.

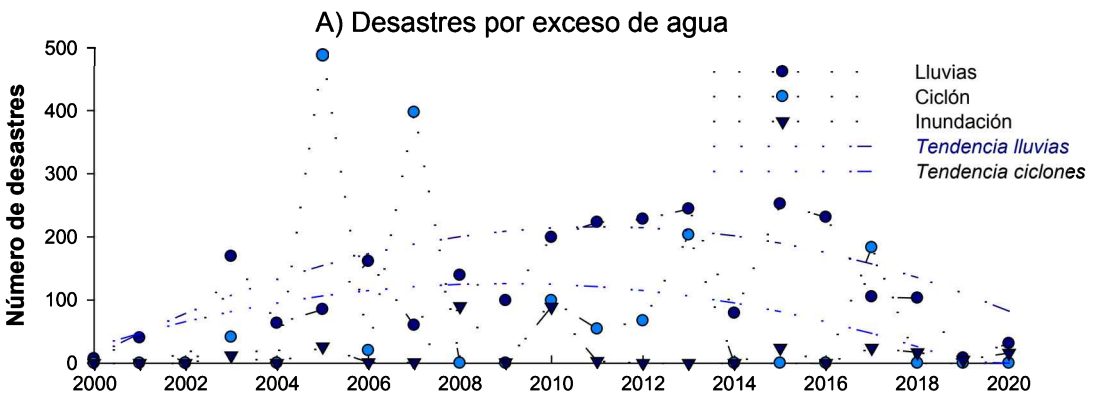


Figura 3. Histórico de los desastres con mayor número de declaratorias registrados por el Sistema de Consulta de Declaratorias de Desastre para el estado de Veracruz.

Fuente: CENAPRED (2021).

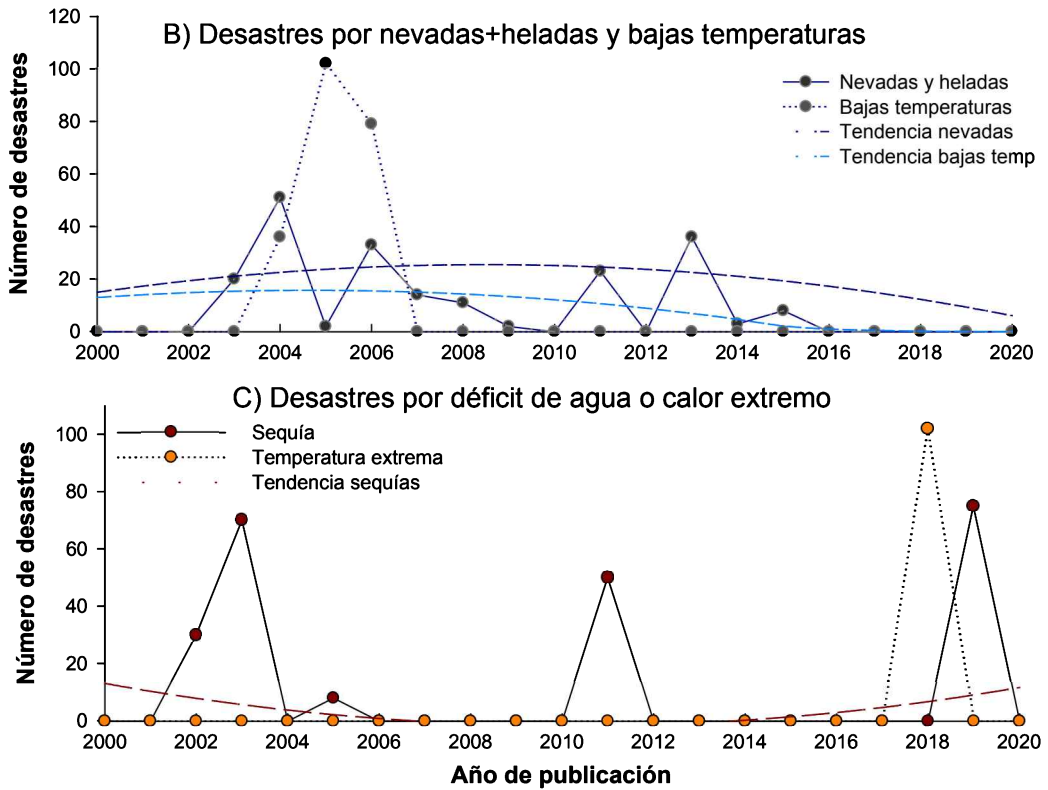


Figura 3 (Continuación). Histórico de los desastres con mayor número de declaratorias registrados por el Sistema de Consulta de Declaratorias de Desastre para el estado de Veracruz.

Fuente: CENAPRED (2021).

LOCALIZACIÓN DE LOS DESASTRES POR MUNICIPIO

Se han registrado (en todos los municipios) desastres por lluvia, que en su mayoría se concentran en el sur de la entidad. Los ciclones tropicales han afectado en su mayoría a los municipios del centro al norte; por su parte, el mayor número de inundaciones se localiza en el sur del estado. Esta situación responde la orografía e hidrografía de la región, ya que en el sur fluyen los ríos más caudalosos del estado y descansan amplias extensiones de zonas inundables y pantanosas (Medina Chena *et al.*, 2010). En este sentido, el Atlas Estatal de Riesgos (SPC, 2020) indica precipitaciones anuales acumuladas de más de 2000 mm para la región sur y más de 3000 mm hacia el suroeste.

Por otra parte, las temperaturas bajas con heladas y granizadas han generado desastres en los municipios del centro occidente (regiones montañosas) y del norte del estado. Estos resultados se relacionan con la ubicación de los sitios afectados. En la región

montañosa más alta, donde se localiza el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba, con alturas de 4000+ msnm, los climas son fríos (INEGI, 2020), durante el invierno se desencadenan con heladas y nevadas, lo cual coincide con el mayor número de declaratorias en estas regiones. A su vez, el Atlas Estatal de Riesgos (SPC, 2020) marca alturas superiores a los 1000 m en la región centro oeste y una franja colindante al estado de Hidalgo, que coincide con las bajas temperaturas declaradas allí (Figura 4).

Finalmente, las sequías y las temperaturas extremas se localizan mayormente en los municipios del norte del estado, donde se considera cálido subhúmedo, con temperaturas medias entre 22 y 26 °C, veranos húmedos e inviernos secos (INEGI, 2020). Dentro de esta clasificación existen tres subcategorías, de las cuales Awo, la más seca, se ubica al norte y parte de la llanura central del estado (Soto *et al.*, 2006), coincidiendo con la elevada cantidad de desastres por sequía en los municipios del norte y parte del centro sin embargo en el sur se han emitido declaratorias por sequía, lo que puede estar relacionado con cambios climáticos locales. A este respecto, el Atlas Estatal de Riesgos considera al suroeste del estado como territorio de sequías fuertes, por otro lado en el centro se consideran riesgos de sequías muy fuertes y en el norte riesgos por sequías severas (SPC, 2020).

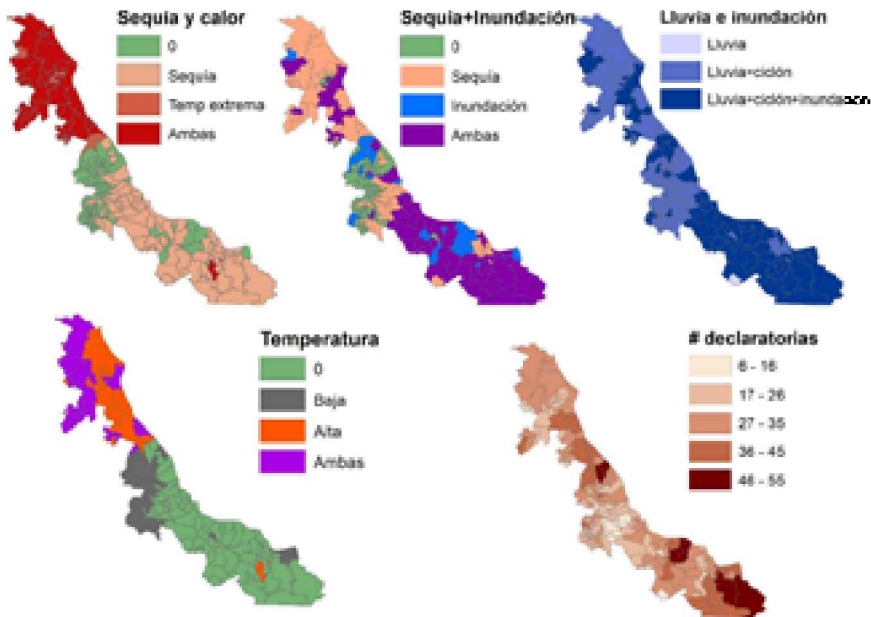


Figura 4. Fenómenos hidrometeorológicos que han desencadenado declaratorias de desastre en el estado de Veracruz desde 2000 hasta 2020. Fuente: CENAPRED (2021).

ANÁLISIS DE FENÓMENOS CONJUNTOS

El análisis de las declaratorias de desastre agrupadas permite visualizar cuáles municipios sufren desastres por fenómenos extremos tanto de sequía como de lluvias e inundaciones (Figura 5). En el norte del estado los municipios han emitido declaratorias por sequía y calor extremo, así como por temperaturas altas y bajas. En el sur se acumulan lluvias, ciclones e inundaciones, aunque también se han hecho declaratorias por sequías.

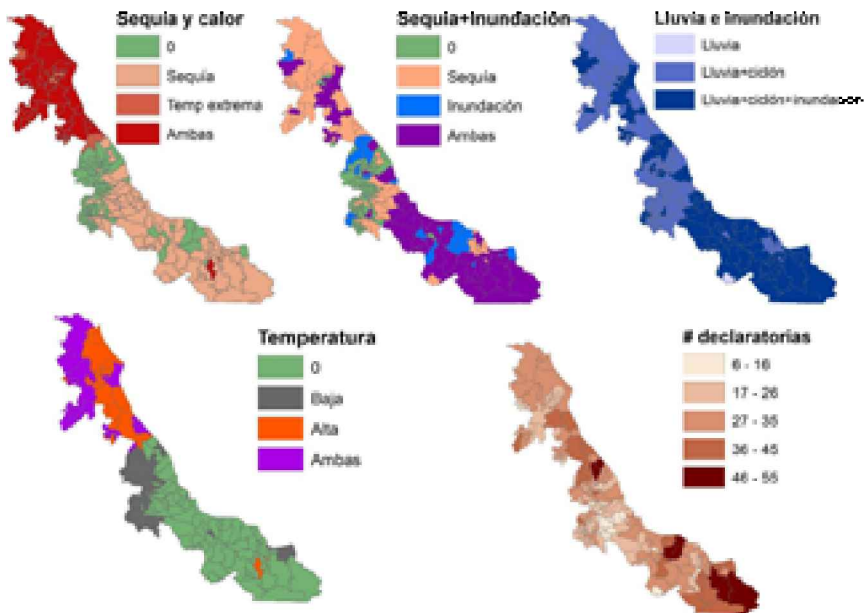


Figura 5. Declaratorias de desastres por fenómenos hidrometeorológicos conjuntos y número de declaratorias totales por municipio del estado de Veracruz desde 2000 hasta 2020. Fuente: CENAPRED (2021).

PRECIPITACIÓN Y SEQUÍA

De acuerdo con el SMN (2021d), la precipitación acumulada en el estado de Veracruz sobrepasa los 1000 mm anuales en más del 75 % del territorio, razón por la cual la entidad se encuentra entre las que mayor precipitación reciben en todo el país (INEGI, 2020). En la Figura 6A se observa que los municipios al sur y algunos al centro oeste reciben niveles de más de 2000 mm de lluvia acumulada anual, lo cual coincide con el alto número de declaratorias por lluvias e inundaciones en estos sitios. Por el contrario, al norte (en los municipios de Pánuco, Pueblo Viejo y Tampico Alto) y al occidente y centro del estado (Perote y Paso de Ovejas) se encuentran las regiones con menor preci-

pitación, con 600 mm o menos acumulada al año, pero estas apenas representan el 7 % del territorio estatal. En el 2019, se registraron los mayores niveles de sequía en el estado (Figura 6B), con 211 municipios afectados en algún nivel, que fue desde *anormalmente seco* (D0) hasta *excepcionalmente seco* (D4). Los meses que mayormente presentaron sequías fueron desde julio hasta octubre de 2019 (SMN, 2021c), razón por la cual se registró el número más elevado de declaratorias de desastre por sequía desde el año 2000.

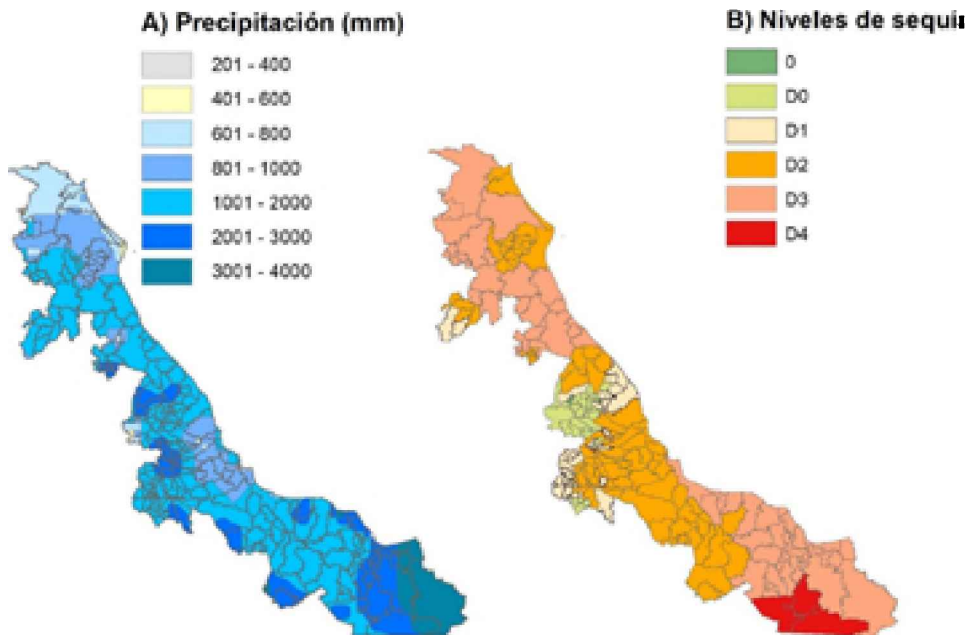


Figura 6. Rangos de precipitación anual acumulada (normales 1981-2010) y niveles más altos de sequía por municipio registrados en 2019 en el estado de Veracruz. D0: *anormalmente seco*, D1: *sequía moderada*, D2: *sequía severa*, D3: *sequía extrema*, D4: *sequía excepcional*.

Fuente: SMN (2021d, 2021c).

MUNICIPIOS CON MAYOR NÚMERO DE DECLARATORIAS DE DESASTRES

Los cuatro municipios con mayor número de declaratorias se localizan al sur, y los dos que siguen se ubican al centro-norte del estado. Todos han padecido declaratorias debidas a lluvias, ciclones e inundaciones, y cinco de ellos también por sequía; ninguno por temperaturas bajas, granizadas ni heladas. Por lo anterior, puede decirse que el estrés hídrico, por exceso o déficit de agua (De la Rosa *et al.*, 2021) es el problema más recurrente. Es evidente que estos municipios son vulnerables a lluvias extremas, pero también a sequías extremas, de tal manera que su riesgo de desastres es más severo. En este sentido, merece atención especial el municipio de Las Choapas debido a que posee un

grado alto de marginación (INEGI, 2021) y está sujeto a numerosas catástrofes. Al respecto, su Atlas de Riesgos (PC, 2011) destaca que, como el sitio se encuentra entre dos grandes cuencas hidrológicas, es vulnerable a inundaciones periódicas, aunque también tiene riesgos por sequías. No obstante, dicho documento presenta datos poblacionales de 2005 y registros de desastres hasta 2009, lo que pone de manifiesto su obsolescencia. De la misma forma, las demás cabeceras tampoco muestran sus Atlas de Riesgos actualizados, ni estos están disponibles en ningún sitio en línea. Además, aunque las catástrofes más recurrentes están identificadas en el Atlas Estatal de Riesgos (SPC, 2020), no se observa mejoría como resultado de medidas de prevención.

Tabla 2. Características de los municipios con el mayor número de declaratorias de desastre desde el año 2000 hasta 2020.

MUNICIPIO	NÚMERO DE DECLARATORIAS	LLUVIAS, CICLONES E INUNDACIONES	SEQUÍA	NÚMERO DE HABITANTES	GRADO DE MARGINACIÓN	ATLAS DE RIESGOS†
Santiago Tuxtla	55	54	1	57 085	Medio	†2011
Las Choapas	54	52	2	81 080	Alto	2011
Minatitlán	54	50	2	144 776	Muy Bajo	2015
San Andrés Tuxtla	48	46	0	162 428	Medio	2011
Misantla	46	46	0	65 761	Bajo	2011
Nautla	46	43	2	10 130	Medio	2011

†Año de publicación del documento.

Fuentes: CENAPRED (2021), CONAPO (2021).

TENDENCIAS HISTÓRICAS DE PRECIPITACIÓN

Los datos históricos de lluvia para el estado de Veracruz registrados en el SMN (2021b) indican un comportamiento oscilatorio en la precipitación estatal anual acumulada (Figura 5A), con una tendencia lineal a la baja desde 2005. Sin embargo, esta oscilación obstaculiza las predicciones, pues de ella dependen varios factores asociados al cambio climático (IPCC, 2021); además, no hay un monitoreo completo debido a la escasez de estaciones climatológicas activas en la entidad (Luna Díaz Peón *et al.*, 2018; SMN, 2021a).

La Figura 5B permite observar una tendencia de cambio con incrementos de las precipitaciones durante los meses de secas y decremento durante los de lluvias. Si se considera que enero es un mes de escasa precipitación, mientras que septiembre de precipitación abundante (Ruiz Barradas *et al.*, 2010), el cambio de patrones implica afectaciones

en los ciclos de cultivo y cosecha que los productores del estado planifican cada año. De tal forma, los retrasos en las precipitaciones agravan las dificultades de la agricultura de temporal, practicada en 210 municipios del estado (SIAP, 2021); a su vez, multiplicará las declaratorias por desastre relacionadas con las sequías cuando el periodo se retrase.

El último reporte del SMN (CGSM, 2020) indica que en 2020 la sequía disminuyó comparado con 2019 en el territorio mexicano, aunque aún se registraron niveles de sequía preponderantes en los meses de enero a mayo, sobre todo en el norte del estado. Por otro lado, un estudio sobre niveles de sequía en el estado encontró que se han intensificado en los años recientes (Valdés Rodríguez *et al.*, 2021). Quedan ratificadas las predicciones del IPCC sobre el aumento de los fenómenos extremos, o sea, lluvias abundantes pero espaciadas y periodos de secas prolongados (IPCC, 2021).

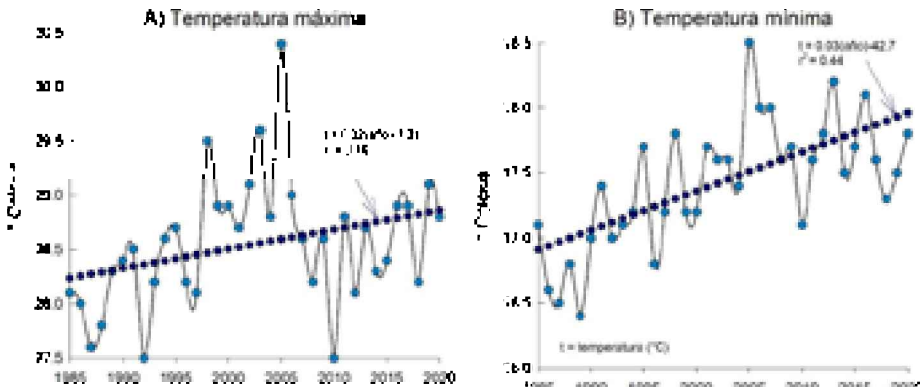


Figura 7. Precipitación anual acumulada en el estado de Veracruz para el periodo 1985-2020 y su distribución mensual durante enero y septiembre. Las líneas punteadas que atraviesan los puntos representan la tendencia de los datos. Fuente: SMN (2021a).

TENDENCIAS DE TEMPERATURA

Los registros históricos desde 1985 hasta el 2020 indican que la temperatura máxima promedio en la entidad tiene una pendiente positiva de aproximadamente $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año, mientras que la mínima, de $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año (Figura 6). Estos resultados implican un aumento de temperatura promedio de $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el estado de Veracruz desde 1985, lo cual confirma lo reportado por el IPCC para México y el Caribe (2021). La tendencia puede estar asociada con las declaratorias de desastre por olas de calor registradas por CENAPRED (2021) en 2018 en cinco municipios del norte del estado, cuando la temperatura mínima estatal fue $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior a los registros de 1985, de acuerdo con el SMN (2021a).

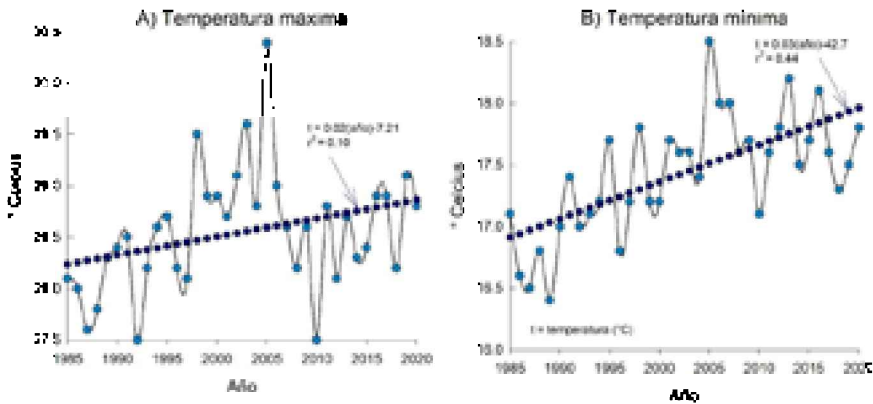


Figura 8. Históricos y tendencias de temperaturas máxima y mínima promedio registradas en el estado de Veracruz durante el periodo de 1985 a 2020. Fuente: SMN (2021a).

LAS POLÍTICAS DE PROTECCIÓN CIVIL Y LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA EN EL ESTADO DE VERACRUZ

Las experiencias en políticas de protección civil en México iniciaron en 1966, con el Plan DN-III para atender catástrofes importantes, mientras que el Sistema Nacional de Protección Civil (PC) inició en 1986. Así, el primer ordenamiento de PC fue publicado hasta el año 2000, y la actual Ley General de Protección Civil se promulgó en 2012. En esta ley se contempla ya la participación empresarial y social (Ramírez Sánchez, 2018). El reglamento vigente en el estado de Veracruz se publicó en 2013 (Gobierno del Estado de Veracruz, 2013), y en él se contempla el derecho a solicitar a discreción la intervención de PC, con lo cual los ciudadanos pueden ser sujetos activos en la prevención de riesgos.

Sin embargo, es hasta 2017 cuando a nivel nacional se reforman varios artículos de la Ley para incluir a grupos ciudadanos voluntarios en actividades especializadas en protección civil (Ramírez Sánchez, 2018); más allá de únicamente solicitar apoyo, se permite a la sociedad civil organizarse para realizar tareas que antes solo competían a las autoridades de PC. No obstante, los desastres siguen presentándose en el estado —en las mismas regiones y municipios— como consecuencia de los fenómenos hidrometeorológicos, lo cual evidencia la ausencia de medidas estratégicas para prevenirlos y la falta de capacitación a la población en general.

También es claro que el estado ha permitido una construcción social de vulnerabilidad, producto de procesos de exclusión social que han propiciado condiciones para que los eventos hidrometeorológicos ocasionen desastres. En este sentido, es importante que las autoridades del sistema estatal de Protección Civil incentiven la participación en todos los niveles de la población, tal como contempla la Ley. Hace falta diseñar e

implementar políticas participativas donde se tomen en cuenta las necesidades y demandas concretas a nivel local y se parta de las manifestaciones de vulnerabilidad según cada territorio, retomando las experiencias y conocimientos de los actores sociales locales (IPCC, 2018). Solo de ese modo se podrá incrementar la resiliencia, al brindar recursos para que las poblaciones puedan adaptarse con mayores posibilidades de éxito al cambio climático

En relación con las políticas estatales de prevención de Protección Civil, también debe hacerse una evaluación crítica del Atlas de Riesgos estatal (SPC, 2020), ya que no hay evidencia de una participación ciudadana en su conformación, y su versión en línea no muestra la evolución histórica de los fenómenos hidrometeorológicos que han impactado al estado (lo cual permitiría a cualquier investigador estimar con más precisión los riesgos futuros). En los Atlas de Riesgos de los municipios sí se presentan datos históricos, pero estos no se encuentran disponibles en las páginas de PC de sus municipios y están desactualizados, por lo que se desconoce la evolución de los riesgos a la fecha.

Esta breve aproximación a los desastres derivados de fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Veracruz y el papel de la participación social en la reducción de la vulnerabilidad y de los riesgos de desastres permite expresar algunos comentarios de naturaleza preliminar. En primer lugar, desde el referente conceptual, hay que acercar disciplinas de corte técnico (climatología) y de índole social (sociología y ciencias políticas) para alcanzar una comprensión integral de los desastres y el papel que pueden jugar los actores sociales en su reducción, en la medida en que se articula la lógica climática y meteorológica con el campo de las políticas públicas. En segundo lugar, es evidente que los desastres, si bien tienen un componente climático evidente y definido, se originan e impactan en espacios debidamente contextualizados, por lo que es necesario un cambio paradigmático en el diseño de las políticas públicas hacia una territorialización, con el fin de priorizar las realidades locales. En tercer lugar, es menester la coordinación intersectorial para la implementación de políticas que reduzcan la vulnerabilidad y fortalezcan la resiliencia, para que los grupos sociales enfrenten los fenómenos naturales con mejores herramientas.

Por último, Soares y Nogueira (2020) afirman que, para que una amenaza se transforme en un problema público, los actores sociales y estatales deben valorar la situación como “grave”, y ello requiere una articulación de las percepciones y prácticas de la sociedad civil con las acciones gubernamentales, para finalmente arribar a la construcción de una política pública. Estos procesos son de largo plazo, y se basan en la capacidad de construir sociedades más justas, equitativas, con sentido de solidaridad, y en el involucramiento participativo de la ciudadanía. El cambio climático se presenta como una ventana de oportunidad para avanzar en este sentido, si queremos inaugurar, a partir de esta crisis, un círculo virtuoso de participación-reducción de la vulnerabilidad-disminución de desastres.

CONCLUSIONES

El estado de Veracruz, por su ubicación geográfica y su orografía, es un territorio vulnerable a fenómenos hidrometeorológicos que han ocasionado desastres a lo largo de su historia. Los registros estatales oficiales manifiestan una constante en declaratorias de desastres por lluvias, inundaciones y ciclones, al igual que un incremento en sequías y altas temperaturas, con un ligero decremento en desastres por bajas temperaturas, nevadas y granizadas. Los datos se acompañan con una tendencia al alza de temperaturas máximas y mínimas, así como variaciones en los periodos de ocurrencia de las lluvias en todo el territorio. Lo anterior indica que el estado sufre afectaciones por cambios climáticos; sin embargo, el Sistema Estatal de Protección Civil es relativamente reciente y algunos sistemas de prevención local, tales como los Atlas de Riesgos municipales, no están actualizados. Adicionalmente, la participación ciudadana en todos los niveles es casi nula.

En este sentido, es imprescindible implementar estrategias de prevención y mitigación de daños que consideren no solo la visión de expertos y científicos, sino también la participación ciudadana en los programas y proyectos estatales y regionales. Así existiría una medida efectiva para reducir las causas de riesgos por desastres desde la sociedad civil y aplicaría políticas de prevención a comparación de atención a los desastres.

REFERENCIAS

- CENAPRED, (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2021). *Sistema de Consulta de Declaratorias*. Sistema de Consulta de Declaratorias. <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- CGSM, (Coordinación General del Servicio Meteorológico). (2020). *Reporte del Clima en México* (Vol. 148). <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Conacyt. (2022). *Energía y Cambio Climático*. PRONACES. <https://conacyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/>
- CONAPO, (Consejo Nacional de Población). (2021). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2020*. Gobierno de Mexico. <https://www.gob.mx/CONAPO/documentos/indice-de-marginacion-por-entidad-federativa-y-municipio-2020>
- 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*, 21(3), 187-203. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/ia.2021.15221>
- Gaceta Oficial del Gobierno del Estado de Veracruz. (2013). *Ley número 856 de Protección Civil y la Reducción de Riesgo de Desastres para el estado de Veracruz* (P. López

- Delfín (ed.). Gaceta Oficial 01 08 2013. http://proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario_ElementoSeccion/183/VERACRUZ_GACETA_OFICIAL_01_08_2013_2_.PDF
- INEGI. (2020). *Clima*. Cuéntame: Territorio. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=me&e=30>
- INEGI. (2021). *Resumen*. Veracruz. Información por Entidad. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/default.aspx?tema=me&e=30>
- INEGI. (2018). *Aspectos geográficos*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_30.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Cambio Climático 2021: Bases físicas. En *Comunicado de Prensa*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/cambio-climatico-2021-bases-fisicas-contribucion-del-grupo-de-trabajo-i-al-sexto>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Home page. <https://www.ipcc.ch/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Summary for Policymakers. En P. Masson-Delmotte, V. H.-O. P. Zhai, J. D. Roberts, P. R. Skea, A. Shukla, W. Pirani, C. Moufouma-Okia, R. P. Péan, J. B. R. S. Connors, Matthews, X. Y. Chen, M. I. G. Zhou, & T. W. E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, (pp. 1-21). IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). IPCC WGI Interactive Atlas. *Organización Meteorológica Mundial*. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information#eyJ0eXBlljoiQVRMQVMiLCJjb2I0b25zLjJp7ImxhdCI6LTgzOT-gxODAsImxuZyI6MjMyOTY4Nywiem9vbsi6NywiChJvail6IkVQUoc6NTQwMzAi-fSWichJpbwfyest6eyJzY2VuyXJpbyI6InNzcDU4NSIsInBlcmVzC16JjIiLCJZZWZz-b24iOiJ5ZWZyIiwizGFO>
- Luna Díaz Peón, A., Valdes Rodríguez, O. A., & Solís Villanueva, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En N. Hernández Cortés, M. Nava Tablada, & L. Ruelas Monjardín (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (1a ed., pp. 163-173). Gobierno del Estado de México.
- Medina Chena, A., Salazar Chimal, T., & Álvarez Palacios, J. L. (2010). Fisiografía y suelos. En Florescano & Ortiz (Eds.), *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz: Vol. I* (1a ed., pp. 30-43). Gobierno del Estado de Veracruz.
- Moncilo, M., Ximing, C., & Srive, R. (2019). Extreme Floods and Droughts under Future Climate Scenarios. *Water*, 11(1720), 1-5.

- Moreno Casasola, P., & Sánchez Vigil, G. (2014). Veracruz, mar de arena. *Gobierno del estado de Veracruz* (1a ed., Número 1). Gobierno del Estado de Veracruz.
- Organización meteorológica mundial. (2021). *El estado del clima en América Latina y el Caribe* (2021a ed.). www.miteco.gob.es
- Secretaría de Protección Civil. (2011). *Atlas de peligros naturales y antropogénicos del municipio de Las Choapas, Veracruz*. Gobierno del Estado de Veracruz.
- Ramírez Sánchez, M. C. (2018). Sistema Nacional de Protección Civil. *Mirada Legislativa*, 150, 1-33.
- Rodríguez Hernández, L. D., Valdés Rodríguez, O. A., Ellis, E. A., & Armenta-Montero, S. (2020). Analysis of vulnerability of the Río Misantla basin to extreme hydro-meteorological phenomena. *Biociencias*, 7(228), 1-19.
- Ruiz Barradas, A., Tejeda Martínez, A., Miranda Alonso, S., & Flores Zamudio, R. H. (2010). Climatología. En E. Florescano & J. Ortíz Escamilla (Eds.), *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz* (1a ed., pp. 65-84). Gobierno del Estado de Veracruz. <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/53>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Estadística de Producción Agrícola*. SIAP. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2021a). *Información estadística climatológica*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2021b). *Mapas de climatología 1981-2010*. SMN. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010>
- SMN, (Servicio Meteorológico Nacional). (2021c). *Monitor de Sequía en México*. Gobierno de Mexico. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- SMN, (Servicio Meteorológico Nacional). (2021d). *Precipitación (nacional)*. Precipitación. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&ver=mapa&o=3&n=nacional>
- Soares, D., & Nogueira, D. (2020). El rol del capital social en la reducción de la vulnerabilidad frente a riesgos de desastres. Folios. Publicación de discusión y análisis. *El poder de la Naturaleza*, 35, 88-97.
- Soto, M., Gama, L., & Gómez, M. (2006). Los climas cálidos subhúmedos del estado de Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 8(1), 43-48. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/497/49703202.pdf>
- SPC, (Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz). (2020). *Atlas de Riesgos del estado de Veracruz*. Gobierno del estado de Veracruz. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=Veracruz de Ignacio de la Llave&CVE_ENT=30

Valdés Rodríguez, O. A., Soares, D., & Vázquez Aguirre, J. L. (2021). Encuentros y desencuentros en la evaluación de la sequía en Veracruz. En M. Hernández, G. Sosa, W. Rodríguez, & F. Martínez (Eds.), *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos* (1a ed., pp. 251-260). Conacyt. https://b6e4eff7-10bb-4ea2-a4f1-79086599e600.filesusr.com/ugd/70ca75_45e-52bae8ecb4476abd4e777b2718e5d.pdf

Luis Brito Castillo¹
Mayra Guadalupe Gaxiola Morales¹
Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho²

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Guaymas, Sonora, México.

²Universidad Estatal de Sonora (UES), Hermosillo, Sonora, México.

10

CAPÍTULO

**FACTORES QUE MODULAN LA TEMPERATURA
SUPERFICIAL. ¿NOS PUEDEN AYUDAR A
IDENTIFICAR EL INICIO DE UNA SEQUÍA?**

RESUMEN

Las sequías han sido cada vez más recurrentes en la historia de México y tal intensificación se debe al incremento de la temperatura global. Al respecto, se ha reportado que si la relación albedo (Alb)-temperatura superficial (Ts) es decreciente, el proceso que modula la Ts es el de radiación. Por otro lado, en tierras degradadas y deforestadas, ya sea por causas naturales o antrópicas, la permanencia de esta relación decreciente puede dar lugar a un proceso de retroalimentación positiva propicia para la desertificación. Por el contrario, si la relación entre Alb y Ts es creciente, el factor modulador de esta última es el de evapotranspiración. A su vez, los valores de índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés) son indicadores del estrés hídrico en la vegetación; cuando son iguales o inferiores al valor umbral, puede asegurarse que en dicho territorio ha iniciado una sequía. En este trabajo, se retoman los hallazgos de otros autores quienes investigan los valores umbrales del NDVI en la relación entre Alb, Ts y NDVI del satélite MODIS para el periodo 2000-2018, en diferentes cuadrantes del desierto de Sonora. Para el caso de la zona de estudio, los valores reportados son de 0.10 para las áreas menos lluviosas y de 0.15 para las más lluviosas. Se expone una metodología para identificar los años con sequía a través del uso de estos valores umbrales. Asimismo se concluye que la metodología aquí expuesta es útil para representar con detalle el inicio y final de una sequía, utilizando como insumo el valor umbral del NDVI.

Palabras clave: albedo, NDVI, sequía, temperatura superficial.

ABSTRACT

Droughts have been increasingly recurrent in Mexico's history, and this intensification is due to the increase in global temperature. In this regard, it has been reported that if the albedo (Alb)-surface temperature (Ts) ratio is decreasing, the process that modulates Ts is radiation. On the other hand, in degraded and deforested lands, whether due to natural or anthropogenic causes, the permanence of this decreasing relationship may give rise to a positive feedback process conducive to desertification. On the contrary, if the relationship between Alb and Ts is increasing, the modulating factor of the latter is evapotranspiration. In turn, normalized difference vegetation index (NDVI) values are indicators of water stress in vegetation; when they are equal to or lower than

the threshold value, it can be assured that a drought has begun in that territory. In this work, the findings of other authors who investigate the threshold values of NDVI in the relationship between Alb, Ts and NDVI from the MODIS satellite for the period 2000-2018, in different quadrants of the Sonoran desert, are taken up. For the case of the study area, the reported values are 0.10 for the less rainy areas and 0.15 for the more rainy areas. A methodology is presented to identify the years with drought through the use of these threshold values. It is concluded that the methodology presented here is useful to represent in detail the beginning and end of a drought, using the NDVI threshold value as an input.

Keywords: albedo, NDVI, drought, surface temperature.

INTRODUCCIÓN

Las sequías en México han sido recurrentes a lo largo de su historia (Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2016) a causa de las anomalías en las precipitaciones en escalas interanuales (moduladas por El Niño/Oscilación del Sur o ENSO, por sus siglas en inglés) e interdecadales (por condiciones anómalas en el Pacífico a través de la Oscilación Decenal del Pacífico o PDO y la Oscilación Multidecenal del Atlántico, AMO). El Niño, por ejemplo, en verano tiende a ser húmedo en el norte de México, por otro lado en el sur es seco (Seager *et al.*, 2009). Méndez y Magaña (2010) sugieren que la fase positiva de la AMO está asociada a sequías de gran amplitud en el norte de México, mientras que Méndez González *et al.* (2011) indican que una fase positiva de la PDO favorece las sequías en el sur de México.

Algunos eventos de sequía han sido tan agudos que agravaron las condiciones de salud de toda una población (Acuna Soto *et al.*, 2002), e incluso se especula que fueron la causa de la desaparición de la antigua civilización maya (Gill *et al.*, 2007). Los más devastadores han durado varios lustros e incluso decenios (Stahle *et al.*, 2007; Stahle *et al.*, 2016) y permanecen en el registro histórico como un recordatorio de lo frágil que resultan todas las regiones del planeta, particularmente las localizadas en zonas áridas y semiáridas, ante la inminente ocurrencia de un evento de sequía de gran magnitud y duración (Williams *et al.*, 2020). La situación se agrava con el incremento de las temperaturas, ya que la combinación de condiciones secas y un ambiente cálido crea circunstancias favorables para la ocurrencia de incendios forestales (Russo *et al.*, 2017) y daños a la salud de la población (Stanke *et al.*, 2013).

En la literatura se distinguen cuatro tipos de sequía (Wilhite y Glantz, 1985; Keyantash, 2002): la meteorológica, causada por la ausencia prolongada de precipitación; hidrológica, asociada a un abatimiento de los niveles de los acuíferos y los caudales de

los ríos; agrícola, ocasionada por un déficit de humedad en el suelo y un incremento de pérdidas por evaporación que provoca bajo rendimiento de los cultivos, y la socioeconómica, que resulta ser una combinación de las otras tres. En México, han ocurrido megasequías de varios decenios (Lachniet *et al.*, 2012; Cook *et al.*, 2016). Los periodos de sequías más devastadores dada su intensidad y duración identificados en los últimos 400 años fueron: 1556–1573, 1666–1669, 1750–1775, 1819–1823, 1951–1957 (Stahle *et al.*, 2016). Algunos de estos antecedieron —o bien fueron precursores— profundos cambios sociales, como las sequías de 1521–1524 (conquista de México), 1785–1786 (año del Hambre), 1909–1910 (Revolución Mexicana). Las sequías más recientes han sido: 1951–1957, 1960–1965, 1994–2003 y 2011–2012 (Tereshchenko *et al.*, 2012); esta última catalogada como *excepcional*, término reservado a sequías particularmente intensas y aleatorias (Blunden *et al.*, 2013; Vega Camarena *et al.*, 2018).

Se han hecho varios esfuerzos por monitorear las sequías mediante diversos índices climáticos, por ejemplo, el monitor de sequía de América del Norte (Svoboda *et al.*, 2002) y el Monitor de Sequía Multivariado en México, desarrollado por la UNAM. Sin embargo, la principal incógnita es identificar cómo se originan las sequías, particularmente porque solo se reconocen cuando ya están establecidas en un lugar o sus consecuencias ya son claramente visibles. En este trabajo, se describe una metodología que emplea datos satelitales de albedo (Alb), temperatura superficial (Ts) y el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés, Goward *et al.*, 1991; Pettorelli, 2013), para mostrar que los factores que modulan la Ts en regiones áridas y semiáridas ayudan a discernir el momento en que la vegetación alcanza un alto grado de deshidratación, conocido como valor umbral, que corresponde a condiciones típicas de desierto, por lo que se intuye el inicio de una sequía.

ANTECEDENTES

A mediados de la década del setenta, Otterman (1974) y Charney (1975) propusieron un mecanismo para explicar de qué manera se pueden acentuar las condiciones de sequía en regiones áridas y semiáridas. En suelos deforestados o con alta carga antrópica, se incrementa la radiación reflejada a la atmósfera, enfriando la superficie. Dicha condición reduce los niveles de evaporación, lo cual debilita la convección y la formación de nubes; como consecuencia hay menos precipitación. A su vez, se incrementa la radiación de onda corta reflejada a la atmósfera sin sufrir alteraciones, conocida como *albedo* (Alb), en un proceso de retroalimentación a la sequía. Tal proceso térmico de mesoescala se conoce como *la hipótesis del albedo* y se manifiesta como una relación inversa entre Alb y Ts, en cuyo caso, el factor que modula la Ts se conoce como *factor*

de radiación (Tereshchenko *et al.*, 2012) y es el que domina las condiciones típicas de desierto. En presencia de vegetación, un factor distinto determina la Ts, *el de evapotranspiración* (Vivoni *et al.*, 2008); de esta forma, la relación que se observa entre Alb y Ts es directa (Tereshchenko *et al.*, 2012). Este fenómeno sucede porque la vegetación absorbe parte de la radiación solar entrante para su proceso de fotosíntesis y su correspondiente transpiración, lo cual disminuye la Ts.

En áreas con cubierta vegetal hidratada, y por tanto opacas, los valores de Alb son menores que en zonas descubiertas con suelos secos y claros. Si se remueve la vegetación, o bien se deshidrata, la superficie se aclara y se incrementan los valores de Alb. En el proceso, la radiación que antes era utilizada por la planta pasa directamente hacia la superficie, calentándola (Wendler y Eaton, 1983). Por tanto, a mayor deshidratación de la planta, mayores valores de Alb y Ts. Jackson e Idso (1975), Balling (1988) y Bryant (1990) observaron este efecto en la zona fronteriza entre México y Estados Unidos; ellos reportaron que la disminución de la cobertura vegetal en el lado mexicano corresponde tanto al aumento del Alb como de la Ts. Por otro lado, en una de las regiones más áridas del desierto de Sonora, Tereshchenko *et al.* (2012) mostraron que los factores de radiación y evapotranspiración, que modulan la Ts, son procesos de transición donde la dominancia de uno respecto al otro depende de la humedad del suelo y la opacidad del terreno. En particular, la radiación puede provocar un proceso de retroalimentación positiva (Wendler y Eaton, 1983) ante una falta prolongada de precipitación o un retraso en su ocurrencia, acentuando las condiciones que son típicas de un desierto. Los resultados de Tereshchenko *et al.* también indican que la radiación corresponde a un alto grado de deshidratación de las plantas; esta condición se investigó mediante el NDVI, cuyo valor umbral entre 0.08 y 0.10 es indicador del inicio de una sequía.

Más recientemente, Gaxiola Morales (2021) y Gaxiola Morales y Brito Castillo (2019) ampliaron el estudio de Tereshchenko *et al.* a más sectores de la misma ubicación, al cubrir latitudinalmente diferentes condiciones de suelo, vegetación y precipitaciones. En este trabajo se retoma parte de los resultados de Gaxiola Morales (2021) para intentar responder a la interrogante de si los factores que modulan la Ts pueden ayudar a identificar el inicio de una sequía. Gaxiola Morales y Tereshchenko *et al.* corroboraron que existen diferentes comportamientos en la relación albedo-temperatura superficial (Figuras 1 y 2): las condiciones típicas del desierto corresponden a una relación inversa donde el factor dominante es la radiación, y otra directa, donde impera la evapotranspiración. En ambos casos, fue posible identificar el valor umbral del NDVI que indica un cambio en la pendiente del modelo de regresión.

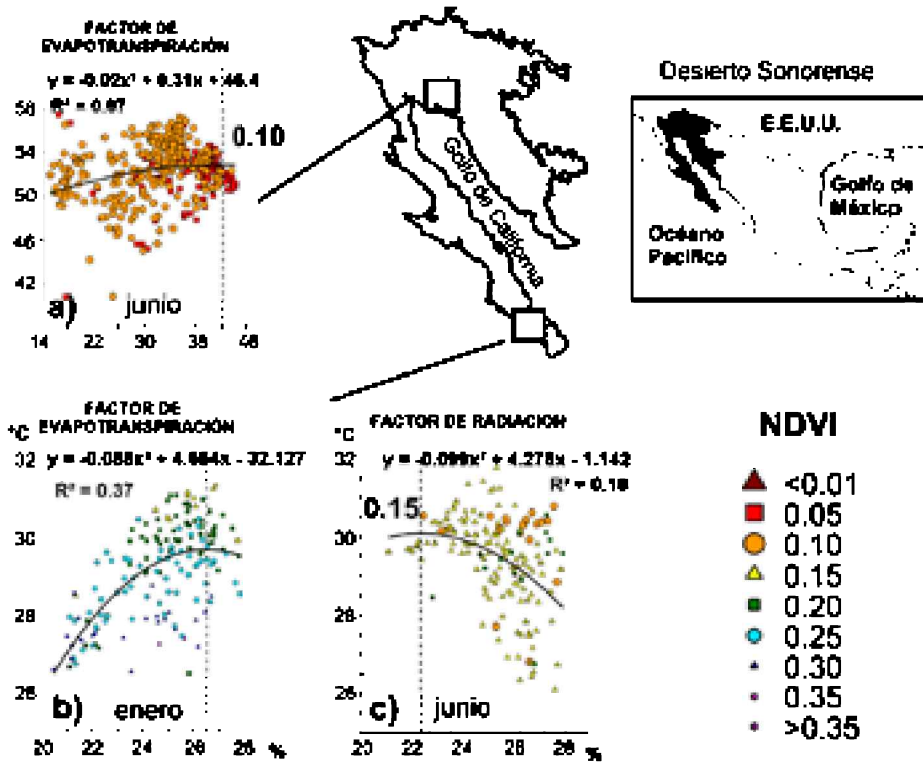


Figura 1. Ejemplos de relaciones observadas entre albedo y temperatura superficial en: a) junio, la región más árida del desierto de Sonora; b) enero y c) junio, en el sur de la Península de Baja California. Los colores de los puntos indican las clases del NDVI según la escala indicada. La ubicación de los cuadrantes donde se encontraron estas relaciones se muestra en el mapa sombreado en gris. Fuente: Tereshchenko *et al.* (2012) y Gaxiola Morales (2021).

HIPÓTESIS

En la modulación de la temperatura superficial, el valor umbral del NDVI que corresponde a la transición entre la dominancia de la evapotranspiración y la radiación es un indicador fidedigno de la llegada de una sequía.

OBJETIVO

Mostrar evidencias de que el valor umbral del NDVI es indicador del inicio de una sequía por alteración de la vegetación por causas naturales o humanas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir la climatología de precipitación, albedo, temperatura superficial y NDVI en el desierto de Sonora.
- Identificar los años con déficit de precipitación en el desierto de Sonora entre 2000 y 2018 a partir de observaciones de la red de estaciones meteorológicas convencionales.
- Contrastar los mapas del NDVI con los de precipitación considerando los valores umbrales del índice mencionado para corroborar el inicio de las sequías.

METODOLOGÍA

SITIO DE ESTUDIO

El desierto de Sonora (DS) es una región árida y semiárida con diferencias en tipos de vegetación (Shreve y Wiggins, 1964), suelo (Gaxiola Morales, 2021) y cantidad de precipitaciones (Gaxiola Morales y Brito Castillo, 2019). Ocupa una extensión que supera los 300 000 km² con más de la mitad de su territorio localizado en el noroeste de México (Dimmitt *et al.*, 2015, Figura 2). La existencia de más de 2000 manantiales (Grenade y Stevens, 2020) proporciona un hábitat propicio para el desarrollo de la biodiversidad silvestre y especies nativas endémicas (Vanderplank y Ezcurra, 2020), ya que es el hogar de más de 130 especies de mamíferos, 500 tipos de aves y aproximadamente 100 reptiles, así como 20 especies de anfibios y 30 peces nativos de agua dulce (Shreve y Wiggins, 1964). Según Dimmitt *et al.* (2015), de las aproximadamente 4000 especies que se encuentran en Sonora, Arizona, Baja California y el sur de California, más de 2500 especies nativas de plantas se encuentran dentro de los límites del DS. El saguaro gigante (*Carnegiea gigantea*) es una de las especies más emblemáticas de la región (Martínez Yrizar *et al.*, 2010; Vanderplank y Ezcurra, 2020), pero también se pueden encontrar algunos árboles achaparrados como el palo fierro (*Olneya tesota*), el palo verde (*Parinsonia florida* y *P. microphylla*) y los mezquites (*Prosopis pubescens* y *P. glandulosa var. torreyana*).

Uno de los rasgos que sobresalen en el DS ocurre después de las lluvias, cuando el suelo se cubre de plantas efímeras (Ezcurra *et al.*, 2002); estas últimas son anuales (Rivas *et al.*, 2002) y pueden durar desde un día hasta 6 u 8 semanas como máximo (Pearce, 2021), pero producen cambios drásticos en la superficie (Watts, 2007; Forzieri *et al.*, 2011, 2014) y en las relaciones albedo-temperatura superficial en función de la humedad del suelo, la exposición del terreno y el tipo de vegetación (Gaxiola Morales y Brito Castillo, 2019). Los valores promedio de albedo en el DS fluctúan entre el 20 % en las regiones más húmedas, en el centro-oriente y sur de la Península de Baja California, y el 35 %

en la región más árida del desierto de Altar, aunque sus variaciones interanuales dependen de las características previamente mencionadas (Gaxiola Morales, 2021). Por su parte, la temperatura superficial en el DS ronda, en promedio, entre los 20 y 55 °C, con mínimos en enero y diciembre y máximos durante el mes de junio, justo al final de la estación de primavera y principios del verano, cuando las condiciones son secas. En la zona de estudio, los valores promedio del NDVI varían entre <0.1 en junio y cerca de 0.4 en octubre, un mes después del máximo de precipitación observado; en consecuencia, hay una estrecha relación entre las condiciones de humedad y el comportamiento de la vegetación (Forzieri *et al.*, 2011, 2014).

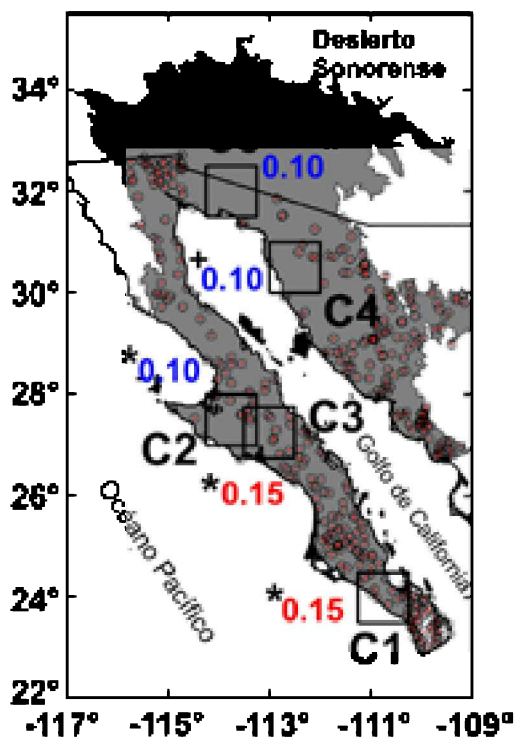


Figura 2. Valores umbrales del NDVI identificados en diferentes cuadrantes del desierto de Sonora según Tereshchenko *et al.* (2012) y Gaxiola Morales (2021). Los círculos pequeños muestran la distribución de 476 estaciones meteorológicas que cubren el territorio (modificado de Gaxiola Morales, 2021).

El NDVI se estima como la diferencia entre la máxima absorción de la radiación en la banda roja (R) como resultado de los pigmentos de la clorofila (Karnieli *et al.*, 2010), y la máxima reflectancia en la región espectral del infrarrojo cercano (NIR) como resultado de la estructura celular de las hojas (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

Donde ρ es la reflectancia en las bandas espectrales correspondientes. La clorofila de las plantas absorbe en gran medida la luz visible (entre 0.4 y 0.7 μm) para su uso en la fotosíntesis, mientras que la estructura celular de las hojas refleja intensamente la luz del infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.1 μm). Estas propiedades evidencian la utilidad del NDVI como variable de respuesta para identificar y cuantificar los efectos de una sequía en regiones áridas y semiáridas (Tucker y Choudhury, 1987).

DATOS

A partir de observaciones diarias de precipitación de 476 estaciones meteorológicas (Figura 2) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, s. f.), se estimaron los acumulados mensuales de precipitación para el período 1965-2016. Si el estimado en un mes para una estación determinada tuvo menos del 90 % de registros diarios, el valor del mes para esa estación se considera dato faltante. Con base en los datos puntuales, se construyó una retícula regular de 0.05° \times 0.05° de resolución ($\sim 5.6 \times 5.6$ km) utilizando la función *gridfit* en Matlab (R2020b). Esta función divide cada celda de la retícula en un triángulo y luego realiza una interpolación lineal con las observaciones dentro de cada uno. Los valores negativos de precipitación después de la interpolación se sustituyeron por ceros.

Se utilizaron datos calibrados mensuales de albedo, temperatura superficial y NDVI de imágenes satelitales distribuidas por el Servicio Geológico y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos a través del Centro de archivos distribuidos de procesos terrestres (LP DAAC, por sus siglas en inglés) de los productos MODIS MCD43C3-V6 (Schaaf y Wang., 2015), MODIS C3-V6 (Wan *et al.*, 2015) y MODIS C2-V6 (Didan, 2015) para el período comprendido entre febrero del año 2000 y febrero de 2018. El análisis descartó los valores de albedo inferiores a 15 %, ya que no corresponden a las condiciones de desiertos según Dobos (2003).

CLIMA

Para cada variable, se estimaron los promedios históricos mensuales por píxel, con base en los períodos 1965-2016 para precipitación y 2000-2018 para albedo, temperatura superficial y NDVI. Enseguida, se estimó el promedio regional del área para cada mes considerando todos los píxeles de la región de estudio (12 promedios regionales por variable). A partir de estos cálculos se estimaron las anomalías regionales (déficit o superávit)

como la diferencia entre el promedio histórico mensual por píxel menos el promedio regional; dichas anomalías distinguen las condiciones características del DS en cada mes por variable (el clima de anomalías regionales). Por ejemplo, el mapa de anomalías regionales de precipitación, con base en el promedio de toda el área, delimita las zonas donde llueve poco (anomalías negativas) de las más lluviosas (anomalías positivas). En particular, el clima de anomalías del mes de septiembre, que marca el final del monzón de Norteamérica, distingue dos polígonos: uno localizado en el sur del DS, donde las anomalías son positivas con un valor umbral de NDVI de 0.15, es decir, los cuadrantes menos áridos, y otro en el norte, donde las anomalías son negativas cuyo valor umbral es de 0.10, en otras palabras, los cuadrantes más áridos.

AÑOS DE SEQUÍA

Cuando el déficit de precipitación se prolonga durante al menos un año, se considera año de sequía. Estos años sirvieron de base para cuantificar las áreas del DS con anomalías negativas de precipitación y aquellas con valores de NDVI iguales o inferiores al umbral en cada polígono. En los años de sequía identificados domina el factor de radiación en la relación albedo-temperatura superficial.

INICIO Y FINAL DE LA SEQUÍA

Si la diferencia del valor del área total de un mes menos el área total del mes anterior es negativa, indica que disminuye la superficie cubierta por vegetación estresada por deshidratación (con valores por debajo del umbral del NDVI); en tal caso, hay recuperación de la vegetación en lugar de sequía. En caso contrario, si en un mes la diferencia es positiva, indica que hay incremento del área cubierta por vegetación deshidratada, y el mes se considera seco. Si esta condición prevalece durante doce meses consecutivos o más, se dice que hay sequía y el inicio será el primer mes en el que la diferencia entre áreas sea positiva. El final de la sequía se marca en el momento que el área cubierta por vegetación deshidratada sea igual o menor a la observada al inicio de la sequía. El grado de severidad está en función del tamaño del área afectada.

RESULTADOS

El clima de anomalías por variable para los meses de junio y septiembre se muestra en la Figura 3. En el caso de precipitación y temperatura superficial (Figura 3a-c), se mues-

tran en azul las anomalías negativas (píxeles con déficit relacionados con el promedio regional) y en rojo las positivas (píxeles con exceso relacionados con el promedio regional). En el caso de albedo y NDMI (Figura 3e–h), se muestran en naranja las anomalías negativas y en verde las positivas.

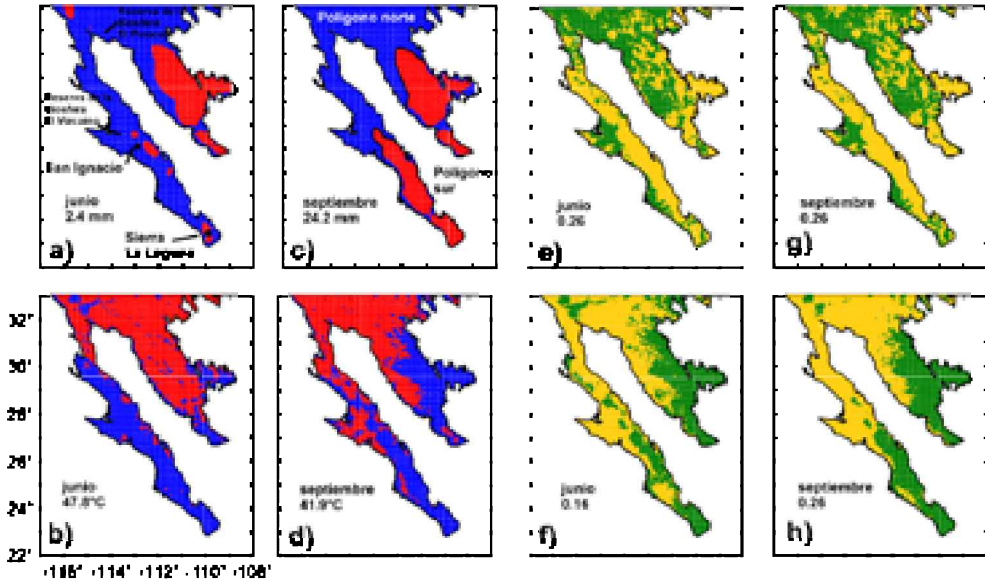


Figura 3. Mapas de anomalías con base en el promedio regional del desierto de Sonora, de 1965 a 2016, para precipitación (a, c) y de 2000 a 2018 para temperatura superficial (b, d), albedo (e, g) y NDMI (f, h). Las anomalías negativas de precipitación y temperatura superficial se muestran en azul y las positivas en rojo. Por otro lado, las anomalías negativas de albedo y NDMI se muestran en naranja y las positivas en verde. En cada caso se muestran las anomalías de junio y septiembre junto a sus promedios regionales. En c) se resaltan el polígono norte con anomalías negativas y el polígono sur con anomalías positivas de precipitación.

En el caso de la precipitación, el clima de junio (Figura 3a) muestra que la porción suroccidental del DS, algunas partes elevadas en Sierra de la Laguna y en San Ignacio, Baja California Sur (al noroeste y sureste), presentan anomalías positivas (rojo). El clima de anomalías de septiembre (Figura 3c) es similar al de junio, pero en este caso el área con mayor registro de positivas aumenta en el sur de la Península de Baja California. Por otra parte, el área con anomalías negativas (en azul) de precipitación de la Figura 3c se consideró *área con déficit de precipitación* en el DS, mientras que el área con anomalías positivas (en rojo) se consideró *área con exceso de precipitación*. A partir de estos resultados se seccionó el área de estudio en dos polígonos: uno al sur, donde llueve más y otro al norte, donde llueve menos. Al interior del polígono norte (área con déficit de precipitación) se cuantificaron las áreas mensuales con valores del NDMI iguales o menores

al valor umbral de 0.10. De modo similar, dentro del polígono sur (área con exceso de precipitación), se cuantificaron las áreas con valores del NDVI iguales o menores al valor umbral de 0.15 en cada mes. Como ya se definió anteriormente (Gaxiola Morales, 2021; Tereshchenko *et al.*, 2012), la localización de los valores umbrales del NDVI de 0.10 en áreas con déficit de precipitación y de 0.15 en aquellas con exceso de precipitación indican el límite de deshidratación de la vegetación. En ambos casos, el factor de radiación que se observa bajo condiciones desérticas convencionales domina la relación albedo-temperatura superficial. Los valores umbrales podrían marcar el inicio de la sequía si las precipitaciones se atrasan o dejan de ocurrir.

En el caso de la Ts, en junio (Figura 3b), las anomalías positivas de la porción continental del DS indican condiciones más cálidas que la Península de Baja California, que muestra anomalías negativas. En septiembre (Figura 3d), el área cálida del continente se contrae hacia el norte, mientras que en la Península se expande de norte a sur hasta la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno. Respecto a Alb y NDVI, el patrón de anomalías en junio y septiembre mengua; se muestran anomalías positivas de Alb (Figuras 3e, g) y negativas de NDVI (Figuras 3f, h) al norte del DS y en la región del Vizcaíno en la Península, y anomalías opuestas en ambos parámetros en el resto del territorio. Lo anterior indica que la vegetación es escasa (Figuras 3f, h) en las áreas claras, con valores altos de Alb (Figuras 3e, g) y más densa en las zonas opacas, con valores bajos.

IDENTIFICACIÓN DE AÑOS CON SEQUÍA

En la Figura 4 se muestran los resultados de la cuantificación de áreas con anomalías de precipitación (Figuras 4a, b) y valores iguales o inferiores al umbral del NDVI (Figuras 4c). Como se puede observar, los periodos que cumplieron con las condiciones de sequía fueron 2001-2002, 2010-2012 y 2015-2016. En el primero, las áreas con vegetación estresada por deshidratación alcanzaron su máxima cobertura en junio de 2002, pero se mantuvieron altas desde diciembre de 2001 hasta diciembre de 2002 (Figura 5a); en el segundo, se observó estrés en la vegetación desde abril de 2010 hasta septiembre de 2012 (Figura 5b); por el contrario, en el último, la flora estresada por deshidratación se observó desde noviembre de 2015 hasta diciembre de 2016 (Figuras 5c).

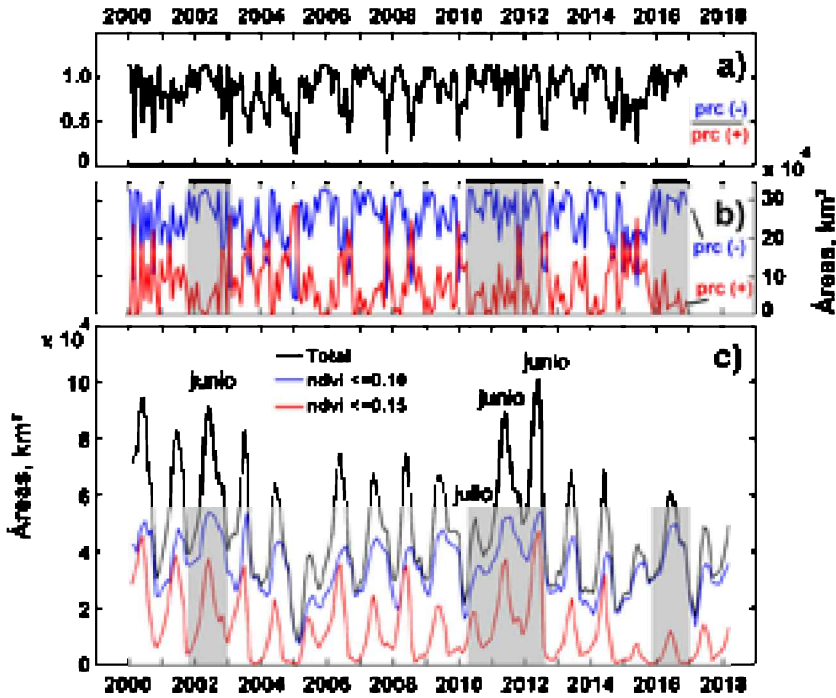


Figura 4. Cuantificación mensual de áreas entre 2000 y 2018: (a) razón entre las áreas cubiertas por anomalías negativas de precipitación y aquellas con anomalías positivas; (b) áreas con anomalías negativas (azul) y anomalías positivas (rojo) de precipitación; (c) áreas con valores de NDVI ≤ 0.10 (azul) y con valores de NDVI ≤ 0.15 (rojo) observadas al interior de las áreas con déficit (polígono norte) y con exceso (polígono sur) de precipitación, respectivamente, en el desierto de Sonora, mientras que en negro se muestra la suma total de las áreas.

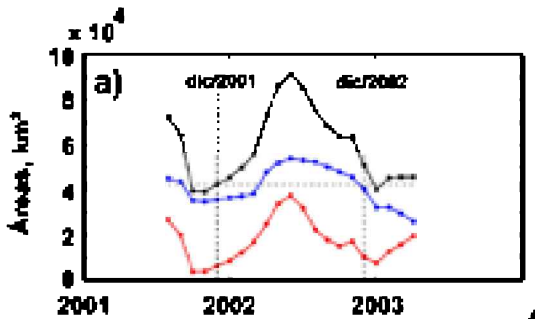


Figura 5. Variación mensual de las áreas con valores de NDVI iguales o inferiores al valor umbral durante las sequías de a) 2001-2002, b) 2010-2012 y c) 2015-2016. Las líneas horizontales punteadas son de referencia y ayudan a identificar el inicio (línea vertical izquierda) y final (línea vertical derecha) de la sequía en cada caso. La sequía inicia en el mes durante el cual la diferencia entre el área total menos el área total del mes anterior es positiva. La sequía concluye en el mes inmediato anterior durante el cual se alcanza un área igual o inferior a la que se observa al inicio.

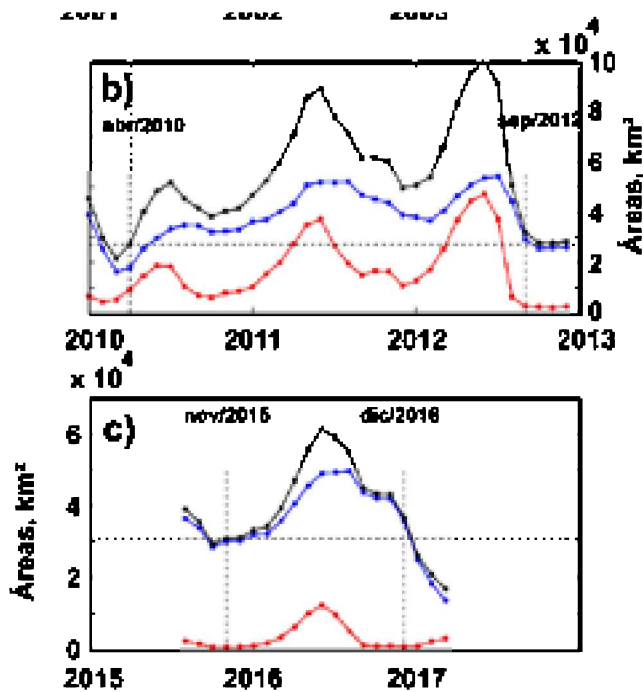


Figura 5 (Continuación). Variación mensual de las áreas con valores de NDVI iguales o inferiores al valor umbral durante las sequías de a) 2001-2002, b) 2010-2012 y c) 2015-2016. Las líneas horizontales punteadas son de referencia y ayudan a identificar el inicio (línea vertical izquierda) y final (línea vertical derecha) de la sequía en cada caso. La sequía inicia en el mes durante el cual la diferencia entre el área total menos el área total del mes anterior es positiva.

La sequía concluye en el mes inmediato anterior durante el cual se alcanza un área igual o inferior a la que se observa al inicio.

DISCUSIÓN

Se han definido diversos métodos para cuantificar la sequía, por ejemplo, el Índice de Sequía Severa de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés, Alley, 1984) es popular en Estados Unidos para evaluar la sequía meteorológica (Keyantash y Dracup, 2002), ya que aborda aspectos como la intensidad, inicio y final de una sequía. La metodología para calcular el PDSI toma en cuenta la precipitación, evapotranspiración y condiciones de humedad del suelo, por lo que mide las anomalías acumuladas de humedad disponible; las anomalías negativas indican déficit de humedad. No obstante, entre otros obstáculos para calcular el PDSI, se encuentra la prevalente escasez de datos. Por otra parte, especialistas de México, Estados Unidos y Canadá unieron esfuerzos en abril de 2002 para crear el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en

inglés), que utiliza una metodología propuesta en 1999 basada en diversos indicadores de sequía, entre ellos el PDSI. Su análisis es integral, por lo que la discusión y emisión del reporte de condiciones de sequía regional toma en cuenta el consenso de los especialistas; sin embargo, la falta de datos en algunos lugares puede disminuir la precisión del diagnóstico. En junio de 2017, el Instituto de Geofísica de la UNAM propuso el nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México (MoSEMM) para cuantificar la intensidad y magnitud de una sequía. En este caso, el MoSEMM utiliza variables de precipitación, humedad del suelo y escurrimiento; se evalúan las anomalías actuales de cada variable y se calcula la probabilidad conjunta para determinar el grado de severidad de una sequía. Con este índice es posible determinar las condiciones hasta una precisión a nivel municipal o de cuenca hidrológica.

Una diferencia notable entre la metodología propuesta en este trabajo y las mencionadas anteriormente es el nivel de detalle con el que se pueden identificar las condiciones de deshidratación extrema “típicas de desierto”, dadas por la relación albedo-temperatura superficial y los valores sobrepuestos de NDVI. Esta particularidad está relacionada con el tamaño de píxel del que dispongan las observaciones de estas tres variables, por lo que es posible identificar cómo se diferencia cada píxel del valor umbral de NDVI (Figura 6).

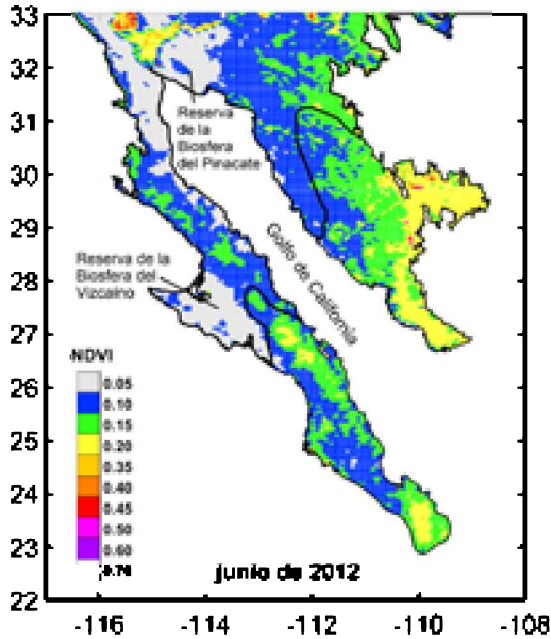


Figura 6. Mapa de valores de NDVI observados en junio de 2012 cuando el área cubierta por vegetación estresada por deshidratación fue máxima ($A = 100\,854\text{ km}^2$). La línea negra al interior del mapa divide, hacia el sur, la región más lluviosa del desierto de Sonora con valor umbral de NDVI = 0.15 y, hacia el norte, la región menos lluviosa con valor umbral de NDVI = 0.10.

Estos resultados encajan con la identificación de áreas con mayor humedad localizadas al sur de la Península de Baja California y al sur de Sonora, al igual que las áreas con menor humedad localizadas al norte de la Península, desde la región del Vizcaíno del lado del Pacífico hasta la región del Pinacate y Gran Desierto de Altar al noroeste de Sonora (Gaxiola Morales y Brito Castillo, 2019).

En cada polígono, el cálculo de las áreas de los píxeles con valores de NDVI menores o iguales al valor umbral posibilita la identificación de los píxeles en los que la fitomasa experimenta un grado alto de estrés por deshidratación; la suma total de las áreas con dichas condiciones sirve para identificar el inicio de la sequía. Los resultados de esta metodología se corroboran al analizar las observaciones de precipitación. De este modo, para que el periodo sea considerado una sequía, debe mostrar dos condiciones: que la diferencia entre el área de un mes con valores de NDVI iguales o inferiores al valor umbral menos el área del mes anterior sea positiva y que la diferencia positiva se mantenga por al menos un año. El final de la sequía se identifica durante el mes inmediato anterior en el que la suma total de las áreas cubiertas por vegetación deshidratada es menor o igual a la que se encontró al inicio del periodo.

En el periodo 2000-2018 se identificaron tres sequías: 1) dic/2001 a dic/2002, 2) abr/2010 a sep/2012 y 3) nov/2015 a dic/2016. Cabe destacar que la sequía de 2010-2012 en el desierto de Sonora, con duración de 30 meses según los resultados de este trabajo, afectó gran parte del norte de México y fue considerada como *sequía excepcional*, término reservado a sequías muy intensas y prolongadas. Durante su extensión máxima, en junio de 2012, el área afectada por deshidratación de la fitomasa superó los 100 000 km² (Figura 6). Además, se puede observar que la mayor parte del área de estudio mostró valores de NDVI por debajo de los valores umbrales. Según el Monitor de Sequía de América del Norte, desde octubre de 2011, el sur de la Península de Baja California experimentó condiciones de *severas* a *extremas*, mientras que el norte sufrió condiciones de *anormalmente secas* a *extremas*; cabe señalar que el mismo fenómeno se observó en el lado continental; asimismo, solo el extremo sur de la Península de Baja California y parte del continente percibieron condiciones de *moderadas* a *severas* (Figura 7). El NADM reserva detalle en las condiciones de sequía observadas en la península de Baja California; por el contrario, con esta metodología es posible distinguir que gran parte de la península mostró dichas condiciones desde abril de 2010 hasta septiembre de 2012. Esto indica que el NADM ofrece datos poco fidedignos al momento de detectar condiciones de sequía de la mayor parte del desierto de Sonora en el transcurso de 2010 a 2012.

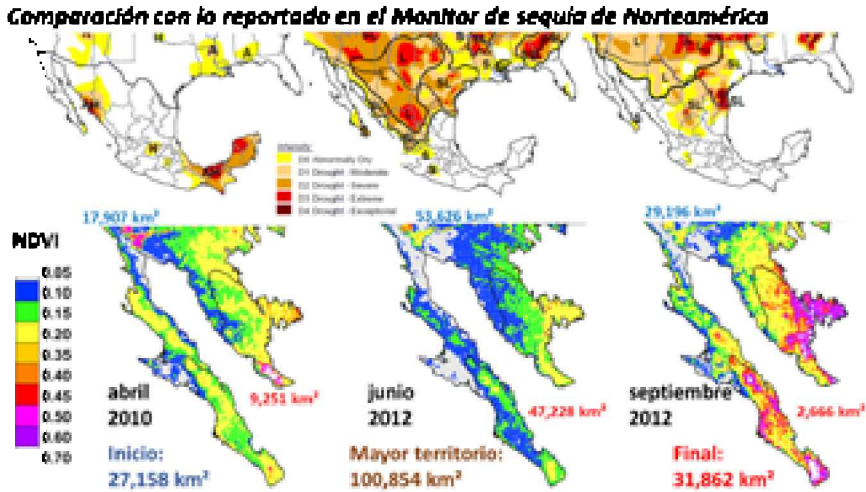


Figura 7. Comparación entre el Monitor de Sequía de América del Norte y la metodología propuesta en este trabajo respecto al diagnóstico de la sequía de 2010-2012. En cada mapa se indica el área estresada del polígono superior e inferior y el total.

CONCLUSIONES

En definitiva, se observó que la metodología expuesta es útil para representar con detalle el inicio y final de una sequía utilizando como insumo el valor umbral del NDVI. Dicho valor se define al analizar las relaciones albedo-temperatura superficial en las que se sobreponen los valores del mismo índice y tiene como base teórica los factores de radiación y evapotranspiración que modulan la temperatura superficial.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos el apoyo recibido por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste y la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM) de Conacyt para la realización de esta investigación. También al Ing. Julio Egrén Félix Domínguez, del Laboratorio de Modelación Espacial y Sensores Remotos, por su apoyo en la recolección de los datos de albedo, temperatura superficial y NDVI y asimismo a los revisores de este trabajo, cuyos comentarios permitieron mejorar el contenido. Los resultados se presentaron durante la reunión anual 2021 de REDESCLIM.

REFERENCIAS

- Alley, W.M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100–1109.
- Acuna Soto, R., Stahle, DW., Cleaveland, MK. y Therrell, MD. (2002). Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 8(4), 360–362. <https://doi.org/10.3201/eid0804.010175>.
- Balling, Jr. (1988). The climatic impact of a Sonoran vegetation discontinuity. *Climatic Change*, 13, 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00140163>
- Blunden, J., Berry, D., Frajka Williams, E., Holgate, S., McCarthy, G., Rayner, D. y Smeed, D. (2013). State of the Climate in 2012. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8(Supplement)), 1–238. https://doi.org/10.1175/2013BAMSstateoftheClimate.1/suppl_file/2013bamsstateoftheclimate.2.pdf.
- Bryant, NA., Johnson, LF., Brazel, AJ., Balling, RC., Hutchinson, Ch.F. y Beck, LR. (1990). Measuring the effect of overgrazing in the Sonoran Desert. *Climatic Change*, 17, 243–264. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00138370>
- Charney, JG. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 193–202.
- Cook, BI., Cook, ER., Smerdon, JE., Seager, R., Williams, AP., Coats, S., Stahle, DW. y Díaz, JV. (2016). North American megadroughts in the Common Era: reconstructions and simulations. *WIREs Climate Change*, 7(3), 411–432. <https://doi.org/10.1002/wcc.394>.
- Didan, K. (2015). MODIS C2 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MODIS3C2.006>
- Dimmitt, M., Wentworth, P. y Brewer, L. (2015). A natural history of the Sonoran Desert. 2nd edition. Tucson: Arizona-Sonora Desert Museum. University of California Press.
- Dobos, E. (2003). Albedo. *Encyclopedia of Soil Science*. <https://doi.org/10.1081/E-ESS120014334>
- Douglas, MW., Maddox, RA., Howard, K. y Reyes, S. (1993). The Mexican Monsoon. *Journal of Climate*, 6, 1665–1677.
- Ezcurra, E., Peters, E., Búrquez, A. y Mellink, E. (2002). Los Desiertos de Sonora y Baja California. Mittermeier, RA, Goettsch Mittermeier, C., Robles Gil, P., Pilgrim, J., Fonseca, G., Brooks, TY., Kosnant, WR. (Eds). Áreas Silvestres: las últimas regiones vírgenes del mundo. CEMEX/Agrupación Sierra Madre. México DF. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/368.pdf>
- Forzieri, G., Castelli, F. y Vivoni, ER. (2011). Vegetation dynamics within the North American monsoon region. *Journal of Climate*, 24, 1763–1783. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3847.1>.

- Forzieri, G., Feyen, I., Cescatti, A. y Vivoni, ER. (2014). Spatial and temporal variations in ecosystem response to monsoon precipitation variability in southwestern North America. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 119, 1999–2017. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JG002710>.
- Gaxiola Morales, MG. (2021). *Umbral de sequía en el Desierto Sonorense. Relación entre radiación y evapotranspiración*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC, La Paz, B.C.S.
<https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/2429>
- Gaxiola Morales, MG. y Brito Castillo, L. (2019). Análisis de los factores de radiación-evapotranspiración en el Desierto Sonorense. *Biotechnia*, vol. XXI, núm. 2, 137–144. ISSN: 1665-1456.
- Gill, RB., Mayewski, PA., Nyberg, J., Haug, GH. y Peterson, LC. (2007). Drought and the maya collapse. *Ancient Mesoamerica*, 18(2), 283–302. <https://doi.org/10.1017/S0956536107000193>.
- Goward, SN., Markham, B., Dye, DG., Dulaney, W. y Yang, J. (1991). Normalized Difference Vegetation Index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 35(2), 257–277. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90017-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90017-Z).
- Grenade, de R. y Stevens, LE. (2020). Desert oasis springs: ecohydrology, biocultural diversity, mythology, and societal implications. En Goldstein MI., Dellasala, DA. (Eds.), *Encyclopedia of the world's biomes*. Elsevier Inc., vol 2, pp. 36–46. <https://doi.org.10.1016/B-978-0-12-409548-9.11951-7>
- Jackson, RD. e Idso, SB. (1975). Surface albedo and desertification. *Science*, 189(4207), 1012–1015. <https://doi.org/10.1126/science.189.4207.1012>.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, RT., Anderson, M., Imhoff, ML., Gutman, GG., Panov, N. y Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*, 23(3), 618–633. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>.
- Keyantash, J. y Dracup, AJ. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of a Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8): 1167–1180. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1167>
- Lachniet, MS., Bernal, JP., Asmerom, Y., Polyak, V. y Piperno, D. (2012). A 2400 yr Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change. *Geology*, 40(3): 259–262. <https://doi.org/10.1130/G32471.1>.
- Martínez Yrizar, A., Felger, RS. y Búrquez, A. (2010). Los ecosistemas terrestres: un diverso capital natural. In Molina-Freaner, FE., Van DeVender, TR. (Eds.), *Diversidad Biológica de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, México City, pp. 129–156

- Méndez, M. y Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175–1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>.
- Méndez González, J., Ramírez Leyva, A., Cornejo Oviedo, E., Zárate Lupercio, A. y Cavazos Pérez, T. (2011). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas*, n. 73, 4 fev.
- Otterman, J. (1974). Baring high-albedo soils by overgrazing: Hypothesized desertification mechanism. *Science*, 186(4163), 531–533.
- Pearce, C. (2021). *El ciclo de vida de una planta efímera*. En https://www.chowenespanol.com/ciclo-vida-planta-efimera-sobre_96674/ (consultado en marzo de 2022).
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press, New York, NY., ISBN 978-0-19-969316-0.
- Rivas Arancibia, S.P., Zavala Hurtado, J.A., Montaña Carubelli, C. (2002). La permanencia de lo efímero. Las plantas anuales del desierto. *Ciencia*, abril-junio, 70–78
- Russo, A., Gouveia, CM., Páscoa, P., DaCamara, CC., Sousa, PM. y Trigo, RM. (2017). Assessing the role of drought events on wildfires in the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 50–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.021>.
- Schaaf, C. y Wang, Z. (2015). MCD43C3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Albedo Daily L3 Global 0.05Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MCD43C3.006.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E. y Stahle, DW. (2009). Mexican drought: An observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera*, 22(1), 1–31.
- Shreve, F. y Wiggins, IL. (1964). Vegetation and Flora of the Sonoran Desert. *Stanford University Press*, 1740 pp.
- Stahle, DW., Cook, ER, Burnette, DJ., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, JN., Griffin, D., Cook, BI., Acuña, R., Torbenson, MCA., Szejner, P. y Howard, IM. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>.
- Stahle, DW., Fye, FK., Cook, ER. y Griffin, RD. (2007). Tree-ring reconstructed megadroughts over North America since A.D. 1300. *Climatic Change*, 83(1–2): 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9171-x>.
- Stanke, C., Kerac, M., Prudhomme, C., Medlock, J., y Murray, V. (2013). Health effects of drought: a systematic review of the evidence. *PLoS currents*, 5, ecurrents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004>

- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D. y Stephens, S. (2002). THE DROUGHT MONITOR. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>.
- Tereshchenko, I., Zolotokrylin, AN., Titkova, TB., Brito Castillo, L. y Monzon, CO. (2012). Seasonal variation of surface temperature-modulating factors in the sonoran desert in northwestern Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(8), 1519–1530. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0160.1>.
- Tucker, CJ. y Choudhury, BJ. (1987). Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing and Environment*, 23, 243–251. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90040-X)
- Vanderplank, SE. y Ezcurra, E. (2020). Desert rarity, endemism, and uniqueness. In Goldstein M.I., Dellasala, D.A. (Eds.), *Encyclopedia of the world's biomes*. Elsevier Inc., Vol. 2, pp. 47–56. <https://doi.org/10.1016/B-978-0-12-409548-9.12110-4>.
- Vega Camarena, JP., Brito Castillo, L., Farfán, LM., Gochis, DJ., Pineda Martínez, LF. y Díaz, SC. (2018). Ocean–atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology*, 38(2), 853–866. <https://doi.org/10.1002/joc.5215>.
- Vivoni, ER., Moreno, A., Mascaro, G., Rodríguez, JC., Watts, CJ., Garatuza Payán, J., Scott, RL. (2008). Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in North American monsoon region. *Geophysical Research Letters*, 35, L22403. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL036001>.
- Wan, Z., Hook, S. y Hulley, G. (2015). MOD11C3 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MOD11C3.006
- Watts, CJ., Scott, RL., Garatuza Payán, J., Rodríguez, JC., Prueger, JH., Kustas, WP. y Douglas, M. (2007). Changes in vegetation condition and surface fluxes during NAME 2004. *Journal of Climate*, 20(9), 1810–1820. <http://doi.org/10.1175/JCLI4088.1>.
- Wendler, G., Eaton F. (1983). On the desertification of the Sahel zone: Part I. Ground observations. *Climate Change*, 4, 365–380.
- Wilhite, DA. y Glantz, MH. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions, *Water International*, 10:3, 111–120, DOI: 10.1080/02508068508686328
- Williams, AP., Cook, ER., Smerdon, JE., Cook, BI., Abatzoglou, JT., Bolles, K., Baek, SH., Badger, AM. y Livneh, B. (2020). Erratum: Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought (American Association for the Advancement of Science (2020), <https://doi.org/10.1126/science.aaz9600>). *Science*, 370(6516), 314–318. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABF3676>.

(<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>)

(<http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/Monitordesequia.aspx>)

(que se puede consultar en: <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/maps/en/202101>)

11

CAPÍTULO

Luis Manuel Farfán Molina^{1*}
Luis Brito Castillo²
María Z. Flores López³
Jorge Cortés Ramos⁴

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad La Paz.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., Unidad Guaymas.

³Universidad Autónoma de Baja California Sur, Departamento de Ciencias de la Tierra.

⁴Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

**IMPACTO DE SISTEMAS CONVECTIVOS Y
ACTIVIDAD ELÉCTRICA EN LA POBLACIÓN
DEL NOROESTE DE MÉXICO**

RESUMEN

Esta investigación se enfoca al desarrollo de sistemas convectivos de julio a septiembre de 2014. Se utilizan imágenes del satélite geoestacionario (GOES-15) para identificar las características espaciales y temporales de nubosidad, así como los patrones de intensidad, estructura y movimiento de los sistemas en Nayarit, Sinaloa, Sonora, Durango, Chihuahua y península de Baja California. La actividad convectiva está presente sobre la Sierra Madre Occidental durante la noche y en Nayarit-sur de Sinaloa durante la madrugada y amanecer. Se encuentra un patrón de lluvia con acumulaciones mensuales relativamente altas determinadas mediante reportes emitidos por una red operativa de estaciones climatológicas.

Una componente adicional de la investigación examina la distribución espacial y temporal de descargas eléctricas que ocurren en el interior de los sistemas convectivos. Se analiza una base de datos que indica la localización de 1 895 056 registros. Se encuentran regiones con una distribución de densidad sustancial en el sur del Golfo de California y en poblaciones cercanas a la costa de Nayarit y sur de Sinaloa. En cambio, la actividad disminuye sobre la península de Baja California y Océano Pacífico. Los resultados del estudio contribuyen a una alta comprensión del peligro que las descargas eléctricas representan para la población e infraestructura del noroeste de México durante la tarde y noche, en particular, el asociado a las actividades que se realizan en espacios abiertos así como el tráfico marítimo y aéreo en la región de interés.

Palabras clave: descargas eléctricas, lluvia, nubosidad, sistemas convectivos.

ABSTRACT

This research focuses on the development of convective systems from July to September, 2014. Geostationary satellite (GOES-15) imagery is used to identify the spatial and temporal characteristics of cloudiness along with intensity, structure, and movement patterns of convective systems in Nayarit, Sinaloa, Sonora, Durango, Chihuahua, and the Baja California peninsula. The convective activity appears over the Sierra Madre Occidental overnight and in Nayarit-southern Sinaloa at dawn and sunrise. There is a rainfall pattern with relatively high monthly accumulations determined from reports issued by an operational network of weather-station reports.

An additional research component examines the temporal and spatial distribution of electric discharges that occur inside the convective systems. A database is analyzed to identify the location of 1 895 056 records. Regions with a substantial density distribution are found over the southern Gulf of California and communities close to Nayarit and southern Sinaloa coasts. However, there is less activity over the Baja California Peninsula and Pacific Ocean. The study results contribute to a better understanding of the hazard that electric discharges provide to the population in northwestern Mexico during the evening and night. In particular, the hazard associated with outdoor activities as well as to maritime and air traffic in the region of interest.

Keywords: electric discharges, rain, cloudiness, convective systems.

INTRODUCCIÓN

El noroeste de México, está compuesto por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Durango y Chihuahua, cuentan con 17.3 millones de habitantes (INEGI, 2020), que representan el 13.8 % del total nacional y ocupan el 40 % del área superficial en el país. Por su entorno tropical y subtropical, entre 20 y 33 °N, la población y medio ambiente del noroeste de México están expuestos al impacto de condiciones meteorológicas desfavorables principalmente durante la temporada cálida del año; en particular, a ciclones tropicales del Océano Pacífico (García y Trejo, 1994; Martínez Sanchez y Cavazos, 2014) y al desarrollo de eventos meteorológicos durante los meses de junio a octubre, algunos de los cuales se asocian al monzón de Norteamérica (Adams y Comrie, 1997). En este trabajo, se define un sistema convectivo como un grupo organizado de celdas de nubosidad que ocupan decenas o hasta cientos de kilómetros durante varias horas. Cada sistema convectivo puede causar episodios de lluvia, viento y descargas eléctricas que son monitoreados por la red terrestre de observaciones y equipos de percepción remota.

Se sabe que la actividad convectiva inicia sobre la Sierra Madre Occidental (Farfán *et al.*, 2021), la cual es una cadena montañosa con elevación media de 2500 metros que se extiende desde Nayarit hasta el norte de Sonora. Entre julio y septiembre, la precipitación total sobre la sierra recibe su mayor proporción anual (Mosiño y García, 1974). En Nayarit también ocurren, durante ese periodo, acumulaciones considerables de lluvia (Negri *et al.*, 1994). Mediante una climatología de 16 años de descargas eléctricas (Albrecht *et al.*, 2016), se encontró que Nayarit tiene una de las concentraciones (o densidades) espaciales más altas en Norteamérica; se registran descargas eléctricas después de la medianoche, pero la mayor parte de estas ocurren desde el atardecer mientras que su distribución es más abundante en julio, agosto y septiembre.

Este fenómeno puede provocar daños a la infraestructura tal como a las líneas de transmisión eléctrica, así como interrupciones en las comunicaciones terrestres, marítimas y aéreas. También, ocasionan incendios forestales y pueden afectar a seres vivos y causar heridas o muerte (Cooper y Holle, 2019). El impacto en la población de México fue documentado inicialmente por Raga *et al.* (2014), quienes encontraron que el centro y sur del país muestran registros relativamente altos de muertes asociadas a descargas eléctricas durante julio y agosto, los cuales contrastan con los estados del noroeste, donde se registraron menos defunciones, estas son suficientes para considerarse de importancia respecto a la protección civil ante el desarrollo de sistemas convectivos.

Esta investigación presenta de forma general el desarrollo de sistemas convectivos y descargas eléctricas en el noroeste de México desde la representación de la percepción remota. La región de estudio se encuentra limitada por 20 °N, 33 °N, 100 °O y 117 °O, lo que abarca el noroeste de México incluyendo la región oceánica (Pacífico Oriental y Golfo de California) que le rodea. La documentación se complementa con información derivada de reportes oficiales de defunciones para una evaluación del impacto social.

OBJETIVOS

- Determinar las características de sistemas convectivos mediante observaciones de satélite, con respecto a su distribución espacial en los meses de julio a septiembre, en una temporada reciente (2014).
- Establecer las regiones específicas de riesgo para la población a los niveles estatal, municipal y local ante la presencia de sistemas convectivos y las descargas eléctricas correspondientes en zonas rurales y urbanas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de la nubosidad se basó en una serie de imágenes infrarrojas de satélite geostacionario (GOES-15) con una resolución temporal de 30 minutos, proporcionadas por la Universidad de Wisconsin. Estas imágenes son de julio a septiembre de 2014, tienen resolución espacial de 4 × 8 km y están calibradas con respecto a la temperatura, lo que permitió seleccionar el desarrollo de las nubes mediante un valor de referencia de -38 °C (a 10.5 km de altura, aproximadamente). A posteriori, para cada mes, se estimó la frecuencia con que la nubosidad logró superar el valor de referencia de -38 °C; esto significa que se alcanzó una altura mayor que 10.5 km. Las estimaciones

de precipitación acumulada en periodos de 24 horas fueron de la misión internacional Global Precipitation Measurement (GPM, por sus siglas en inglés; NASA, 2021). Además, se utilizaron registros puntuales de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Se examinó la posición y evolución de descargas utilizando observaciones de la Universidad de Washington. La detección del fenómeno mencionado permite definir el desarrollo de celdas convectivas intensas con la ventaja de aportar resolución espacial (5 a 10 km) y temporal (segundos) comparable, incluso más elevadas que las de los satélites geoestacionarios. Con este tipo de datos, se han caracterizado estructuras convectivas para eventos meteorológicos intensos que ocurren en México desde una escala temporal de varios años (Raga *et al.*, 2014) hasta una graduación regional de días a horas (Barrett *et al.*, 2017; Farfán *et al.*, 2021).

RESULTADOS

A) DEFUNCIONES

En el periodo de 2009 a 2018, la Secretaría de Salud (ss, 2021) documentó 104 muertes asociadas a descargas eléctricas (Figura 1). La base de datos incluye fecha y municipio, entre otras atribuciones en que ocurrió cada defunción. Aunque sucedieron en los estados del noroeste de México, excepto Baja California, la mayoría se presentó en Chihuahua (29), Sinaloa (25) y Nayarit (23).

Al utilizar la densidad de población de la encuesta intercensal 2015 (INEGI, 2015) y relacionarla con las defunciones por descargas eléctricas, se obtuvieron 0.3 bajas por millón de habitantes para Sonora y de 0.7 a 0.8 para Baja California Sur, Durango, Chihuahua y Sinaloa. Un hecho importante es que Nayarit predominó con 1.9 decesos por millón de habitantes; a nivel municipal, la mayor frecuencia es de 12 casos en dos cabeceras del este de Nayarit (La Yesca y Del Nayar), seguidas por nueve en el norte de Sinaloa (Ahome y El Fuerte), ocho en el noreste de Sinaloa (Badiraguato) y uno en Chihuahua (Guadalupe y Calvo). Algunas características de los dos municipios con más muertes en Nayarit es que cuentan con un alto grado de pobreza, se localizan a más de 1500 metros de altura y están habitados por comunidades indígenas de Huicholes y Coras. Algo similar ocurre en el municipio de Chihuahua, aunque su altura es mayor de 2800 metros y las comunidades son Tarahumaras.

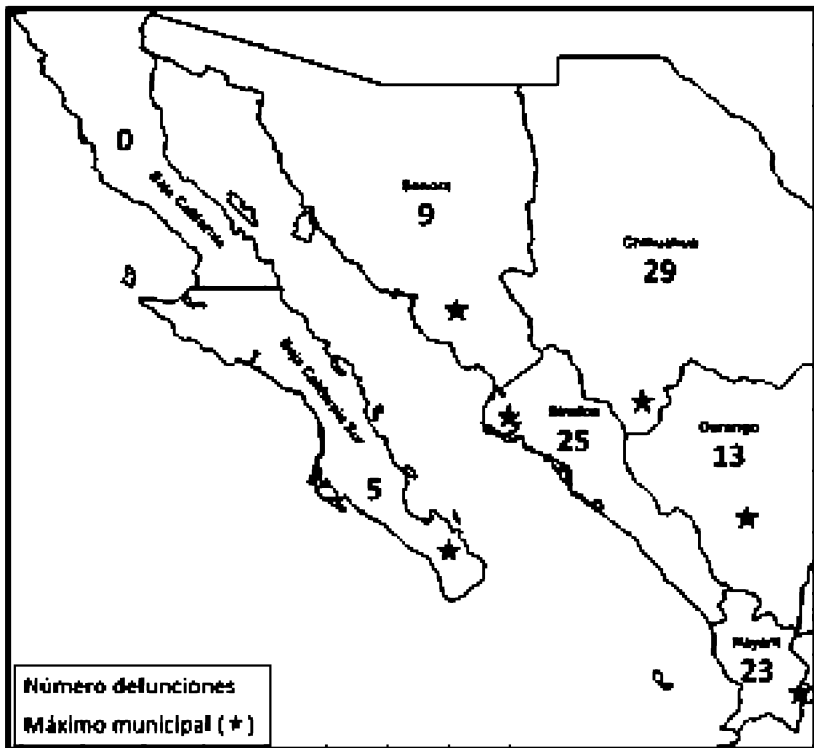


Figura 1. Ciento cuatro defunciones reportadas por la Secretaría de Salud en el periodo de 2009 a 2018 en siete estados del noroeste de México. La estrella indica la posición del máximo reportado a nivel municipal.

Otra particularidad es que, en la distribución mensual del noroeste, agosto tiene la mayoría de defunciones (44) seguido por julio (21) y septiembre (16). Estos meses ocupan un poco más de las tres cuartas partes del periodo, mientras que no hubo registros en los meses de febrero y abril, así como pocos (uno) en enero, marzo y diciembre. Esto reafirma los patrones distributivos correspondientes a la densidad de descargas eléctricas y fallecimientos a nivel estatal de Raga *et al.* (2014), para 1979-2011, aunque en este estudio, el máximo incluye una contribución importante de junio, puesto que los autores toman en cuenta todos los estados del país.

B) NUBOSIDAD

A manera de ilustración representativa de sistemas convectivos en el noroeste de México, la Figura 2 muestra imágenes satelitales de tres días del verano de 2014, que fue una

temporada activa respecto a la precipitación observada (SMN, 2014): 24 de julio, 3 de agosto y 8 de septiembre. Dichas imágenes fueron obtenidas sobre regiones geográficas del noroeste, donde los sistemas convectivos correspondientes produjeron precipitación en los reportes de estaciones meteorológicas del SMN.

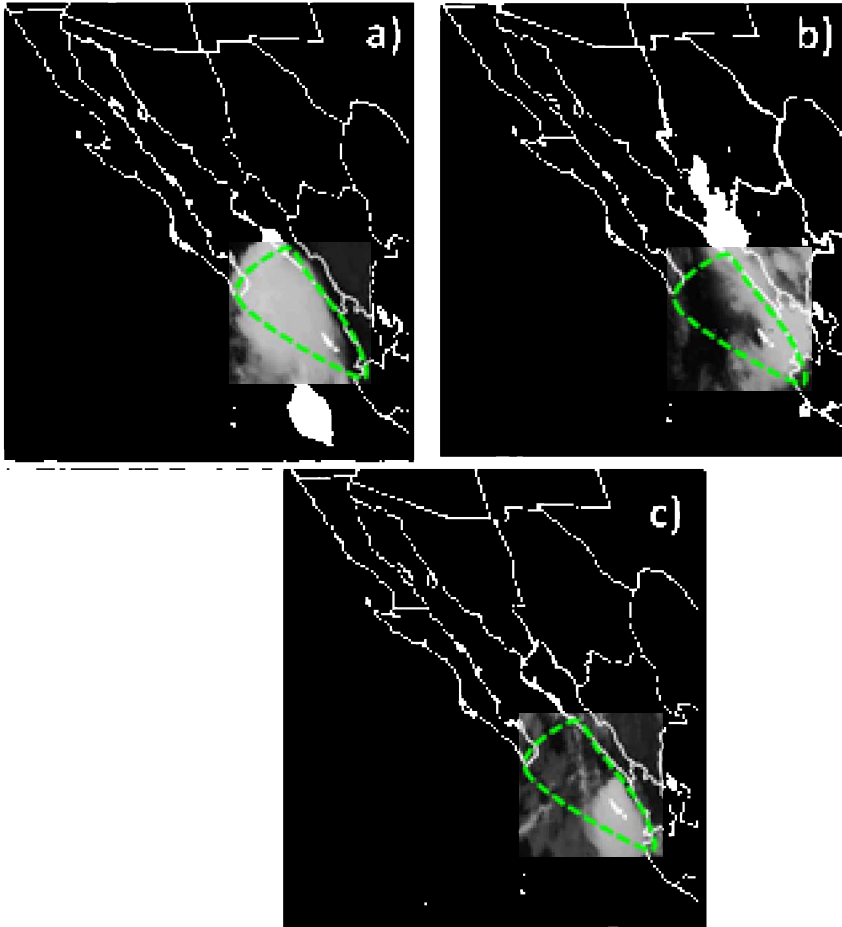


Figura 2. Imágenes de satélite GOES-15: banda infrarroja de nubosidad en tres días seleccionados en 2014. a) 24 de julio (07:00 horas, tiempo del centro), b) 3 de agosto (21:00 horas) y c) 8 de septiembre (05:30 horas). La línea punteada verde indica los límites laterales que definen la boca del Golfo de California.

La Figura 2a ilustra un sistema que se desplazó en su fase madura sobre la boca del Golfo de California durante la madrugada del 24 de julio; la boca se define por el polígono punteado que ocupa 101 480 km². El sistema incluye parte de la costa de Baja California Sur, donde además de causar hasta 43.4 mm de precipitación (Figura 3a), se reportaron daños a la población por vientos en el rango de 72 a 90 km/h durante al

menos 30 minutos y condiciones desfavorables en el aeropuerto de San José del Cabo, Baja California Sur (Farfán *et al.*, 2021). La Figura 2b muestra un sistema del 3 de agosto al atardecer ubicado sobre la mayor parte de Nayarit y Sinaloa que causó un máximo de lluvia acumulada de 63.8 mm en Ruiz, Nayarit. Del 8 de septiembre, la Figura 2c presenta un sistema al amanecer sobre las Islas Marías que causó lluvia acumulada de 5 a 20 mm en las estaciones de Nayarit. En Sonora, la precipitación reportada para ese día se debe a un sistema convectivo que ocurrió varias horas antes de la imagen (Figura 2c), mientras que las lloviznas en Baja California (Figura 3) se asociaron a remanentes del ciclón tropical Norbert en el Océano Pacífico (Ávila, 2014).

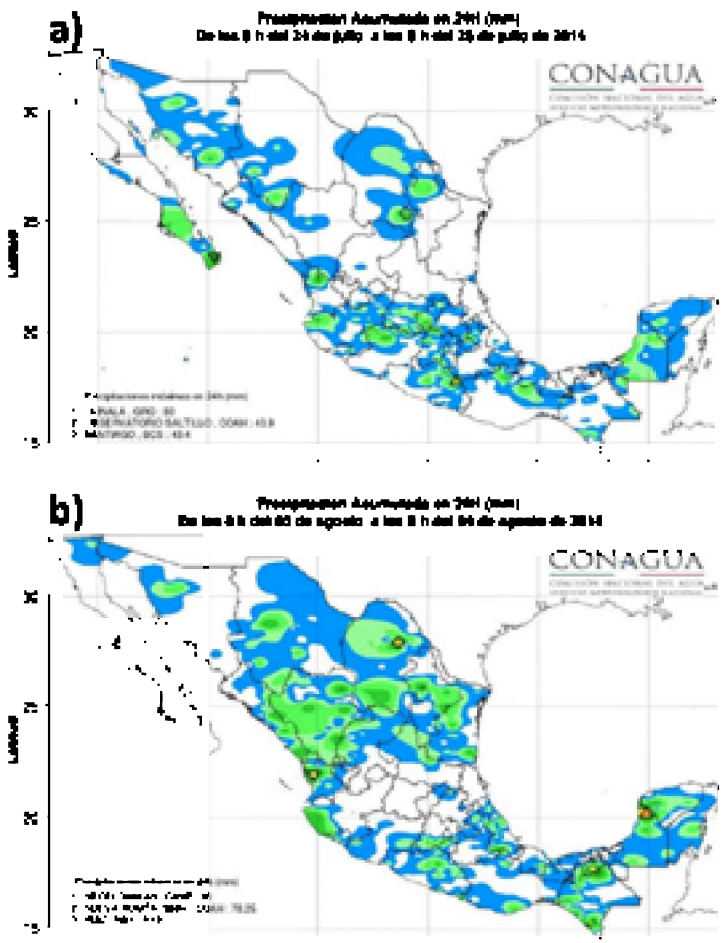


Figura 3. Acumulaciones de lluvia en periodos de 24 horas (iniciando a las 08:00 horas) seleccionados en 2014: a) del 24 al 25 de julio, b) del 3 al 4 de agosto y c) del 7 al 8 de septiembre. Complementan la Figura 2. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

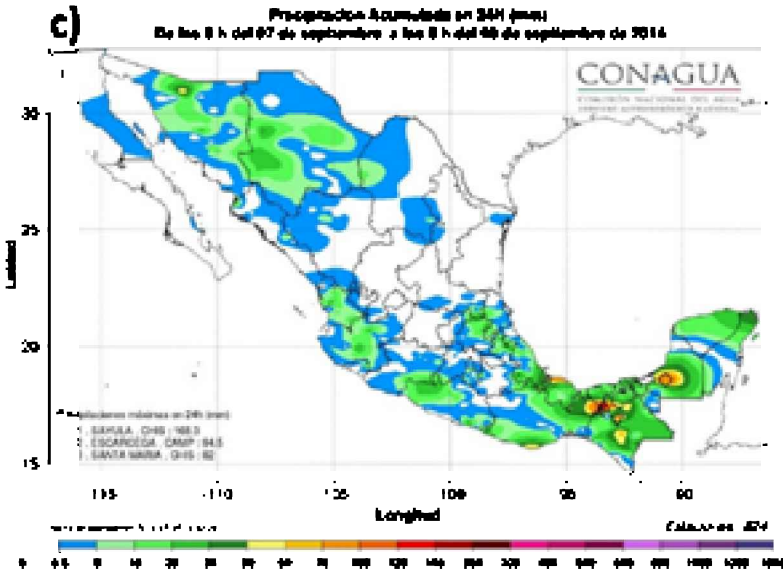


Figura 3 (continuación). Acumulaciones de lluvia en periodos de 24 horas (iniciando a las 08:00 horas) seleccionados en 2014: a) del 24 al 25 de julio, b) del 3 al 4 de agosto y c) del 7 al 8 de septiembre. Complementan la Figura 2. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Con las imágenes del satélite GOES-15 disponibles para la temporada 2014, se elaboraron mapas con frecuencia de nubosidad. Esta frecuencia es proporcional al número de veces en que la nube alcanza una altura mayor de 10.5 kilómetros en un elemento individual de cada imagen (píxel); en general, las frecuencias altas se relacionan con la presencia abundante de sistemas convectivos. Para el mes de julio (Figura 4), se encontró una banda con frecuencia alta a lo largo del margen occidental de las elevaciones más prominentes de la Sierra Madre Occidental hacia el norte de Sinaloa y la frontera Sonora-Chihuahua. Un análisis detallado a diferentes horas indicó que, después de formarse y organizarse en sistemas (o grupos), la nubosidad se desplazó desde las elevaciones superiores a 2 km hacia las planicies costeras del Golfo de California. La frecuencia de nubosidad alcanzó un mínimo sobre el Océano Pacífico, más allá de las Islas Marías (21.5 °N, 106.5 °O aproximadamente), aunque esto se encuentra definido al oeste de la península de Baja California. A tal efecto, concuerda con los patrones conocidos de convección (Douglas *et al.*, 1993). Aunque se calculó (pero no se muestra en este trabajo) la banda se desplazó hacia el sur a medida que el tiempo evolucionó para estar sobre las costas de Nayarit y Jalisco en agosto y septiembre.

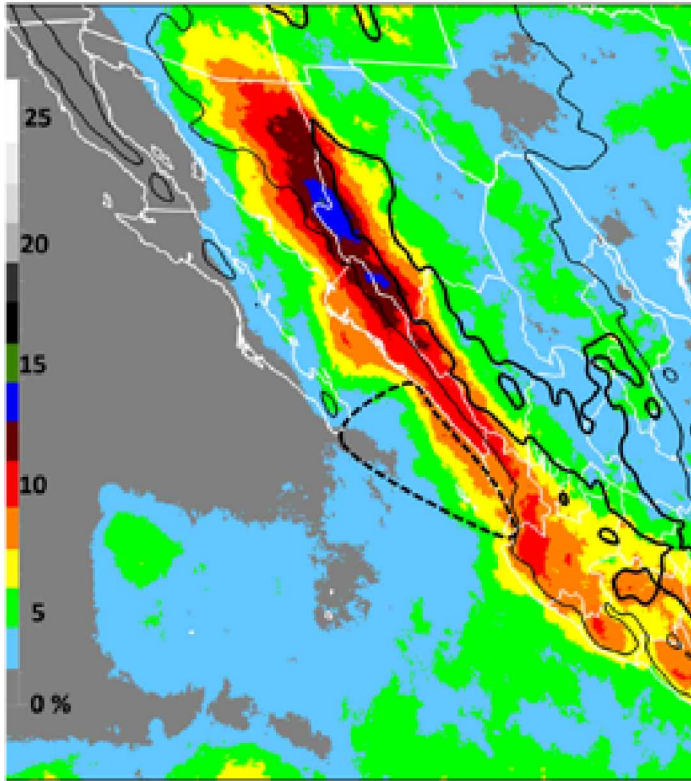


Figura 4. Distribución media de la frecuencia de nubosidad que alcanzó altura de 10.5 km o mayor estimada con datos tomados cada 30 minutos durante julio de 2014. Azul celeste es para la frecuencia mínima y azul marino indica máxima. El contorno color negro representa la elevación del terreno a 2000 m y la línea punteada es la boca del Golfo de California.

Alineado a lo anterior, en julio de 2014, la lluvia mensual estimada por GPM tuvo una distribución espacial con acumulaciones de ~200 mm a lo largo de la Sierra Madre Occidental que excedieron los 400 mm en la costa de Nayarit y boca del Golfo de California. En el sur de la península de Baja California, agosto y septiembre fueron lluviosos en el rango de 100 a 200 mm. También se encontró que las cantidades de lluvia mensual superaron el promedio climatológico para estaciones del SMN en Baja California Sur, Sinaloa y Nayarit. Para confirmar los resultados anteriores, y con fundamento en que la presencia o ausencia de sequías responde a los cambios por intensidad y frecuencia de la lluvia recibida, se consultó el monitor de sequía del SMN (2021). En general, para 2014 en Baja California Sur, Nayarit, Sinaloa y el sur de Sonora las condiciones de sequía fueron nulas; el resto del noroeste estaba anómalamente seco o con sequía moderada, excepto el norte de Baja California, al que se le asignó sequía severa. Esto se corresponde con la banda de nubosidad mostrada en la Figura 4.

C) DESCARGAS ELÉCTRICAS

La Figura 5 muestra las detecciones de descargas eléctricas asociadas a los eventos en la Figura 2. Mientras que las imágenes de satélite son instantáneas, a una hora y minuto específico, en la Figura 5, las detecciones mostradas cubren periodos de 6 horas durante 24 horas consecutivas a partir de las 13:00 h (centro de México). En cada caso se notan las descargas de los sistemas, además de otros eventos en el occidente de México; esta separación de 4 grupos de 6 horas es de utilidad para determinar el movimiento de los sistemas de interés. Por ejemplo, el sistema del 24 de julio (Figura 5a) se desplazó desde las costas de Jalisco y Nayarit a través de las Islas Marías y boca del Golfo de California hasta llegar al municipio de Los Cabos, Baja California Sur. En cambio, el sistema del 8 de septiembre (Figura 5c) presentó poco desplazamiento, lo que tiene sentido dada la presencia de nubosidad alta en la región (Figura 2c).

El análisis de descargas eléctricas se extendió al conteo de 1 895 056 registros, del 1 de julio al 30 de septiembre de 2014, para los siete estados del noroeste y regiones del Golfo de California (Figura 6, Tabla 1). Casi el 25 % de las descargas (465 914) se presentaron en la boca del golfo seguido por 22 % en Chihuahua (410 857) y 13 % en Sonora (253 007), mientras que los estados en la península de Baja California tienen cantidades bajas menores a 3 % (< 50 000). Se calculó la densidad espacial (registros por km²) en una retícula cuadrada que cubre toda el área de interés con una resolución por píxel de 5.6 × 5.6 km; el orden cambió de manera que las regiones más extensas (área > 100 000 km²) como Chihuahua, Durango y el Golfo de California ocuparon los últimos lugares. Pero Nayarit, con el área más pequeña (27 857 km²) de las nueve regiones y únicamente el 11 % del área de Chihuahua, quedó en primer lugar con 5.5 descargas por km² seguido por la boca del Golfo (4.6) y Sinaloa (4.4). Esto reafirma los resultados de frecuencia alta de nubosidad convectiva, mayor de 10.5 km, en la imagen del satélite representativa de julio (Figura 4).

Para tener una referencia que tome en cuenta la cantidad de habitantes, se calculó la densidad de descargas eléctricas con respecto a la encuesta intercensal más adecuada para el periodo de estudio (INEGI, 2015). Nuevamente, Nayarit tomó el primer lugar con 1.2 descargas por millón de habitantes. A nivel localidad, los pueblos de Nayarit con menos de 20 mil habitantes y ubicados en planicies costeras (Santiago Ixcuintla, Rosamorada y Ruiz) ocuparon los primeros tres lugares (14 a 19 descargas por km²), lo que estima un alto peligro en la seguridad de sus habitantes, principalmente durante la noche y madrugada. Se encontró que cada uno de los estados tiene sitios de concentración máxima en la Sierra Madre Occidental para Sonora (Yécora, 5.2 km⁻²) y Sinaloa (Escuinapa, 13.7 km⁻²), mientras que cerca de la de capital de Baja California Sur se atestiguó una zona activa (3.9 km⁻²), aunque el máximo (8.1 km⁻²) se observó en una

zona casi despoblada en el centro del estado. En Baja California, la actividad es relativamente menguante (máximo 2.8 km^2) al sur de Mexicali, cerca de la costa del Golfo de California, en la que algunos sistemas convectivos logran cruzar desde Sonora o Arizona, Estados Unidos.

Por ser una región oceánica que separa al continente de la península de Baja California y contar con recursos ecológicos importantes, el Golfo de California requirió atención en nuestro estudio. En este punto se separó en dos partes:

1. La boca. Está frente a Nayarit, parte de Sinaloa y Baja California Sur;
2. El resto del golfo. Se encuentra rodeado por Baja California, Baja California Sur, Sonora y norte de Sinaloa.

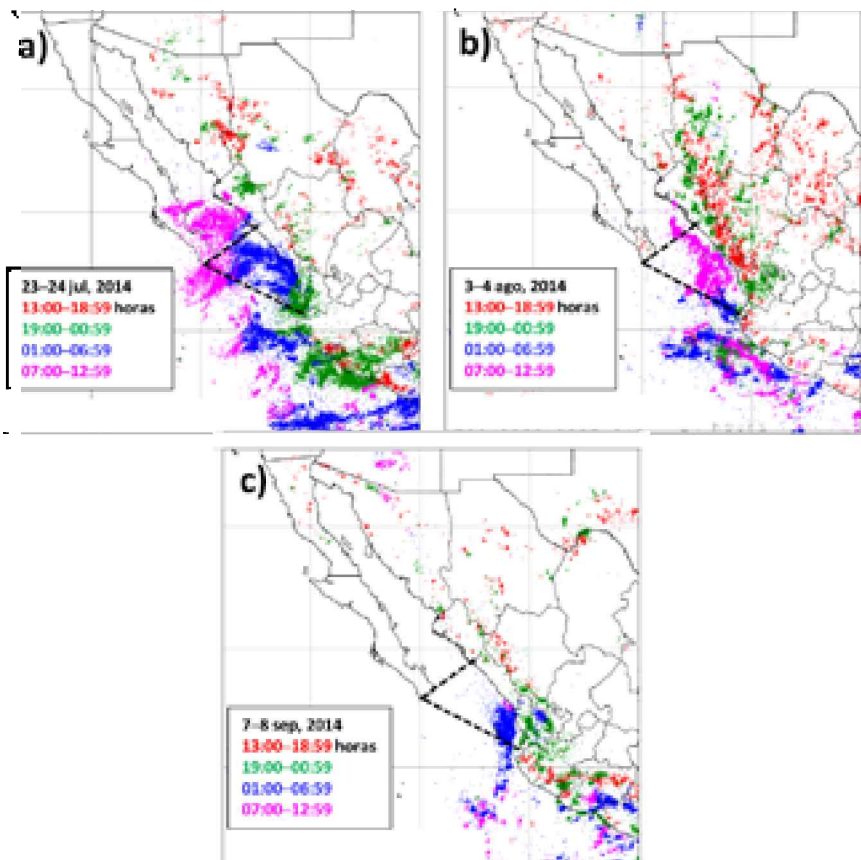


Figura 5. Distribución de descargas eléctricas en periodos de 6 horas (tiempo del centro de México) durante: a) del 23 al 24 de julio 2014, b) del 3 al 4 de agosto 2014 y c) del 7 al 8 de septiembre 2014. Cada punto es una descarga eléctrica registrada, iniciando con el color rojo seguido por el verde, azul y rosa. La línea punteada marca la boca del Golfo de California.

Ya que los sistemas convectivos del continente se desplazan al oeste, una parte de ellos se disipa en el golfo, aunque algunos logran cruzar hasta el Océano Pacífico; esta es una de las razones de que la boca ocupe el primer lugar en el total de detecciones, con más de 465 mil, y el segundo en densidad (Figura 6). Una de las implicaciones es el peligro al que están expuestas las embarcaciones marítimas que transitan lentamente en la región, algunas de carga y otras de pesca deportiva o comercial; lo mismo ocurre con el transporte aéreo, debido a que en la costa del Golfo y boca, así como en la península de Baja California, hay una decena de aeropuertos con rutas de alcance regional, nacional e internacional. Para finalizar, un grupo sobresaliente de riesgo se relaciona con empresas que organizan actividades al aire libre con grupos de turistas a lo largo de las costas de sitios como Cabo San Lucas, La Paz, Loreto, Mazatlán, San Blas y Nuevo Vallarta.

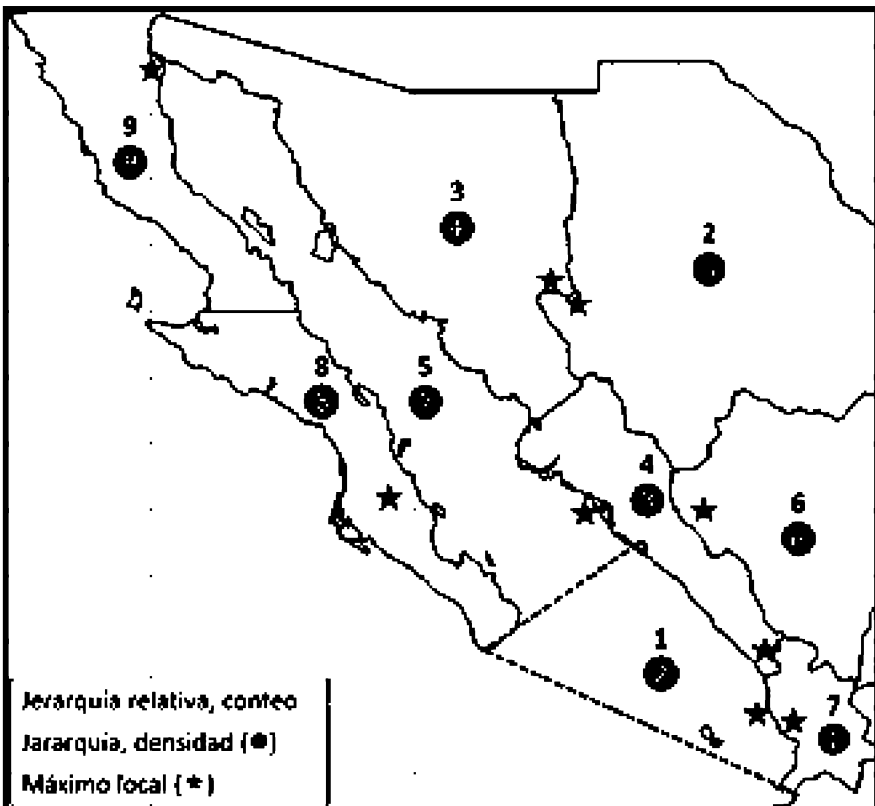


Figura 6. Jerarquía relativa y de densidad espacial (por kilómetro cuadrado) de descargas eléctricas durante el periodo del 1 de julio al 30 de septiembre de 2014. El número uno ocupa la mayor jerarquía y el nueve la menor. Se aplica un conteo mediante una retícula horizontal de 5.6×5.6 km. La estrella indica la posición del máximo relativo a cada una de las nueve regiones mostradas. La línea punteada delimita la boca del Golfo de California.

Tabla 1. Conteo, densidad espacial (por km²) y densidad poblacional (por habitante) del número de descargas eléctricas registradas entre el 1 de julio y 30 de septiembre, 2014.

N	REGIÓN	CONTEO	DENSIDAD ESPACIAL	DENSIDAD POBLACIONAL
1	Boca del Golfo de California	465,914	4.6	X
2	Chihuahua	410,857	1.7	0.11
3	Sonora	253,007	2.0	0.09
4	Sinaloa	194,533	4.4	0.07
5	Golfo de California	189,863	1.2	X
6	Durango	179,202	1.5	0.10
7	Nayarit	141,080	5.5	0.12
8	Baja California Sur	49,969	0.8	0.07
9	Baja California	10,631	0.1	0.01
	Total=	1,895,056		
	X =no aplica			

DISCUSIÓN

Mediante el análisis de una temporada (julio a septiembre de 2014) de imágenes satelitales asociadas a convección en el noroeste de México, se ha determinado la presencia de regiones activas sobre la Sierra Madre Occidental. Las planicies costeras adyacentes a la sierra y Golfo de California, incluyendo su boca, son regiones extraordinarias por su posición geográfica respecto a las rutas de los sistemas convectivos. Una posibilidad para explicar estos patrones está en el desplazamiento relativamente lento de los sistemas convectivos (Farfán y Zehnder, 1994) a lo largo de la zona costera del golfo en ambientes con humedad relativa alta que favorecen la persistencia durante temporadas más extensas (Lang *et al.*, 2007). Con estos patrones de nubosidad, se generan lluvias en la sierra durante la tarde y noche mientras que por la madrugada ocurren sobre el Golfo de California.

Los reportes sobre detección de descargas eléctricas permiten determinar los sitios en que se registran los mayores acumulados (boca del Golfo, Chihuahua y Sonora) y densi-

dades espaciales (Nayarit, boca del Golfo y sur de Sinaloa). A nivel localidad, poblaciones rurales cercanas a la costa de Nayarit tienen las densidades más altas (9 a 19 descargas por km²) seguidas por Sinaloa (8 a 14). En comparación las densidades son bajas en el sur de la península de Baja California (2 a 4) y se asocian a la menor frecuencia, escala, intensidad y duración de los sistemas convectivos, así como a un ambiente atmosférico más hostil, con menor contenido de humedad (Farfán y Fogel, 2007), que disminuye abruptamente hacia el Océano Pacífico.

Cabe señalar que las defunciones por descargas ocurren en gran parte de los estados, las mayores frecuencias se dan en Chihuahua, Sinaloa y Nayarit, mientras que Baja California Sur tiene un mínimo de casos documentados (Figura 1). Hay dos posibles explicaciones a estos resultados: en primer lugar, en cuanto a la convección, el continente es más activo (en frecuencia e intensidad) que la península y, por tanto la población está expuesta al peligro por impacto de descargas eléctricas. En particular, la actividad convectiva en Nayarit es un componente importante de la estación húmeda en el noroeste de México. Ocurre porque la interacción termodinámica entre la orografía de la Sierra Madre Occidental y la circulación monzónica, que generalmente va acompañada de tormentas eléctricas, influye en el ingreso de humedad hacia el continente (Brito Castillo *et al.*, 2010), favoreciendo los sistemas convectivos con movimiento desde las partes altas hacia la costa (Vega Camarena *et al.*, 2018). También, sobre el Océano Pacífico hay influencia de ondas tropicales que contribuye a incrementar los sistemas convectivos. La otra explicación depende de factores sociales y económicos; por ejemplo, la población perteneciente a los municipios con más defunciones tiene condiciones limitadas de bienestar con respecto a educación, servicios de salud e ingreso económico. Una revisión de los parámetros de pobreza a nivel estatal muestra que Chihuahua, Nayarit y Durango tienen los índices de desarrollo humano más bajos del país (PNUD, 2015). En particular, los municipios con alta mortandad tienen los menores índices en el estado correspondiente (Nayarit y Chihuahua; PNUD, 2019). Además, el peligro se incrementa con la práctica de labores en espacios abiertos que tienen lugar en la región, como la agricultura y la pesca. De igual forma que en Raga *et al.* (2014), se establece que el municipio más afectado a nivel nacional es San Felipe del Progreso, Estado de México.

CONCLUSIÓN

El noroeste de México se encuentra en una región activa con respecto a sistemas convectivos que, además de contar con la presencia de lluvia intensa, pueden favorecer eventos extremos y condiciones de peligro para la población. Una de estas condiciones son las descargas eléctricas que están asociadas con daños materiales y causan lesiones o hasta

la muerte. Se encontró que, durante el mes de julio de 2014, la concentración espacial más alta de descargas (tanto a nivel estatal como local) ocurre sobre regiones costeras de Sinaloa y Nayarit, así como en la boca del Golfo de California. Nayarit, aunque es el estado más pequeño en la región, recibe una cantidad ingente de descargas durante este mes, así como en agosto y septiembre. Asimismo, en el decenio 2009-2018, Nayarit resultó ser el estado con más defunciones, seguido por Chihuahua y Durango, que contaron con los municipios de mayor riesgo potencial dada su vulnerabilidad social y económica. Si bien es necesario extender este tipo de estudios a otros años y regiones del país a fin de obtener resultados más generales, también lo es la divulgación de este conocimiento a las autoridades y los responsables de tomar decisiones en las localidades con mayor actividad eléctrica, para que sus habitantes se encuentren preparados ante la ocurrencia de eventos asociados con sistemas convectivos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CICESE (Unidad La Paz), CIBNOR (Unidad Guaymas), Universidad Autónoma de Baja California Sur (Gestión y Ciencias del Agua) y al programa Cátedras Conacyt las facilidades proporcionadas para el desarrollo de este trabajo de investigación. Extendemos nuestra simpatía a la Universidad de Wisconsin por las imágenes del satélite GOES-15, al Servicio Meteorológico Nacional los datos de lluvia y a la red World Wide Lightning Location Network por la base de datos de descargas eléctricas. A la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos de Conacyt, por considerar la presentación de este trabajo durante la reunión anual 2021. Los autores declaran la ausencia de conflictos de intereses.

REFERENCIAS

- Adams, D. K., Comrie, A. C. (1997). The North American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (10), pp. 2197-2213.
- Avila, L. A. (2014). Hurricane Norbert EP142014, 2-8 Septiembre 2014. National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. Recuperado de https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP142014_Norbert.pdf
- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), pp. 2051-2068.

- Barrett, B. S., Farfán, L. M., Raga, G. B., Hernández, D. H. (2017). The unusual early morning tornado in Ciudad Acuña, Coahuila, Mexico on 25 May 2015. *Monthly Weather Review*, 145 (6), pp. 2049-2069.
- Brito Castillo, L., Vivoni, E. R., Gochis, D. J., Filonov, A., Tereshchenko, I., Monzón, C. (2010). An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 74, pp. 531-539.
- Cooper, M. A., Holle, R. L. (2019). Reducing Lightning injuries worldwide. Springer, Cham. ISBN 978-3-030-08480-6. pp. 233
- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., Reyes, S. (1993) The Mexican Monsoon. *Journal of Climate*, 6 (8), pp. 1665-1677.
- Farfán, L. M., Fogel, I. (2007). Influence of tropical cyclones on humidity patterns over northwestern Mexico. *Monthly Weather Review*, 135 (4), pp. 1208-1224.
- Farfán, L. M., Barrett, B. S., Raga, G. B., Delgado, J. J. (2021). Characteristics of mesoscale convection over northwestern Mexico, the Gulf of California, and Baja California Peninsula. *International Journal of Climatology*. 41 (1): E1062-E1084.
- Farfán, L. M., Zehnder, J. A. (1994). Moving and stationary mesoscale convective systems over Northwest Mexico during the Southwest Area Monsoon Project. *Weather and Forecasting*, 9 (4), pp. 630-639.
- García, E., Trejo, R. I. (1990). Causas de la precipitación en Nayarit. Memoria del XII Congreso Nacional de Geografía. Tepic, México: Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística e Instituto Nacional de Estadística, pp. 234-243.
- INEGI (2015). Encuesta intercensal 2015. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015>.
- INEGI (2020). Censo de población y vivienda 2020. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>.
- Lang, T., Ahijevych, D., Nesbitt, S., Carbone, R. E., Rutledge, S. A., Cifelli, R. (2007). Radar-observed characteristics of precipitating systems during NAME 2004. *Journal of Climate*, 20 (9), pp. 1713-1733.
- Martinez Sanchez, J. N., Cavazos, T. (2014). Eastern tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. *Climate Research*, 58, pp. 221-234.
- Mosiño Alemán, P. A., García, E. (1974). The climate of Mexico. World survey of climatology. En: Bryson, R.A. and Hare, F.K. (Eds.) *Climates of North America*. Amsterdam: Elsevier, pp. 345-404.
- Negri, A. J., Adler, R. F., Nelkin, E. J., Huffman, G. J. (1994). Regional rainfall climatologies derived from special sensor microwave imager (ssm/i) data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75 (7), pp. 1165-1182.
- NASA (2021). *Giovanni. The bridge between data and science v 4.35*. Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

- PNUD (2015). Índice de Desarrollo Humano para las entidades federativas, México 2015. Recuperado de <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/library/poverty/indice-de-desarrollo-humano-para-las-entidades-federativas--mexi.html>
- PNUD (2019). Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local. Recuperado de <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/library/poverty/informe-de-desarrollo-humano-municipal-2010-2015--transformando.html>
- Raga, G. B., de la Parra, M. G., Kucienska, B. (2014) Deaths by lightning in Mexico (1979-2011): threat or vulnerability? *Weather, Climate, and Society*, 6 (4), pp. 434-444.
- SMN (2021). Monitor de sequía de América del Norte. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>
- ss (2021). Defunciones datos abiertos. Recuperado de http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/da_defunciones_gobmx.html
- Vega Camarena, J. P., Brito Castillo, L., Farfán, L. M. (2018) Contrasting rainfall behavior between the Pacific coast and the Mexican Altiplano. *Climate Research*, 76, pp. 225-240.

**Denise Freitas Soares de Moraes
Martín José Montero Martínez**

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

12

CAPÍTULO

**EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EMILIANO ZAPATA,
TABASCO. UN ACERCAMIENTO ENTRE LAS
CIENCIAS SOCIALES Y ATMOSFÉRICAS**

RESUMEN

Es indudable que el cambio climático afecta a los actores sociales del municipio de Emiliano Zapata, Tabasco, ubicado en la parte baja de la cuenca del río Usumacinta. La presente contribución explora cómo perciben este fenómeno climático, con base en información empírica y secundaria se propone argumentar que el discurso prevaiente a nivel internacional, nacional y estatal, sobre el cambio climático, carece de correspondencia a nivel local, donde no se promueve el concepto y a la vez que escasea la aplicación de programas institucionales. Por otra parte, independientemente de la aprehensión del concepto de cambio climático, en el marco de lo local es evidente el impacto negativo de las variaciones en los periodos de lluvia y del incremento calórico. Asimismo, dichas percepciones coinciden con el análisis de datos climatológicos de la región, que muestra una tendencia a menor precipitación durante las últimas décadas.

Palabras clave: cambio climático, índice normalizado de precipitación, percepciones.

ABSTRACT

This chapter explores how the local social stakeholders perceive climate change in the municipality of Emiliano Zapata, Tabasco, in the lower basin of the Usumacinta river. Based on empirical and secondary information sources, we propose this paper, this research that the prevalent discourse of climate change at international, national and state levels lacks correspondence with the local level, where the concept is rather unfamiliar, and governmental programs aimed at promoting adaptation and mitigation measures are scarce. On the other hand, regardless of the understanding of climate change, the negative impact of the variations in the rain periods and the increase of heat is evident at the local level. Moreover, these perceptions are consistent with the regional analysis of climatological data that displays a tendency to reduced precipitation during recent decades.

Keywords: perception, climate change, standard precipitation index.

PUNTO DE PARTIDA

En la década del setenta, la problemática ambiental prevalecía en el debate internacional sobre el desarrollo, tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente Humano, celebrada en Suecia en 1972. En la actualidad, la problemática global se ha articulado cada vez más con el cambio climático, al punto de convertirse en uno de los principales temas de la agenda ambiental internacional. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007; 2014; 2021), los grandes desafíos del siglo XXI resultarán de los impactos negativos del cambio climático sobre los sistemas socioeconómicos y biofísicos, debido a las alteraciones en las temperaturas medias y los patrones de precipitación pluvial, así como la intensidad y frecuencia de los eventos hidrometeorológicos extremos; tales afectaciones reducen la productividad agrícola, anegan las zonas costeras, derriten los hielos polares, merman la biodiversidad, perjudican los sistemas socioecológicos, y ocasionan ingentes pérdidas económicas. Durante el año 2021, el IPCC apuntaló que los cambios observados en el clima no tienen precedentes en cientos de miles de años, y no se podrán revertir hasta dentro de varios siglos o incluso milenios. Según el economista Nicholas Stern, el costo de no establecer medidas serias y eficientes para frenar el cambio climático podría comprometer anualmente hasta un 5 % del producto interno bruto (PIB) mundial. Por ello es imprescindible y urgente tanto identificar mecanismos orientados a mitigar y adaptarse al cambio climático como ponerlos en práctica desde el nivel local (Stern, 2006; Araújo *et al.*, 2011; IPCC, 2021).

El encuadre del discurso respecto al cambio climático ha variado significativamente a lo largo de los años. De una perspectiva donde predominaba el análisis de la dimensión de las amenazas naturales y las pérdidas materiales, se ha ampliado paulatinamente hacia los procesos sociales de construcción de riesgo, los cuales incrementan la vulnerabilidad y provocan los desastres. Con la evolución del debate, los conceptos de *vulnerabilidad* y *adaptación* han cobrado relevancia, lo cual conlleva a entender los desastres como construcciones sociales e históricas, a diferencia de sus interpretaciones de corte únicamente naturalistas. Desde esta perspectiva, los desastres son la sumatoria de la vulnerabilidad poblacional y el incremento en la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos atípicos atribuibles al cambio climático y/o a la variabilidad climática (Ruiz Meza, 2014; Cardona, 2012).

Debido a la complejidad que implica el acercamiento al cambio climático y sus consecuencias, es necesario incorporar cuestiones de diversas índoles a su análisis, entre ellas, las dimensiones culturales. Relacionadas con el significado y relevancia que el tema de cambio climático representa para los diferentes grupos sociales, pueden contribuir a enriquecer el conocimiento y debate en la materia al poner en evidencia una dimensión subjetiva, relacionada con la forma como las personas entienden el fenómeno y en qué

medida se sienten afectadas por él. En ese sentido, el estudio de las percepciones cobra especial relevancia, dado que las acciones de un grupo social en relación con el ambiente (por ejemplo, las decisiones sobre estrategias de adaptación) se basan no sólo en los aspectos materiales, sino también en los culturales. De tal suerte, la percepción actúa como una guía para las actitudes y conductas humanas; y conocerlas contribuye a diseñar con mayores posibilidades de éxito políticas públicas relacionadas con el cambio climático (O'Brien y Wolf, 2010; Viscusi y Zeckhauser, 2006; Salazar y Ordóñez Guzmán, 2021).

Al abordar el cambio climático priorizando el ámbito de las percepciones, no se sugiere reducir la existencia del fenómeno a una construcción social, dado que estamos conscientes de sus dimensiones física, biológica, química, entre otras (Bursztyn y Eiró, 2015; Meira Cartea y Arto Blanco, 2014). Sin embargo, la perspectiva sociocultural enriquece el conocimiento y análisis del fenómeno; de hecho, en 2014 el IPCC planteó que será cada vez más importante conocer las percepciones públicas sobre el cambio climático, pues constituyen una variable fundamental para contextualizar las estrategias y políticas de adaptación y mitigación. De esa manera, este escrito se aboca a establecer un puente entre las percepciones sociales y el análisis climático objetivo a partir de los datos observados (GNDR, 2020).

Los objetivos de esta contribución son:

- a) Conocer las percepciones de los actores locales acerca del cambio climático en un municipio de la cuenca del río Usumacinta.
- b) Analizar la posible correspondencia entre la percepción del fenómeno y las tendencias de los datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas más cercanas al municipio de estudio.
- c) Analizar cómo los cambios en el clima han afectado las actividades productivas a nivel local.
- d) Conocer el marco institucional nacional para atención al cambio climático.

En particular, el presente documento trata de contestar las siguientes interrogantes:

- ¿Los pobladores locales tienen conocimiento del concepto de cambio climático?
- ¿Los pobladores locales perciben cambios en las temperaturas medias, en las lluvias y sequías?
- ¿Cuál es la tendencia de los datos de precipitación y temperatura en el municipio de estudio y qué tanto coincide con las percepciones locales?
- ¿Cuáles son los impactos relacionados con el cambio climático percibidos a nivel local?
- ¿Cuál es el marco institucional para atender las consecuencias del cambio climático a nivel nacional e internacional y en qué medida se refleja a nivel local?

METODOLOGÍA Y CONTEXTO

El estudio de caso presentado a continuación aporta elementos de análisis de acuerdo con las medidas nacionales e internacionales para atender los efectos adversos del cambio climático. Se analizan los cambios locales de precipitación más significativos en las últimas cinco décadas y se indaga la percepción de los pobladores del municipio de Emiliano Zapata, Tabasco, ubicado en la parte baja de la cuenca del río Usumacinta (Figura 1), respecto a su vulnerabilidad en la materia.

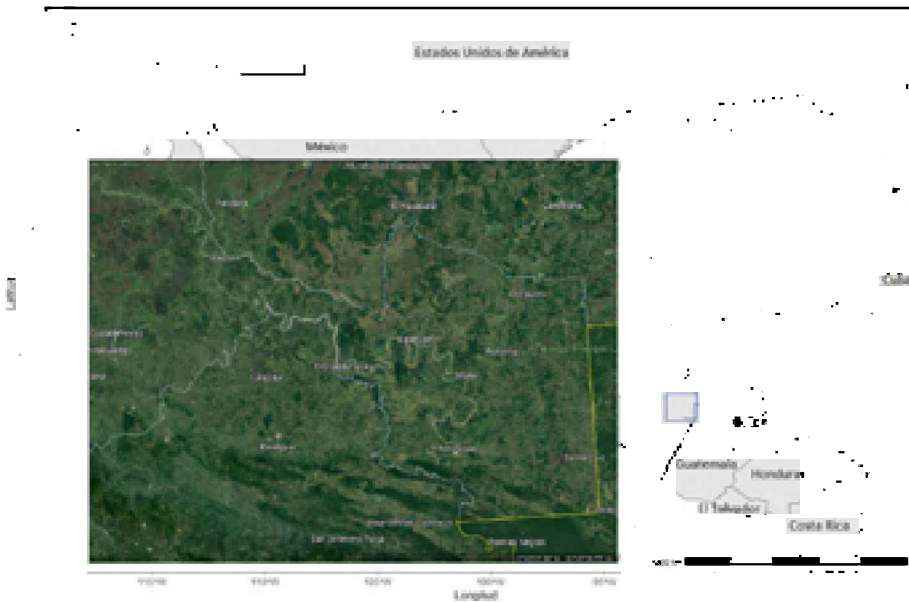


Figura 1. Ubicación del municipio de Emiliano Zapata, Tabasco.

La información se extrajo mediante la combinación de dos métodos, uno de análisis climático y el otro social. Para el primero, relacionado con la precipitación, se manejó la base de datos climatológica en malla creada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la cual llamaremos aquí CLICOMg, a partir del acervo climatológico oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que comprende más de 5000 estaciones y está almacenada en el sistema CLICOM (*climatological computing*). El periodo de la base de datos CLICOMg comprende de 1960 a 2008, y para su generación se aplicaron algunas medidas de gestión de calidad de datos al CLICOM, tales como:

- Remover precipitaciones negativas.
- Revisar las temperaturas máximas menores que o iguales a la temperatura mínima del mismo día; en tales casos, ambas temperaturas se consideraron valores perdidos.

- Revisar los días con el mismo valor repetido 10 o más veces consecutivas (excepto para precipitación cero); en tales casos, todos los valores se consideraron perdidos.
- Revisar valores diarios que excedieran significativamente los valores climatológicos; en tales casos, los datos fueron removidos y considerados valores perdidos.

Los datos de estación ya filtrados con las medidas de gestión se interpolaron a una malla regular de resolución espacial de $1/8^\circ$ para todo México (Zhu y Lettenmier, 2007; Muñoz Arriola *et al.*, 2009; CICESE, 2013) mediante el método *Synographic Mapping System* (SYMAP) (Shepard, 1984). Dicha técnica procesa la media ponderada (basada en el inverso del cuadrado de la distancia a la celda en cuestión) de todos los registros en la vecindad de una celda para producir una base de datos diarios de precipitación y temperatura (máxima y mínima) superficial.

Posteriormente se calcularon algunos índices de cambio climático relevantes para la localidad de acuerdo a las normas dadas por el CCL/CLIVAR/JCOMM *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI, 2020):

- SU. El número de días de verano, definido como la cantidad de días en el año cuya temperatura máxima excede los 25°C .
- DTR. El rango de temperatura diurna media, la diferencia promedio mensual entre las temperaturas máxima y mínima diarias.
- PRCPTOT. La suma anual de precipitación, en mm, en los días húmedos (en que la precipitación fue de al menos 1 mm).

Finalmente, se calculó el Índice Normalizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés), creado por McKee *et al.* (1993 y 1995), el cual es un indicador acreditado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012) para calcular eventos potenciales de sequía o precipitaciones intensas en un lugar determinado.

Tabla 1. Valores del índice normalizado de precipitación.

2.0 y más	extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	muy húmedo
1.0 a 1.49	moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	moderadamente seco
-1.5 a -1.99	severamente seco
-2 y menos	extremadamente seco

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (2012).

Para abordar las percepciones sociales, la investigación se apoyó en el paradigma interpretativo o fenomenológico (Bolio, 2012), el cual trata de comprender el significado atribuido por los individuos a las cosas y, en consecuencia, parte de la perspectiva del sujeto para entender la realidad. Para Miranda Beltrán y Bernal (2020), el acto de percibir se deriva de una interacción entre factores que permiten acceder a la realidad, significarla y darle sentido. En cuanto al método de acercamiento a las percepciones, fue de carácter exploratorio y con un abordaje cualitativo, mediante la aplicación de entrevistas semiestructuradas a 21 actores clave en Emiliano Zapata. Este método permite profundizar en las opiniones personales respecto a un tema en específico, sin la intención de generalizar (Naranjo Hernández y González Bernal, 2021). Se entrevistaron personas involucradas en los sectores primarios de producción (pescadores y ganaderos), funcionarios públicos municipales y federales, estudiantes e integrantes de una organización civil de desarrollo (OCD).

Los contenidos temáticos de las entrevistas se enfocaron en bosquejar el imaginario social atribuido al concepto e impactos del cambio climático; en virtud de ello, su diseño planteó los siguientes ejes:

- a) Información sobre el cambio climático.
- b) Manifestaciones del fenómeno a nivel local.
- c) Sus impactos en los medios de vida de las poblaciones.
- d) Conocimiento acerca de programas gubernamentales de atención al cambio climático.

Asimismo, se realizaron consultas a fuentes secundarias de información con la finalidad de describir la institucionalidad del cambio climático y trazar un breve marco socioambiental de la región de estudio, para complementar los datos obtenidos con el desarrollo del trabajo de campo.

BREVE CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE ESTUDIO

Para la caracterización del municipio de Emiliano Zapata se consideraron los siguientes rubros: variables demográficas, acceso a la educación, actividades económicas preponderantes y niveles de acceso a los servicios (agua entubada, drenaje, electricidad y sanidad). Con relación a las variables demográficas, el municipio cuenta con 32 181 habitantes, correspondientes al 1.34 % de la población del estado de Tabasco. En términos de superficie, su territorio representa el 2.4 % del total estatal y el 100 % de su territorio está dentro de la cuenca del río Usumacinta. La densidad poblacional es de 54.3 habitantes/km² (INEGI, 2020).

La educación es condicionante de la calidad de vida de un individuo, y la alfabetización es una necesidad básica de aprendizaje que se relaciona con la ciudadanía, la identidad cultural, el desarrollo socioeconómico, los derechos humanos y la equidad (UNESCO, 2006). Los datos del INEGI (2020) muestran que, aunque en Emiliano Zapata el mayor porcentaje de población de 15 años o más cuenta por lo menos con nivel básico de escolaridad (94.5 %), apenas el 21.3 % alcanza el nivel superior.

Tabla 2. Escolaridad en población de 15 años o más.

ESCOLARIDAD	PORCENTAJE DE POBLACIÓN
Sin escolaridad	5.2
Básica	47.5
Media superior	25.7
Superior	21.3
No especificado	0.3

Fuente: INEGI, (2020). Censo de Población y vivienda.

Aunque aumentar el alcance de la educación es insuficiente para reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático si se toma en cuenta la existencia de empleos mal remunerados y las actividades productivas en deterioro, se trata de un elemento fundamental que les permite a las poblaciones adaptarse a nuevas posibilidades de empleo, obtener medios de vida en otros sectores y enfrentar con mejores herramientas los embates fenómenos hidrometeorológicos, como una inundación o una sequía. A ese fin, la educación debe centrarse en el desarrollo, no sólo de conocimientos teóricos e históricos, sino también de habilidades y capacidades para subsanar las condiciones de fragilidad y aumentar el empoderamiento social.

Cuantificar la población económicamente activa (PEA) de la región de estudio ayudó a construir una visión económica de la zona. Dicha cifra en 2020 en Emiliano Zapata fue de 62.9 %, del cual los hombres constituyen un 58.5 %, y las mujeres el 41.5 % (INEGI, 2020). Por otra parte, al analizar la disponibilidad de servicios en las viviendas del municipio de estudio, se observa que la energía eléctrica tiene una cobertura del 99.4 %, mientras que la disposición de agua entubada representa el 80.2 % y el acceso a drenaje el 99.2 %; estas dos últimas cifras constituyen una excepción respecto a otras localidades del país, donde el acceso al agua siempre es mayor que al saneamiento. Asimismo, el 5.9 % de la población presenta algún tipo de discapacidad, especialmente las personas de 60 años y más. Lo anterior es relevante si consideramos que la locomoción y habilidad para comunicarse (INEGI, 2020) en caso de emergencia por inundaciones son imprescindibles.

Según los indicadores de marginación de Conapo (2020), Emiliano Zapata presenta un índice de marginación muy bajo, y definitivamente Tabasco no se ubica entre los estados más marginados del país; de hecho, ninguno de los 17 municipios en la entidad cuenta con elevado grado de marginación. Emiliano Zapata es uno de los cuatro municipios con marginación muy baja, seguidos por otros siete con marginación baja y seis con marginación media.

MARCO INTERNACIONAL Y MEXICANO RELATIVOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

El tema del cambio climático es motivo de controversia en el medio científico, con dos grandes corrientes de argumentos antagónicos: una liderada por el IPCC, cuya premisa básica se centra en la existencia del cambio climático al igual que en su carácter antrópico y la otra, por un grupo de investigadores considerados “escépticos”, entre ellos Freeman Dyson, Bjørn Lomborg, Myron Ebell, Kiminori Itoh, Ivar Giaever, Will Harper, etc., todos ellos científicos renombrados en distintas ramas de estudio. La mayoría de ellos reconoce el potencial de las emisiones humanas de gases de efecto invernadero (GEI) para impactar en el clima, pero afirma que este efecto se ha sobrestimado y que los modelos climáticos aún son demasiado inciertos para discernir con claridad la influencia antropogénica. Otro grupo de científicos reconocidos, como Ian Plimer y Dedrick Robinson, defiende que la dinámica climática global no es influenciada por las actividades humanas (al menos de manera importante), sino por factores naturales que responden a un tiempo geológico (Robinson y Robinson, 2012; Costa Sousa y Corte Bacci, 2014).

De manera global, el consenso científico climatológico afirma que las actividades humanas, en especial la quema de combustibles fósiles, son las responsables del cambio climático actualmente observado (IPCC, 2014; IPCC, 2021). Por otro lado, las evidencias se muestran de manera clara y global, a través de diferentes líneas de investigación que conciernen al aumento de la temperatura superficial continental y oceánica, al incremento en el grado de descongelamiento de los glaciares y en el nivel medio del mar, etc., aunado a la creciente concentración de GEI (IPCC, 2007; 2014; 2021). Además, Thomas Stocker, líder del Grupo de Trabajo I, Bases Físicas, menciona que, para contrarrestar los impactos proyectados del cambio climático, se necesita un compromiso multinacional y constante (IPCC, 2014; 2021).

Ahora bien, a pesar del consenso científico, los mensajes políticos y mediáticos que menoscaban la seriedad del cambio climático parecen incrementarse. A menudo se asume que tal proliferación se debe a la ignorancia o malinterpretación por parte de la población general, pero algunos estudios han sugerido que los valores y posturas políticas juegan un papel determinante del escepticismo en relación con el cambio climático

(Whitmarsh, 2011); otros encuentran que las personas blancas conservadoras en los EE. UU., que suelen blandir gran poder político y autoproclamarse conocedoras del tema, generalmente sostienen posturas negacionistas, por lo que influyen notablemente en el escepticismo generalizado de las personas blancas de ese país en contraste con el resto de la población (Dunlap y McCright, 2010; McCright y Dunlap, 2011). De hecho, la política de Donald Trump, expresidente de los EE. UU., fue la negación del cambio climático, con implicaciones en abandono de acuerdos climáticos globales y retirada de presupuesto para enfrentar la amenaza, causando un impacto debilitante en el desarrollo de proyectos de asociaciones civiles de desarrollo enfocados al cambio climático, entre ellas la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

México mantiene un posicionamiento político que reconoce la naturaleza antrópica del cambio climático. De hecho, el país es uno de los 197 que han ratificado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual entró en vigor en marzo de 1994; tal convención es la responsable a nivel internacional de establecer los objetivos, normas y acciones para hacer frente al cambio climático, en particular para reducir la emisión de GEI y definir medidas de adaptación y mitigación. Para su funcionamiento, la CMNUCC cuenta con varios organismos, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Principales organismos de la CMNUCC.

ORGANISMO	FUNCIONES
Conferencia de las Partes (COP)	Es la principal autoridad de la Convención, formada por todos los países miembros (o "Partes") que se reúnen cada año para tomar acuerdos. En las COP participan delegados gubernamentales para discutir el estado del cambio climático, las actividades de los países miembros, el análisis de las comunicaciones nacionales y los inventarios de emisiones, así como los resultados de investigaciones científicas.
Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico	Asesora a la Conferencia de las Partes sobre las cuestiones relativas al clima, el medio ambiente, la tecnología y los métodos. Se reúne bianualmente.
Órgano Subsidiario de Ejecución	Supervisa la aplicación de la Convención, analiza las comunicaciones nacionales presentadas por los países miembros y se encarga de los asuntos financieros y administrativos.

ORGANISMO	FUNCIONES
Grupos de expertos	Apoyan a los países en vías de desarrollo en preparar informes nacionales sobre cuestiones relacionadas con el cambio climático, establecer programas para adaptarse y brindar alternativas para estimular la transferencia de tecnología.
Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM)	Organismo asociado que se encarga de encauzar las donaciones y préstamos hacia los países de menos recursos para hacer frente al cambio climático.
Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)	Organismo científico-técnico intergubernamental formado por expertos, creado en 1988 de manera conjunta por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), encargado de generar conocimientos científicos, así como informes de evaluación y documentos técnicos.

Fuente: Salazar *et al.*, 2011.

La COP es el organismo rector que define las políticas nacionales en materia de cambio climático, es decir, genera lineamientos que los países miembros deben implementar. La primera COP se celebró en Berlín en 1995 y desde entonces se han sostenido 24 más, la decimosexta de ellas en el año 2010 en México. Es necesario referirse de manera detallada a la Tercera Conferencia de las Partes (COP3), organizada en 1997, porque se concluyó que serían necesarias medidas más enérgicas y jurídicamente vinculantes para reducir las emisiones de GEI, principalmente por parte de los países más desarrollados. Fue así como se estableció el Protocolo de Kioto, con vigencia de 2005 a 2012. No obstante, en la COP16 el debate se centró en el incumplimiento de los compromisos asumidos en el Protocolo de Kioto y el futuro de este instrumento.

El acuerdo final de la COP26, organizada en Glasgow en 2021, destaca dos puntos clave: el reconocimiento de que el carbón es la principal fuente del calentamiento global (y la consecuente necesidad de reducir su uso) y la iniciativa de duplicar el financiamiento a las naciones en vías de desarrollo para adaptarse al cambio climático hacia el año 2025 (UN, 2021; Salazar *et al.*, 2011).

La complejidad de la institucionalidad creada en torno a la CMNUCC y la diversidad de intereses entre los países que participan en las negociaciones dificultan el logro de consensos, acuerdos y compromisos acerca de las estrategias a emprender para frenar el cambio climático. De igual modo, la formación de diferentes agrupaciones y alianzas entre países; así como la discusión y establecimiento de acuerdos en espacios informales en las COP genera incertidumbre y obstaculiza la toma de decisiones en un contexto de intereses no manifestados en las sesiones formales.

Desde la COP de Copenhague en diciembre de 2009, se fueron perfilando cada vez con mayor claridad los asuntos y temas esenciales: la reducción de emisiones que los países industrializados están dispuestos a efectuar (mitigación), las acciones que los países en desarrollo podrían emprender (adaptación), las fuentes de financiamiento para costear la transferencia de tecnología y la manera de administrar dicho financiamiento (International Centre for Trade and Sustainable Development, 2008).

Para dar seguimiento a los acuerdos emanados de las conferencias relacionadas con el cambio climático, en especial las COP, el gobierno mexicano firmó la CMNUCC en 1992 y el senado la ratificó en 1993, brindándole con ello carácter vinculante. En México, el Sistema Nacional de Cambio Climático (SINCC) es el pilar institucional encargado de hacer frente a esta problemática; cuenta con la *Estrategia Nacional de Cambio Climático visión a 10-20-40 años*, la cual se apoya en diversos instrumentos: Inventario de Emisiones, Atlas de Riesgos, Instrumentos Económicos (fiscales, financieros y mercantiles), Sistemas de Información, Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Registro Nacional de Emisiones e Impuesto al Carbono, además de programas estatales, municipales y la Ley General de Cambio Climático, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de junio de 2012 con última reforma en junio de 2016 (Merari Cid León, 2013).

Los componentes del Sistema Nacional de Cambio Climático son: el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), las entidades federativas, las asociaciones de autoridades municipales, el Congreso de la Unión, el Consejo de Cambio Climático (formado por los sectores social, privado y académico) y, finalmente, la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), compuesta por trece Secretarías de estado (Merari Cid León, 2013):

- Gobernación
- Relaciones Exteriores
- Marina
- Hacienda y Crédito Público
- Desarrollo Social
- Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Energía
- Economía
- Comunicaciones y Transporte
- Educación Pública
- Salud
- Turismo
- Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

El Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 es un instrumento de política pública hacia el cambio climático en México surgido directamente de los compromisos asumidos por el gobierno mexicano en las COP. Establece objetivos, estrategias, acciones y metas para enfrentar el cambio climático mediante la definición de prioridades en materia de adaptación y mitigación; asimismo designa las responsabilidades, tiempos de ejecución y coordinación de acciones (SEMARNAT, 2021). En ese sentido, el País ha expresado su intención de atender los problemas derivados del cambio climático y les ha dado prioridad, al menos en el papel y en el discurso, al proceder a la instalación de un entramado institucional encargado de la formulación de una política nacional de cambio climático.

El País también ha cumplido con la obligación establecida en la CMNUCC, de elaborar y transmitir información sobre la aplicación de las acciones comprometidas, en documentos denominados *Comunicaciones Nacionales*; de hecho, en el año 2017 presentó su Sexta Comunicación Nacional. Asimismo, como una señal de su compromiso con el Acuerdo de París—derivado de la COP21, que entró en vigor en noviembre de 2016— en la COP22, en Marruecos, presentó su estrategia a largo plazo para reducir en un 50 % las emisiones de GEI para el 2050, tomando como base su medición del año 2000. Además, se unió al Compromiso Global de Metano en la COP26, de reducir las emisiones de metano antropogénico en 2030 en un 30 % por debajo de los niveles registrados en el año 2020, a la Declaración de bosques y uso de la tierra y ha preparado la Estrategia de Instrumentación para una Economía Oceánica Sostenible 2021-2024. En estos términos, México participa desde diversos frentes para combatir el cambio climático: disminuyendo emisiones, recuperando bosques y actuando en aras de la sostenibilidad de los océanos (SRE, 2021).

Otro punto importante es que la República Mexicana fue el primer país en desarrollo que entregó sus contribuciones determinadas a nivel nacional (CND), donde se compromete en términos de mitigación y adaptación. Para la mitigación, el País propone una reducción en 22 % de sus emisiones de GEI y 51 % de carbono negro para 2030. En términos de adaptación, las metas son disminuir la vulnerabilidad en 160 municipios, fortalecer las capacidades de las comunidades locales, incrementar las acciones de protección y restauración de ecosistemas, lograr la tasa cero en deforestación, además de generar e implementar sistemas de prevención y alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos (Mexicampo, 2017).

No obstante todo el esfuerzo por generar un entramado institucional que responda a los retos del cambio climático en México, a nivel local escasea el conocimiento en la materia y la población desconoce la existencia de políticas y programas orientados a atender el cambio climático, como puede observarse en el apartado referente a los resultados de las percepciones sociales. En consecuencia, apremia un acercamiento de las institucio-

nes para que retomen las demandas concretas de actores sociales y así se pueda incidir en los territorios locales, apoyando procesos de adaptación desde una perspectiva global de atención a los desafíos del cambio climático en el país.

RESULTADOS

Este apartado presenta los conceptos que tienen las personas sobre el cambio climático y los programas gubernamentales para atenderlo, así como sus percepciones sobre las manifestaciones del fenómeno y sus impactos en las actividades productivas. Aunado a ello, se brindan los datos climáticos referentes al SPI a 12 meses en el periodo 1960-2008 para la localidad de Emiliano Zapata (latitud norte 17°44'31", longitud oeste 91°45'47") con énfasis en los periodos relativamente largos de sequía o precipitaciones fuertes, porque las señales de largo plazo son las que quedan regularmente en la memoria de los usuarios.

PERCEPCIONES Y CONOCIMIENTOS SOBRE LAS MANIFESTACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Se considera que el acceso a la información es clave para determinar el nivel de riesgo, por lo tanto, cualquier diseño de políticas y programas de adaptación debe tenerlo presente (Sosa Ferreira *et al.*, 2012). Para tal fin, se preguntó a los entrevistados si conocían el término de cambio climático. Las respuestas pueden agruparse por sector: 1) los jornaleros del sector primario de producción (ganaderos y pescadores) desconocían el fenómeno, lo cual resulta desconcertante puesto que en los últimos años los medios de difusión, como la televisión y la radio, han divulgado mucha información sobre el tema. Mientras tanto, los estudiantes, funcionarios públicos e integrantes de las asociaciones civiles de desarrollo sí identificaban el término y lo asociaron principalmente a la irregularidad de las lluvias y la reducción en la capa de ozono. Por último, el conocimiento del concepto por parte de los demás actores sociales entrevistados del municipio refuerza los resultados de varias investigaciones, entre ellas, las de Sosa Ferreira *et al.* (2012), Meira Carrea y Arto Blanco (2014), quienes encontraron que la población está al tanto del concepto y se preocupa por sus consecuencias.

Ante el desconocimiento del concepto, se les cuestionó a los ganaderos y pescadores si observaban alteraciones en la distribución de las lluvias o en las temperaturas, a lo que la totalidad de los entrevistados respondió positivamente. Los resultados respecto a la irregularidad en los regímenes de precipitación instan a cuestionar la vigencia del co-

nocimiento tradicional, puesto que la incertidumbre en los periodos de lluvia ha mercado la predictibilidad climática campesina (Soares y García, 2014). A continuación, se enlistan algunos testimonios al respecto de las variaciones en las lluvias:

- Entrevistado 1: *La precipitación en la zona se volvió errática, las lluvias ya no caen en un periodo previsible.*
- Entrevistado 5: *La lluvia se adelanta o retrasa... Ya no se sabe...*
- Entrevistado 9: *Antes se tenía bien programado el ciclo de siembras, ahora es incierto por la incertidumbre de las lluvias.*
- Entrevistado 17: *Antes tenían uno o dos meses de sequía y el forraje aguantaba, ahora ya no, pues son cuatro meses o más de sequía.*

La percepción generalizada de los entrevistados respecto al clima extremo a causa del incremento del calor concuerda con los resultados de investigaciones realizadas por científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quienes encontraron que los únicos estados de la República Mexicana donde las temperaturas han permanecido estables son Nayarit, Colima, Michoacán y Jalisco; mientras tanto, Tabasco y el resto de los estados presentan una tendencia hacia el aumento de las temperaturas (Greenpeace, 2010). Asimismo, se observa en la actualidad una tendencia a la reducción de lluvias respecto a décadas anteriores. De hecho, los entrevistados manifestaron que las inundaciones son distintas a cómo solían ser y que su mayor preocupación es la creciente severidad de las sequías en sus localidades. En palabras del entrevistado 11: *El río Usumacinta ya no se comporta igual que antes. Antes se llenaban las lagunas y los pescadores pescaban, ahora ya no se logra llenar las lagunas, pues ya no llueve.*

Las percepciones de los entrevistados acerca de la prolongación de los periodos de sequía coinciden con las de los campesinos en la microcuenca de Mollebamba, Perú (Flores Moreno y Valdivia Corrales, 2012). Los hallazgos del estudio de caso mencionado coinciden con el planteamiento del PNUD (2008), según el cual gran parte de la amenaza radica en la alteración de los ciclos hidrológicos y regímenes de lluvias, la intensidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos y las sequías cada vez más graves a medida que sube la temperatura en el mundo. Se concluye que dicha situación impactará a las poblaciones humanas a través del incremento en el riesgo y la vulnerabilidad a consecuencia de las amenazas sobre su salud, seguridad y medios de sustento.

Los pescadores entrevistados suscriben a este testimonio y denuncian sus cuantiosas pérdidas en la pesca. Es decir, la producción pesquera se da principalmente en las lagunas que se forman con el agua desbordada del río Usumacinta en las inundaciones, pero año con año se reduce el volumen de agua, de tal suerte que es insuficiente para llenar las lagunas. Aunados a este factor, existen otros dos que causan escasez en la pro-

ducción pesquera en esta zona del río Usumacinta: por un lado, la introducción del pleco (*Hypostomus plecostomus*, coloquialmente conocido como “Pez diablo”, de nulo valor comercial y cuya población se ha salido de control debido a la falta de depredadores), pues destruye las redes de pesca; por el otro, la sobreexplotación pesquera y la carencia de regulaciones (vedas), de tal suerte que se pescan especímenes que no han tenido tiempo de reproducirse.

En general, los entrevistados señalan la deforestación y el uso indiscriminado de agroquímicos como causas de los cambios. Según Gonzales Inca y Llanos López (2015) la deforestación reduce la conductividad hidráulica del suelo y en consecuencia la tasa de infiltración y la recarga de acuíferos, a la vez que eleva el escurrimiento superficial. Cabe señalar que, como resultado a largo plazo, la deforestación disminuye el caudal de los ríos incrementando la vulnerabilidad, particularmente durante el estiaje. En este marco, es importante aclarar el origen de las vulnerabilidades en el medio rural, dado que se asocian principalmente a las fuerzas de la naturaleza y, aunque en menor medida, a los procesos sociales, económicos y políticos a nivel local y regional; la deforestación es un ejemplo concreto de ello (Soares y García, 2014).

Ahora bien, Bermejo (2010) señala los peligros de los fertilizantes nitrogenados que se usan indiscriminadamente a escalas industriales en la agricultura; enfatiza la perturbación en el ciclo de nitrógeno a tal punto que la capacidad desnitrificante de los ecosistemas alcanza los límites del colapso. De este modo, la acidificación del medio ambiente, la eutrofización de las aguas debido al exceso de nitrógeno y el cambio climático son amenazas inminentes para la habitabilidad de la Tierra. Asimismo, concluye que el ciclo mencionado sostiene una estrecha relación con el del carbono, por lo que la desestabilización de cualquiera de ellos tiene consecuencias imprevisibles y potencialmente catastróficas para el clima.

ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE TEMPERATURA EN LA LOCALIDAD

La percepción vinculada al potencial aumento de temperatura en la zona de estudio coincide con el análisis histórico de los datos climatológicos presentados a continuación. El su es uno de los índices de cambio climático más sensibles al incremento de la temperatura. Como se observa en la Figura 2, dicho índice en Emiliano Zapata alcanzó gradualmente su límite de 365 días en las últimas dos décadas; esto concuerda con la percepción social del incremento térmico paulatino en la región. Por otro lado, en la Figura 3, donde se presentan los resultados del DTR para la zona de estudio, no se muestra ninguna tendencia clara al aumento o decremento del rango, a excepción del incremento súbito que tuvo de 2003 a 2005. Es por lo anterior que la expansión de este rango po-

dría ser una medida del incremento en los extremos de temperatura, puesto que consiste en la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias.

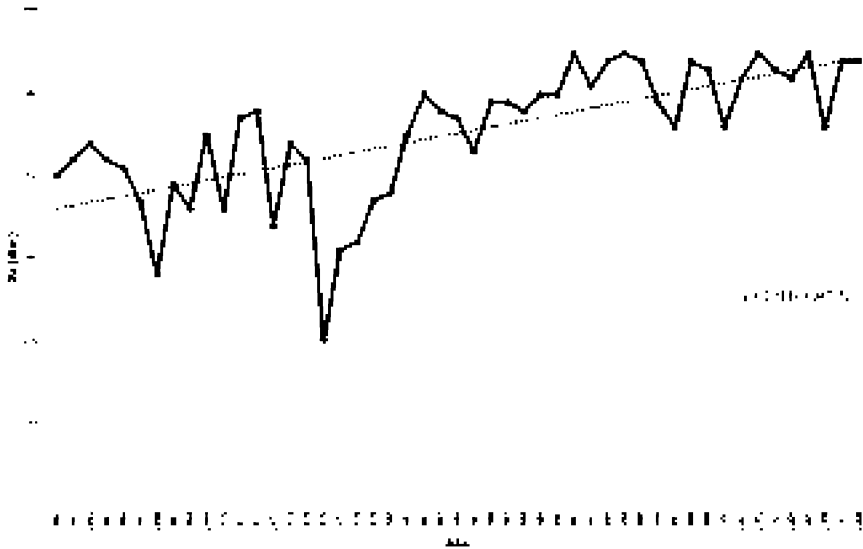


Figura 2. Días de verano, su, en Emiliano Zapata, Tabasco, para el periodo 1960-2008. Línea de tendencia (punteada) y su ecuación.

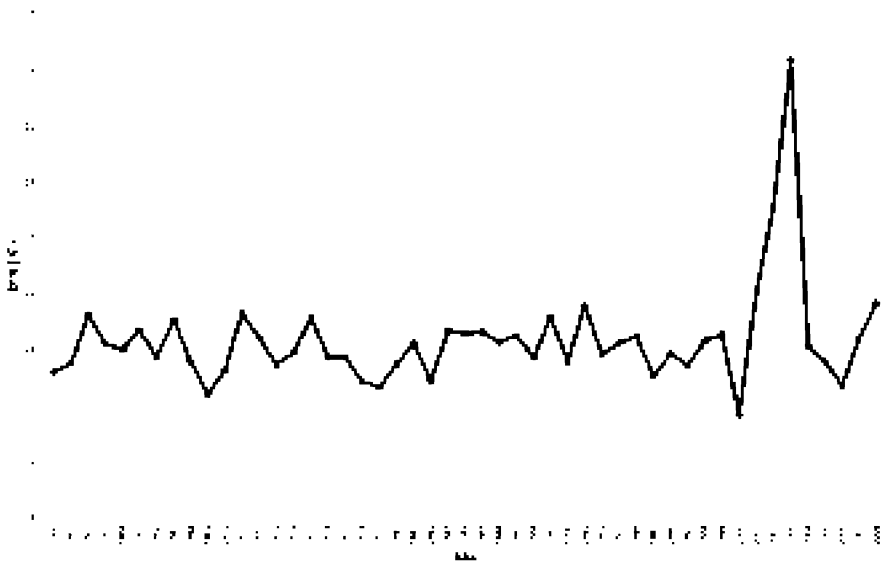


Figura 3. Rango de temperatura diurna anual, DTR (en °C), en Emiliano Zapata, Tabasco, para el periodo 1960-2008. No se encontró tendencia.

ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DE PRECIPITACIÓN EN LA LOCALIDAD

Se recopilaron los datos de la precipitación anual total (PRCPTOT en mm) para determinar si se podría discernir un incremento o disminución en la región (Figura 4). Se distingue una tendencia decreciente de la precipitación en el periodo completo, con énfasis de 1966 a 1993, quizás con una ligera recuperación en general durante la última década.

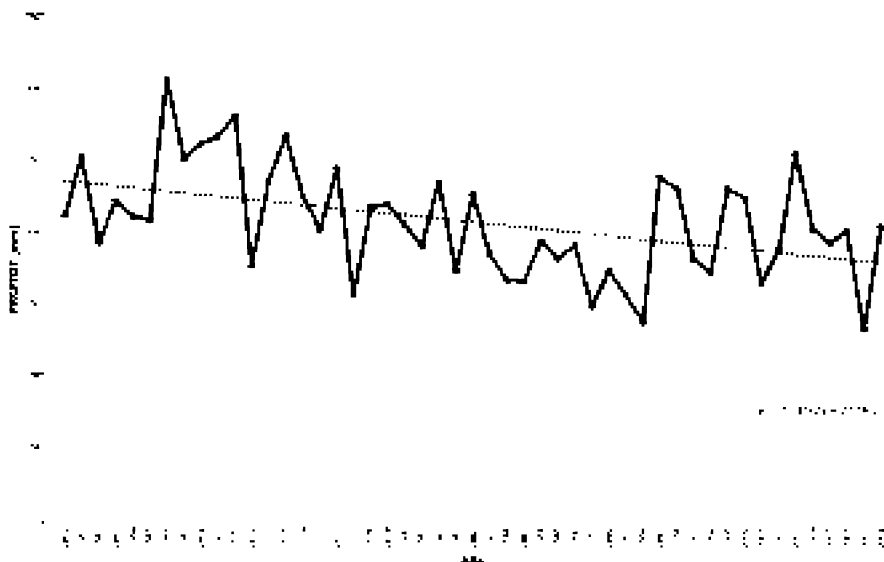


Figura 4. Precipitación media anual total, PRCPTOT (en mm), en Emiliano Zapata, Tabasco, para el periodo 1960-2008. Línea de tendencia (punteada) y su ecuación.

De igual manera, se calculó el SPI a 12 meses, el cual indica una aproximación de cuándo y con qué intensidad ocurrieron los periodos secos y húmedos de larga duración (al menos 1 año) para el periodo completo de 1960 a 2008. En la Figura 5 se puede ver que los periodos húmedos ($SPI \geq 1.0$) dominan las décadas de 1960 y 1970, especialmente entre 1965 y 1975; y los secos ($SPI \leq -1.0$), a partir de mediados de los ochenta. También se nota un incremento significativo en la diferencia entre los valores máximos y mínimos de SPI hacia el final del periodo de análisis (de 1995 a 2007). De esta forma, los datos analizados parecen concordar en que prevaleció la escasez de precipitación en la región, por lo menos desde mediados de los setenta hasta 2008. Todo lo anterior parece apoyar la noción de que la precipitación se ha tornado más errática.

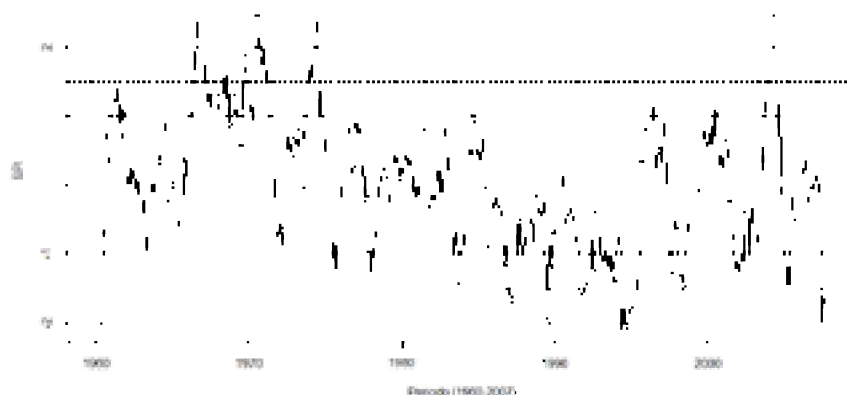


Figura 5. Índice normalizado de precipitación a 12 meses en Emiliano Zapata, Tabasco, para el periodo 1960-2007.

CONOCIMIENTO SOBRE PROGRAMAS DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL LOCAL

Funcionarios de la SAGARPA de Emiliano Zapata afirmaron que la institución ofrece programas orientados a frenar los impactos del cambio climático; sin embargo, hay reticencia por parte de los productores: aunque dicha institución busca desalentar la quema de pastos a fin de reducir las emisiones de GEI, los ganaderos hacen caso omiso, puesto que esta y otras prácticas ancestrales les han traído buenos resultados a la hora de lidiar con distintos problemas, tales como el caso específico de las plagas de garrapatas que aquejan al ganado. En palabras del funcionario de la SAGARPA, Entrevistado 4: *SAGARPA realiza un programa de concientización acerca de la labranza cero, para evitar las quemas, pero los campesinos no le entran y dicen que: 'labranza cero, cero cosecha'. Es muy difícil convencerlos a cambiar...*

Asimismo, los entrevistados gubernamentales afirman que el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) contempla un programa de energías renovables orientado a la mitigación del cambio climático; este mismo goza de poca aceptación a nivel regional debido a la falta de cultura ambiental, conocimiento del tema y capacidad de invertir por parte de los productores. Por ejemplo, debido a las pérdidas de ganado con las severas sequías de 1999 y 2009, a lo largo de 2017 se propuso la implementación de 50 pozos con fotoceldas para uso ganadero, con fines de abrevaderos, como una estrategia para la conservación de forrajes, dado que el agua de los jagüeyes, al reducir de manera significativa en los estiajes, queda demasiado expuesta a los rayos de sol y provoca parasitosis en el ganado que la consume. El programa exigía que los productores aportaran

la mitad de los recursos, que serían aproximadamente 20 mil pesos mexicanos por cada pozo. A estos programas solamente pueden acceder los productores más capitalizados, lo que promueve la formación de un ciclo vicioso, donde aquellos con menos recursos económicos sufren más pérdidas y los productores más acaudalados incrementan sus ganancias. De manera similar, el programa gubernamental de mayor repercusión en la zona es el relacionado con un seguro por la pérdida del ganado debido a la sequía. Al respecto, el Entrevistado 3, un funcionario municipal adscrito a la Dirección de Desarrollo Agropecuario del municipio, comenta:

Los programas de gobierno no están bien enfocados. Enfrentamos sequía con compra de seguro catastrófico y les damos recursos económicos a productores (300 pesos por cada vaca). El correcto sería apoyar en la prevención: almacenamiento del forraje, pasto mejorado, etc. Hay alternativas, pero el productor tiene que poner de su parte y no está interesado. También les falta mucho conocimiento e información a los campesinos y ganaderos.

Se hace evidente la necesidad de emprender una campaña informativa sobre el cambio climático a nivel local y las estrategias que pueden implementar los diversos sectores, orientadas tanto a la mitigación como la adaptación, en aras de promover la aceptación de los pocos programas de atención al cambio climático que logran aterrizar a nivel local. Aunado a ello, las instituciones deberían hacer un esfuerzo para coordinarse e implementar programas de largo aliento a nivel local, orientados a brindar mayor capacidad a los diferentes sectores productivos y a la población en general, para adaptarse de manera exitosa al cambio climático.

CONCLUSIONES

Esta contribución ha demostrado, por un lado, la poca relación entre el aparato institucional de cambio climático instalado en el país y la aplicación de políticas y programas en la materia a nivel local; por el otro, la relevancia de considerar las percepciones locales en investigaciones sobre vulnerabilidad al cambio climático para el diseño de políticas públicas que sean adecuadas a los contextos y expectativas locales.

Si bien, la CICC se compone de trece secretarías de estado, a nivel local solo la SAGARPA aterriza programas en la materia; no obstante, su efectividad es baja, al no contar con una estrategia de comunicación y sensibilización que impulse una mayor aceptación e interés por sus iniciativas. Es evidente que la Comisión afronta una serie de retos: el principal consiste en trascender de la planeación a la implementación de acciones concretas a favor del ambiente y de la población. Es decir, que exista una verdadera coordinación intersectorial, mecanismos efectivos de ejecución de las políticas de cambio

climático y responsabilidades específicas para las instituciones en los tres órdenes gubernamentales. Para ello es fundamental establecer un proceso de fortalecimiento de capacidades municipales, a fin de que las localidades puedan desempeñar con eficacia el rol que les corresponde.

Los pescadores y ganaderos en el municipio de estudio desconocen el concepto de cambio climático; sin embargo, están preocupados, dado que ya perciben y sufren las consecuencias del fenómeno a nivel local, con alteraciones en el régimen de lluvias y el incremento de temperatura y sequías. En la medida en que se logre establecer un vínculo entre instituciones, políticas públicas de cambio climático y necesidades locales, derivadas de las experiencias cotidianas de los distintos actores y sectores sociales, se podrá avanzar en la construcción de programas que satisfagan las necesidades específicas de la población y, de esa manera, incrementar las posibilidades de adaptación.

También se demuestra la importancia de llevar a cabo el análisis objetivo de la información climatológica con el fin de corroborar las percepciones de la sociedad. En el caso aquí mostrado, las percepciones sociales corresponden a lo observado en los datos en cuanto al comportamiento climatológico de las variables de temperatura y precipitación. Es decir, la región ha exhibido un clima más cálido, pero no necesariamente un incremento en los extremos de temperatura; ahora bien, se ha observado un ambiente cada vez más seco y precipitaciones más erráticas, lo que concuerda con la percepción general de las personas entrevistadas. Es imprescindible construir un puente entre el conocimiento científico y empírico y, a partir de ahí, diseñar los programas de cambio climático. Lo esencial es instruir a la población sobre el clima con la finalidad de que tengan fundamentos para tomar decisiones y cuenten con mejores oportunidades para la adaptación, además de definir programas que atiendan las particularidades territoriales y culturales. Solo así se podrá fortalecer la respuesta del País frente a los desafíos del cambio climático.

REFERENCIAS

- Araújo, J., Cavalcanti, I. y Henrique Eiró, F. (2011). Percepção ambiental e mudanças climáticas. IX Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica – Políticas públicas e a perspectiva da Economia Ecológica. Outubro de 2011. Brasília - DF – Brasil.
- Bolio, A. P. (2012). Husserl y la fenomenología trascendental: Perspectivas del sujeto en las ciencias del siglo XX. *Reencuentro*. 65: 20-29.
- Bursztyf, M. y Eiró, F. (2015). Mudanças climáticas e distribuição social da percepção de risco no Brasil. *Sociedade e Estado*. 30 (2): 471- 493.

- Cardona, O. (2012). “Un marco conceptual común para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático: encuentros y desencuentros de una iniciativa insoslayable”, en Fernando Briones (coord.), *Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica*. Mérida, Venezuela: La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina/Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos. pp. 13-37.
- CLICOM-MALLA. (2013). Cicese.mx. <http://clicom-mex.cicese.mx/malla/>
- Conapo (2020). Índices de marginación 2020. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- Costa Sousa, K. y Corte Bacci, D. (2014). “Percepção de alunos de engenharia ambiental sobre o tema das mudanças climáticas e sua área de atuação profissional”. *Terra e didática* 10 (3):394-406.
- Dunlap, R.E., y McCright, A.M. (2010). Climate change denial: sources, actors, and strategies. In: Lever-Tracy, C. (Ed.), *The Routledge International Handbook of Climate Change and Society*. Routledge Press, New York, pp. 240-259.
- Expert Team on Climate Change Detection and Indices (2020). <http://etccdi.pacificclimate.org/>
- Flores Moreno, A. y Valdivia Corrales, G. (2011). Las percepciones de la población rural campesina de la Microcuenca Mollebamba sobre la incidencia del cambio climático en su forma de vida. Serie Investigación, Nro. 5. Microcuenca Mollebamba. Cusco, Perú: Centro Bartolomé de las Casas, PACCPéru, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- Greenpeace (2010), México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación, México: Greenpeace.
- Gonzales Inca, C. A. y Romina Llanos López, R. (2015). Reporte Técnico Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Alto Mayo. Lima: Conservación Internacional Perú.
- INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda, 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Informe Laboral de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social en Tabasco (2017). Disponible en: <http://www.stps.gob.mx/gobmx/estadisticas/pdf/perfiles/perfil%20tabasco.pdf>. Consulta: 10 marzo 2017.
- IPCC (2007). Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., y Riahi, K. (2008). *Climate change 2007: synthesis report*. IPCC.
- IPCC (2014). Pachauri, R. K., Meyer, L., Plattner, G. K., y Stocker, T. (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

- IPCC. Climate Change 2014 (2014) Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Edenhofer, O., R. Pichs Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J. C. Minx (Eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. Climate Change (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- International Centre for Trade and Sustainable Development (2008). Climate Change, Technology Transfer and Intellectual Property Rights. Trade and Climate Change Seminar. Copenhagen, Denmark. Disponible en: http://www.iisd.org/pdf/2008/cph_trade_climate_tech_transfer_ipr.pdf. Consulta: 24 enero 2017.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Posición de México en la 22ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <http://www.gob.mx/inecc/articulos/posicion-de-mexico-en-la-22-conferencia-de-las-partes-de-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-79523?idiom=es>. Consulta: 17 enero 2017.
- Lim, B. y Spanger Siegfried E. (ed.) (2006). Marcos de Políticas de Adaptación. Desarrollando Estrategias, Políticas y Medidas. PNUD, GEF. Cambridge Univ. Press.
- McCright, A. M. y Dunlap, R. E. (2011). Cool dudes: The denial of climate change among conservative white males in the United States. *Global environmental change*, 21(4), 1163-1172.
- Meira Cartea, P. A y Arto Blanco, M. (2014). Representaciones del cambio climático en estudiantes universitarios en España: aportes para la educación y la comunicación. *Educar em Revista*. Edição Especial n. 3: 15-33.
- Mexicampo (2017). Presenta México en COP 22 estrategia de cambio climático, <http://mexicampo.com.mx/presenta-mexico-cop-22-estrategia-cambio-climatico/> Consulta 03 de enero 2017.
- Merari Cid León, D. (2013). La Estrategia Nacional de Cambio Climático - Visión 10-20-40. Dof-06/06/2013. Instituto de Ingeniería, UNAM. <http://proyectos2.iingen.unam.mx/LACclimateChange/docs/boletin/EstrategiaNalCC.pdf>. Consulta: 07 enero 2017.
- Miranda Beltrán, S. y Bernal, J. A. (2020). Los paradigmas de la investigación: un acercamiento teórico para reflexionar desde el campo de la investigación educativa.

- RIDE. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. Vol 11 (21). <https://www.ride.org.mx/index.php/RIDE/article/view/717/2573>
- Muñoz Arriola, F., Avissar, R., Zhu, D. y Lettenmaier, P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Wat. Res. Res.* Vol. 45 (11).
- Murillo, D. (2013). Adaptación al cambio climático: instrumentos y lineamientos de política pública en México. Informe de trabajo. México: IMTA, ProImpacto.
- Naranjo Hernández, Y. y González Bernal, R. (2021). Investigación cualitativa, un instrumento para el desarrollo de la ciencia de Enfermería. *Archivo Médico Camagüey*. 25 (3). <http://revistaamc.sld.cu/index.php/amc/article/view/7324>
- O'Brien, K., Eriksen, S., Schjolden, A., Nygaard, L.P. (2004). What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research. Cicero working paper. Oslo, Norway.
- O'Brien, K.L., Eriksen, S., Nygaard, L.P., Schjolden, A. (2013) Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy*. 7 (1): 73-88.
- O'Brien, K. L. y Wolf, J. A (2010). Values-based approach to vulnerability and adaptation to climate change. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. Disponible en <<http://doi.wiley.com/10.1002/wcc.30>>. Consulta: 20/01/2017.
- OMM (2012). Índice normalizado de precipitación. Guía de Usuario. OMM-No 1090. ISBN 978-92-63-31090-3. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteo_term_wmo_es.html
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD (2008). Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido. México: PNUD.
- Robinson, G. D. y Robinson III, G. D. (2012). Global Warming-Alarmists, Skeptics and Deniers: A Geoscientist Looks at the Science of Climate Change. ISBN-13: 978-1937327033. Moonshine Cove Publishing, Moonshine Cove Publishing, LLC (January 20, 2012), 208 págs.
- Ruiz Meza, L. E. (2014). “Género y percepciones sociales del riesgo y la variabilidad climática en la región del Soconusco, Chiapas”. *Alteridades*, 2014, 24 (47): 77-88.
- Salazar, R., Munguía Gil, M. T., Fuertes Jara, A., Fontcilla Carbonell, A. I., Soares, D. y Méndez Cárdenas, G. (2010). Aportes de las experiencias comunitarias a las estrategias de adaptación al cambio climático en México desde una perspectiva de género. México: RGEMA, GWA.
- Sánchez Cortés, M. y Chavero, E. (2011) “Indigenous perception of changes in climate variability and its relationship with agriculture in a Zoque community of Chiapas, Mexico,” *Climatic Change* 107 (3): 363-389.

- Shepard, D. S., (1984). Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm. *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile and C. J. Willmott, Eds., D. Reidel, 133–145.
- Soares, D. y García, A. (2014). Percepciones campesinas indígenas acerca del cambio climático en la cuenca de Jovel, Chiapas – México. *Cuadernos de Antropología Social*. 39: 63 – 88.
- Sosa Ferreira, A. P., González Neri, I. y Valtierra Hernández, A. (2012). *Percepción de las comunidades costeras de la Península de Yucatán ante el cambio climático, su vulnerabilidad y adaptación*. Mérida: SEP, PROMEP, Universidad del Caribe, CATS.
- Viscusi, W. K. y Zeckhauser, Richard J. (2006). The Perception and Valuation of the risks of climate change: a rational and behavioral blend. *Climatic Change* .77: 151–177.
- Zhu, C., Lettenmaier, D. P. (2007). Long-Term Climate and Derived Surface Hydrology and Energy Flux Data for Mexico: 1925–2004. *J. Climate*, 20, 1936–1946.
- Red Global de Organizaciones de la Sociedad Civil para la Reducción de Desastres (GNDR). (2020). Lo que la Covid-19 nos dice sobre el riesgo y cómo lo reducimos. <https://gndr.org/es/noticias/item/2022-lo-que-la-covid-19-nos-dice-sobre-el-riesgo-y-c%C3%B3mo-lo-reducimos.html>
- Salazar, L. A. y Ordóñez Guzmán, G.A. (2021). Desarrollo social y fortalecimiento de las capacidades efectivas de la comunidad. La percepción local del riesgo en el Barrio Jocay de Manta frente a inundaciones. *REHUSO. Revista de Ciencias Humanísticas y Sociales*. 6 (3): 97-106. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Rehuso/article/view/3845/3665>
- Semarnat (2021). Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-especial-de-cambio-climatico-2021-2024>
- SRE (2021). México se adhirió al Compromiso Global de Metano en la COP26. Comunicado No. 500. <https://www.gob.mx/sre/prensa/mexico-se-adhirio-al-compromiso-global-de-metano-en-la-cop26?state=published>
- UN (2021). COP26: Juntos por el planeta. <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>

Manuel Eduardo Mendoza Cantú¹

Orlando Lemus Rodríguez²

Teodoro Carlón Allende³

John Clague⁴

Rick Giardino⁵

Erna Martha López Granados⁶

Pierre Friele⁷

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia

²Posgrado en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

³Conacyt-Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia

⁴Center for Natural Hazard Research, Department of Earth Sciences, Simon Fraser University

⁵Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, México

⁶Geology & Geophysics, Texas A&M University

⁷Cordilleran Geoscience, PO Box 612, Squamish, BC, Canada

13

CAPÍTULO

RECONSTRUCCIÓN DE EVENTOS DE DESPRENDIMIENTO DE ROCAS MEDIANTE TÉCNICAS DENDROGEOMORFOLÓGICAS EN UNA ZONA DE ESCALADA EN CANADÁ

¹mmendoza@ciga.inam.mx ²ing_eldar@outlook.com ³carlon@igeofisica.unam.mx

⁴john_clague@sfu.ca ⁵ernalopez2004@yahoo.com.mx ⁶rickg@tamu.edu ⁷pfriele@gmail.com

RESUMEN

La caída de rocas en zonas montañosas es un fenómeno geomorfológico impredecible y representa una amenaza a elementos naturales y antrópicos del paisaje. Este trabajo se desarrolló en el parque provincial de Stawamus Chief en la Columbia Británica, Canadá. El objetivo de la investigación fue evaluar la frecuencia de la caída de rocas mediante la aplicación de técnicas dendrocronológicas. Se realizó una interpretación geomorfológica utilizando como insumo principal una imagen LIDAR de 1 m de resolución. Adicionalmente, se analizaron datos climáticos de cuatro estaciones meteorológicas y datos sísmicos de 1700 a 2004, estas variables se consideran detonantes de eventos de caída de rocas. El muestreo de campo fue realizado en tres sectores del escarpe noroeste del macizo rocoso de Stawamus Chief y dirigido a los árboles con evidencia de golpes en el tallo debido a la caída de rocas. Se muestrearon 75 árboles (151 series dendrocronológicas) de las especies *Tsuga heterophylla*, *Pseudotsuga menziesii* y *Thuja plicata*; en cada árbol se colectaron dos o tres núcleos, extraídos con un taladro tipo Pressler a la altura de sus cicatrices.

La interpretación geomorfológica permitió identificar 16 formas de relieve; las unidades con mayor superficie son taludes, laderas y escarpes. Se generó una cronología de acontecimientos y con estos datos se realizó una reconstrucción de eventos de caída de rocas mediante el índice de Shroder. La cronología de eventos geomorfológicos generada comprende 167 años (de 1850 a 2017), donde se identificaron 911 anomalías de crecimiento y se reconstruyeron 51 eventos de caída de rocas; en el periodo de 1940 a 1959, se presentó el mayor número de estos (11). Se identificaron doce que pudieron ser detonados por precipitaciones de aproximadamente 50 mm por día, y diez casos asociados a sismos de magnitud 6.4 en la escala de Richter. La presente investigación es la primera evidencia de reconstrucción de eventos en el parque provincial de Stawamus Chief y es útil para la toma de decisiones en la gestión del peligro en el parque.

Palabras clave: anillos de árboles, Canadá, deslizamientos, evaluación de peligros, factores detonantes, Stawamus Chief.

ABSTRACT

Rockfall in mountainous areas is an unpredictable geomorphological phenomenon and represents a threat to natural and anthropogenic elements of the landscape. This work was carried out in Stawamus Chief Provincial Park in British Columbia, Canada. The objective of the research was to evaluate the frequency of rockfall by applying dendrochronological techniques. A geomorphological interpretation was performed using a 1 m resolution LIDAR image as the main input. Additionally, climatic data from four meteorological stations and seismic data from 1700 to 2004 were analyzed; these variables are considered triggers for rockfall events. Field sampling was conducted in three sectors of the northwestern escarpment of the Stawamus Chief rock massif and targeted trees with evidence of stem strikes from rockfall. Seventy-five trees (151 dendrochronological series) of *Tsuga heterophylla*, *Pseudotsuga menziesii* and *Thuja plicata* species were sampled; two or three cores were collected from each tree, extracted with a Pressler-type drill at the height of their scars.

The geomorphological interpretation allowed the identification of 16 relief forms; the units with the largest surface area are slopes, hillsides and escarpments. A chronology of events was generated and with these data a reconstruction of rockfall events was performed using Shroder's index. The chronology of geomorphological events generated comprises 167 years (from 1850 to 2017), where 911 growth anomalies were identified and 51 rockfall events were reconstructed; in the period from 1940 to 1959, the largest number of these occurred (11). Twelve were identified that could have been triggered by rainfall of approximately 50 mm per day, and ten cases associated with earthquakes of magnitude 6.4 on the Richter scale. The present investigation is the first evidence of event reconstruction in Stawamus Chief Provincial Park, and is useful for hazard management decisions in the park.

Keywords: tree rings, Canada, landslides, hazard assessment, triggers, Stawamus Chief.

INTRODUCCIÓN

Las zonas montañosas tienen importancia cultural, científica y, especialmente, geomorfológica debido a la inestabilidad que presentan sus laderas; esta se relaciona con la variabilidad en las pendientes, cubierta vegetal, actividad sísmica y el impacto de los periodos glaciales y posglaciales (Lim, Martin y Herd, 2004; Owens y Slaymaker, 2004). Uno de los procesos geomorfológicos más alarmantes en las zonas montañosas es la caída de rocas, la cual tiene efectos destructivos en los elementos bióticos y abióticos

(Luckman y Friske, 1995; Stoffel *et al.*, 2005; Franco, Stoffel y Vázquez Selem, 2017). En la década de 1960, las investigaciones relacionadas con eventos geomorfológicos se centraban en la observación y cuantificación de material en los coluviones, describiendo únicamente magnitudes de eventos específicos y limitándose a periodos de corta duración sin explicar la distribución espacial (Rapp, 1960). Por ello, surgió la necesidad de utilizar alternativas que puedan evaluar espacio-temporalmente los eventos de caída de rocas, con el objetivo de contribuir al desarrollo de planes de prevención y mitigación, debido a que estos eventos geomorfológicos afectan corredores de transporte, sitios habitacionales e infraestructura (Hung, Evans y Hazzard, 1999; Perret, Stoffel y Kienholz, 2006; Trappman, Corona y Stoffel, 2013). Los eventos de caída de rocas que se han presentado en Canadá van desde pocos metros cúbicos hasta 10 km³; la precipitación y los sismos constituyen los principales detonantes de este fenómeno (NRC, 2017). A pesar de las acciones de mitigación y prevención impuestas por el gobierno, se sabe que en Canadá los deslizamientos figuran un costo anual aproximado de 200 a 400 millones de dólares canadienses relacionado con gastos directos e indirectos (NRC, 2008).

Aunque las zonas de desprendimiento donde acaece la caída de rocas son conocidas, a menudo escasean registros que permitan testificar la frecuencia, magnitud, velocidad y trayectorias, entre otras características de los procesos geomorfológicos (Stoffel *et al.*, 2005a, b). En los sitios donde se tienen evaluaciones de los parámetros antes mencionados, se han evitado accidentes o al menos se han mitigado los daños por medio de medidas ecoingenieriles (Dorren *et al.*, 2007).

En las últimas décadas se han utilizado diferentes métodos para evaluar la caída de rocas; sin embargo, las escalas temporales en la mayoría de ellos son imprecisas, lo que conlleva a una estimación errónea desde el punto de vista temporal y de la magnitud de los eventos geomorfológicos (Pierson, Davis y Van Vickle 1990; Franklin 1997; Budetta 2004; Maerz, Youssef y Fennessey, 2005). En consecuencia, se ha incrementado el uso de técnicas *proxy* como la dendrocronología, en la cual, por medio del análisis de los anillos de crecimiento de los árboles, es posible identificar eventos naturales y antrópicos ocurridos en el pasado con una resolución temporal anual y, en ocasiones, estacional (Solomina 2002; Stoffel y Bollschweiler 2009; Stoffel *et al.*, 2010). Los anillos de crecimiento de los árboles son de utilidad para evaluar la caída de rocas y caracterizar espacio-temporalmente los eventos; como resultado, se obtiene la comprensión de procesos geomorfológicos a largo plazo (Stoffel *et al.*, 2005).

Tanto en frecuencia como en intensidad, estos procesos han incrementado las zonas que presentan peligros naturales. Lo anterior se atribuye al cambio climático global, así como a la intensificación de las lluvias torrenciales y de otros procesos geomorfológicos (López Saez *et al.*, 2016). Por tal motivo es necesario generar datos e información que permitan comprender las tendencias históricas de ocurrencia y magnitud de eventos de

peligro y compararlas con los posibles escenarios de cambio climático para los próximos años. Adicionalmente, el crecimiento demográfico y la urbanización, tanto en zonas montañosas como costeras, han agravado el riesgo asociado a diferentes tipos de peligros; por esta razón, se requieren mejores planes de prevención enfocados a la reducción del riesgo, al desarrollo sustentable y a la protección del medio ambiente a través de políticas socioambientales (Sassa *et al.*, 2005). Es necesario el estudio de los peligros naturales asociados a procesos geológico-geomorfológicos para apoyar la generación de datos útiles y aplicables en las propuestas de manejo del paisaje, políticas ambientales, prácticas sustentables dentro de los diseños ingenieriles, cambios en la percepción del peligro y acciones por parte de la población (Hooke, 2019).

Históricamente, Canadá ha presentado un alto índice de deslizamientos en todo su territorio; la Columbia Británica es la provincia con mayor probabilidad de procesos de remoción en masa debido a la alta actividad sísmica, a las formas de relieve existente y a las condiciones climáticas (Clague y Bodrowsky, 2010). La caída de rocas en dicha área se detona principalmente por las precipitaciones, las cuales pueden ascender hasta los 3000 mm anuales, generando presiones en las fracturas de las rocas (Blais Stevens y Hungr, 2008). Adicionalmente, la provincia es altamente sísmica debido a la falla de subducción de Cascadia, cuya actividad puede generar deslizamientos a partir de magnitudes de 6 en la escala de Richter (Keefer, 1984).

En la Columbia Británica se han desarrollado investigaciones sobre procesos geomorfológicos referentes a deslizamientos históricos ocurridos en la carretera 99 (Sea to Sky Highway), considerada la principal vía de comunicación que atraviesa ese territorio de norte a sur (Blais-Stevens y Hungr, 2008). Los trabajos realizados en la zona han analizado las trayectorias y velocidades alcanzadas por la caída de fragmentos de rocas en las vías ferroviarias de Canadá (Lan *et al.*, 2010); asimismo, existen investigaciones sobre la probabilidad de desprendimientos de rocas en diferentes temporadas del año (Macciotta *et al.*, 2017). Los estudios se han enfocado en la presencia de eventos geomorfológicos en los corredores de transporte; no obstante, hacen falta trabajos en lugares visitados por el turismo de montaña, como es el parque provincial Stawamus Chief, en el distrito de Squamish. Allí, la caída de rocas es la amenaza con mayor número de incidencias en Canadá. Se encontró una alta susceptibilidad no solamente en las zonas de turismo ecológico, sino también a lo largo de la carretera 99, especialmente entre Horseshoe Bay y Porteau Cove (Blais Stevens *et al.*, 2012). Sin embargo, no se ha generado una cronología de eventos peligrosos a partir de la interpretación de alteraciones de crecimiento en los anillos de árboles. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar la frecuencia de la caída de rocas por medio de técnicas dendrogeomorfológicas en el escarpe noroeste de Stawamus Chief en Squamish, Canadá.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El parque provincial de Stawamus Chief se localiza a 65 km al norte de Vancouver (Figura 1). El sitio se caracteriza por elevaciones que varían de 0 a 695 m sobre el nivel del mar, y formas de terreno con pendientes entre 0 y 90°. Las inclinaciones en las laderas varían entre los 25 y 60°, y predominan las orientaciones hacia el noroeste, lo que provoca una mayor concentración de humedad en los suelos y en la pared del escarpe, en tanto que la zona con pendientes entre 0 y 10° presenta una orientación predominante hacia el suroeste. El macizo rocoso de Stawamus Chief está conformado por una intrusión de composición granodiorítica de la era Mesozoica (Cretácico medio) asociada con cuarzos de diorita y granodiorita foliada, pertenecientes a la Cordillera Costera Canadiense, cuyo origen se remonta al Triásico Superior (Macciotta *et al.*, 2017; Cui *et al.*, 2017).

El clima en el área de estudio es costero moderado y la precipitación media anual de 2230 mm. El periodo de menor precipitación es entre junio y septiembre, mientras que la mayor precipitación se registra en noviembre (119 mm); la caída de nieve inicia a finales de octubre y termina a finales de marzo. La mayor temperatura (24 °C) se registra en los meses de julio y septiembre, pero disminuye a partir de octubre, mientras que en enero y febrero se registran las temperaturas mínimas (1 °C). La zona de estudio alberga el río Squamish, alimentado por aguas de deshielo glacial y que fluye hacia el sur hasta la cabecera de Howe Sound, donde se ubica la ciudad de Squamish.

Las condiciones edafoclimáticas favorecen el desarrollo de especies vegetales tales como *Pseudotsuga menziesii* (Lee *et al.*, 2016; Thompson, Lewis y Poirer, 2018; Martin *et al.*, 2018), *Thuja plicata* (Villa *et al.*, 2004; Sanborn *et al.*, 2006), *Picea sitchensis* (Elleouet y Aitken, 2019), *Tsuga heterophylla* (Black, Shaw y Stone, 2010) y *Tsuga mertensiana* (Gedalof y Smith, 2001; Marcinkowski, Peterson y Ettl, 2015).

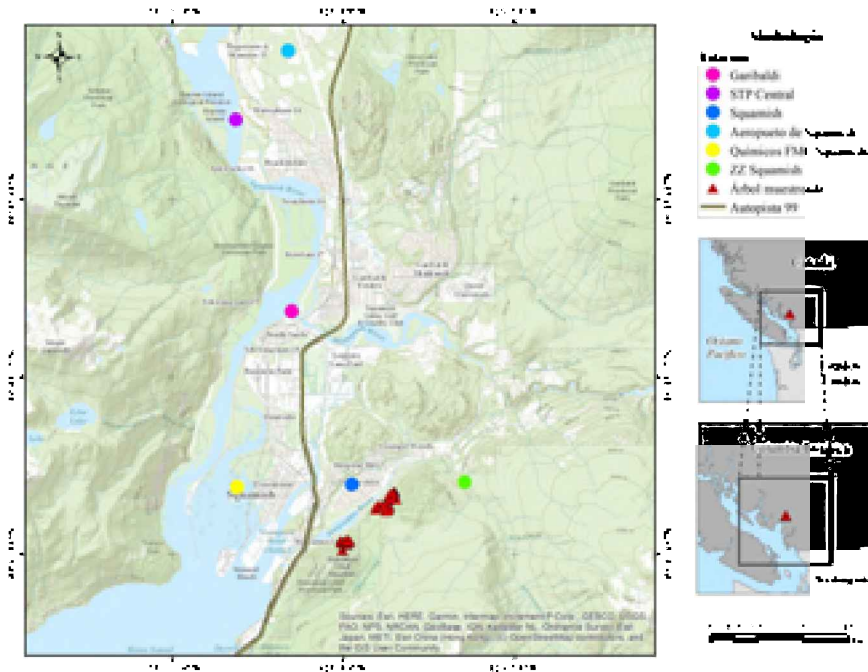


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

GEOMORFOLOGÍA

La cartografía geomorfológica se realizó a partir de la interpretación visual de una imagen LIDAR con resolución de 1 m por píxel a una escala de 1:1500 dentro del programa ArcGIS 10.6.1. A partir de la imagen LIDAR, se generaron las curvas de nivel, un modelo sombreado, los mapas de pendientes y orientación de la ladera, así como diversos perfiles topográficos. Debido al detalle de modelo digital de terreno y el trabajo de campo realizado, se identificaron geoformas a nivel de formas de relieve (Sensu Zinck, 2013).

MUESTREO DENDROCRONOLÓGICO Y PROCESAMIENTO DE MUESTRAS

Se realizó un muestreo dendrocronológico mediante un taladro tipo Pressler en el escarpe noroeste del parque provincial Stawamus Chief, cerca de la localidad de Squamish y a 63,5 km al norte de Vancouver, sobre la carretera 99 (Figura 1). Se colectaron de dos a tres muestras por árbol, se obtuvieron 151 series dendrocronológicas de 75 árboles. Las especies muestreadas fueron *Tsuga heterophylla* (29 árboles), *Pseudotsuga menziesii* (26 árboles), y *Thuja plicata* (20 árboles). Los árboles muestreados se seleccionaron

de acuerdo con la metodología propuesta por Stoffel y Bollschweiler (2009), es decir, especímenes con presencia de respuestas claras y/o recientes de golpes por rocas, que correspondían a tejido calloso, destrucción parcial del tronco, o evidencias de algún proceso antiguo; las muestras se tomaron a ambos costados de la herida/cicatriz o sobre el tejido calloso. Al considerar las recomendaciones de Butler (1987), se describieron las características del terreno, especies muestreadas, condiciones de la vegetación, presencia de rocas, así como de la geometría de la cicatriz, altura de la herida a su centro, orientación de la toma de muestra y diámetro a la altura del pecho (DAP).

El preprocesamiento de las muestras se realizó de acuerdo con la metodología estándar establecida por Schweingruber *et al.* (1990). Las muestras se pulieron con lijas de diferente granulometría (80, 150, 400, 600, 1200 granos/cm²), facilitando el fechado y la medición de cada uno de los anillos y las anomalías de crecimiento (AC). Las respuestas en los núcleos se identificaron por observación directa y bajo microscopio.

GENERACIÓN DE CRONOLOGÍA DE EVENTOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La cronología de eventos se generó con el programa de cómputo FHAES, reconocido como una herramienta en la evaluación de las características de los regímenes de incendios, ataques de insectos, erupciones volcánicas y procesos geomorfológicos (Sutherland *et al.*, 2017). Con el apoyo de FHAES es posible determinar la frecuencia, extensión geográfica, temporalidad y las relaciones entre eventos naturales y crecimiento de los árboles (Speer *et al.*, 2019).

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio del índice de caída de rocas de Shroder (1978), el cual está basado en el número de árboles dañados en el año R_t y el número total de árboles del año N_t , y se expresa en porcentaje. El valor crítico para considerar la existencia de un evento es igual o mayor que 10 %, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de respuesta (Shroder 1978)} \quad (1)$$

$$I_t = \frac{\sum R_t}{\sum N_t} \times 100\%$$

Donde:

I_t = índice de respuesta

R_t = número de árboles dañados en el año t

N_t = número de árboles vivos en el año t

La frecuencia de eventos se estimó por medio de la división de la edad del árbol entre el número de eventos presentes en la muestra (Franco Ramos *et al.*, 2017). La representación espacial de la edad de los árboles y la frecuencia de los eventos se realizó a través de la técnica de interpolación del doble inverso de la distancia en el programa ArcGIS 10.6.4. Se definieron tres sitios o clústeres, de acuerdo con la distribución de muestras.

POTENCIALES FACTORES DETONANTES: PRECIPITACIÓN Y SISMOS

Se descargaron datos climáticos de seis estaciones meteorológicas (Tabla 1) del portal del Pacific Climate (<https://data.pacificclimate.org/portal/pcds/map/>), debido a la asociación entre las precipitaciones y las caídas de rocas. Las series de datos históricos utilizados pertenecen al periodo de 1959 a 2017. Se analizaron informes de seis estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, cuya distancia máxima a la zona de muestreo fue de 10.4 km. Las estaciones cuentan con cifras referentes a la precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento y caída de nieve. Después de un análisis de consistencias por el método de curva de doble masa, se determinó que la estación con datos sobresalientes fue Squamish Airport (10476Fo), localizada a 10.4 km de los sitios de muestreo. El análisis anterior se realizó a partir de lluvias acumuladas en tres y cinco días, de acuerdo con Delonca, Gunzburger y Verdel (2014).

Tabla 1. Características de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Estación	Distancia a zona de muestreo (m)	Fecha inicio	Fecha final	Datos totales	% de vacíos Prec.	% de vacíos Tmax	% de vacíos Tmin
Squamish	1146	01/01/1959	31/08/1996	8408	1.00	5.10	4.76
ZZ Squamish	2799	25/05/1970	03/05/1988	1965	0.00	no dato	no dato
Squamish FMC Chemicals	2519	01/11/1968	28/02/1983	5004	0.16	no dato	no dato
STP Central	9196	01/08/1986	31/10/2005	7027	0.07	0.03	0.07
Garibaldi	4953	01/09/1975	31/12/2000	1607	1.12	10.39	11.23
Squamish Airport	10447	17/05/1985	31/12/2010	10335	1.00	0.13	0.15

Por otra parte, la serie de datos sísmicos se descargó de la página de [Recursos Naturales de Canadá](#); abarca un periodo de 406 años (1600-2006) con un total de 161 sismos significativos (superiores a 6 en la escala de Richter).

RESULTADOS

GEOMORFOLOGÍA

La interpretación geomorfológica de la zona de muestreo permitió identificar 16 formas de relieve; predominan las laderas, taludes y escarpes con diferentes inclinaciones y características, las cuales están modeladas por procesos gravitacionales (Figura 2, Tabla 2). A su vez, la evolución del río Stawamus ha generado al menos dos niveles de terrazas con pendientes ligeras donde se ha efectuado el desarrollo habitacional.

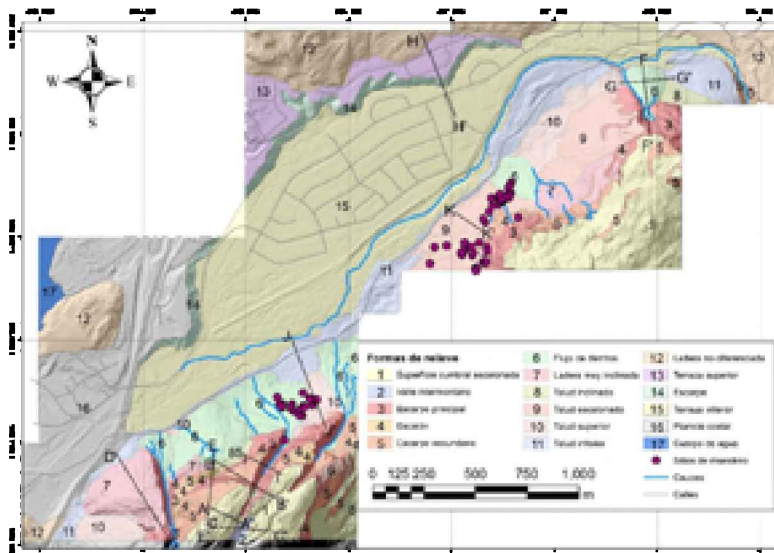


Figura 2. Mapa geomorfológico del escarpe noroeste del parque provincial Stawamus Chief y del poblado de Valleycliffe.

Tabla 2. Superficie de las formas de relieve de la zona de estudio.

FORMAS DE RELIEVE	SUPERFICIE (HA)	SUPERFICIE %
1. Superficie cumbre escalonada	40.9	7.8
2. Valle intermontano	0.7	0.1
3. Escarpe principal	20.7	3.9
4. Escalón	2.8	0.5
5. Escarpe secundario	16.9	3.2

FORMAS DE RELIEVE	SUPERFICIE (HA)	SUPERFICIE %
6. Flujo de detritos	32.6	6.2
7. Ladera muy inclinada	16.6	3.1
8. Ladera inclinada	7.7	1.5
9. Talud escalonado	23.2	4.4
10. Talud superior	15.3	2.9
11. Talud inferior	34.2	6.5
12. Ladera no diferenciada	55.2	10.5
13. Terraza superior	17.3	3.3
14. Escarpe	11.5	2.2
15. Terraza inferior	157.6	29.9
16. Planicie costera	67.0	12.7
17. Cuerpo de agua	6.5	1.2
Total	526.7	~100

Nota: Las cantidades se redondearon a un decimal.

ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO

Los tres sitios de muestreo presentan variaciones en la edad de los árboles, lo que puede deberse a la magnitud o frecuencia de los eventos que han ocurrido ladera arriba (Tabla 3). La edad promedio de los árboles muestreados es de 107 años; sin embargo, en algunos árboles se dificultó llegar al centro (núcleo), por tal motivo pueden ser más longevos. El árbol más longevo así como el más joven fueron localizados en el clúster I (Tabla 3); la edad mínima registrada es de 6 años, y la máxima de 391 años.

En los sitios I y II, los árboles más longevos son de la especie *P. menziesii* con 391 y 201 años; el promedio por zona es de 142 y 92 años respectivamente. En el sitio III, el árbol más longevo tiene 104 años y pertenece a la especie *T. heterophylla* (Figura 3). A nivel de especies, los árboles más longevos son de *P. menziesii* (108 años en promedio), seguidos por la especie *T. heterophylla* (86 años en promedio) (Tabla 4). El sitio donde se encuentran los árboles más longevos (sitio I) coincide con una zona de desprendimiento localizada en la unidad geomorfológica de ladera muy inclinada.

Tabla 3. Resumen de edades por sitio.

EDADES						
SITIO	ÁRBOLES	PROMEDIO	DES. EST.	MÁXIMA	MÍNIMA	MUESTRAS > 60 AÑOS
I	23	142	101.6	391	6	31
II	27	92	31.4	201	32	43
III	28	57	21.6	104	13	24

Tabla 4. Edades promedio por especie y clúster.

ESPECIE	SITIO I	SITIO II	SITIO III	PROMEDIO
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	164	115	47	108
<i>Tsuga heterophylla</i>	109	87	62	86
<i>Thuja plicata</i>	64	101	48	71

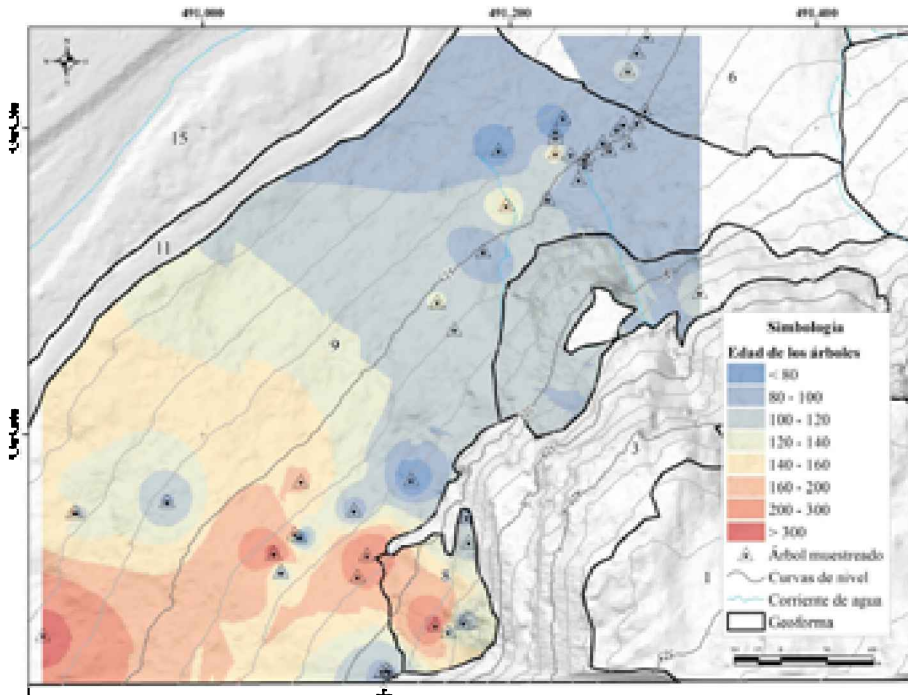


Figura 3. Distribución de edades de los árboles de los sitios I y II. Simbología de formas de relieve: 1-Superficie cumbre escalonada, 3-Escarpe principal, 4-Escalón, 5-Escarpe secundario, 6-Flujo de detritos, 7-Ladera muy inclinada, 9-Talud escalonado, 11-Talud inferior, 15-Terraza inferior.

La edad de los árboles en el clúster III varía entre 10 y 100 años y coincide con una zona de flujos de detritos localizada entre 125 y 225 m s.n.m.; es importante mencionar que en esta área se encuentran más árboles jóvenes (<20 años). Otra característica de este sitio es que está devastado por un evento de caída de rocas de 2015, por lo que carece de datos suficientes para la interpolación adecuada de las edades (Figura 4).

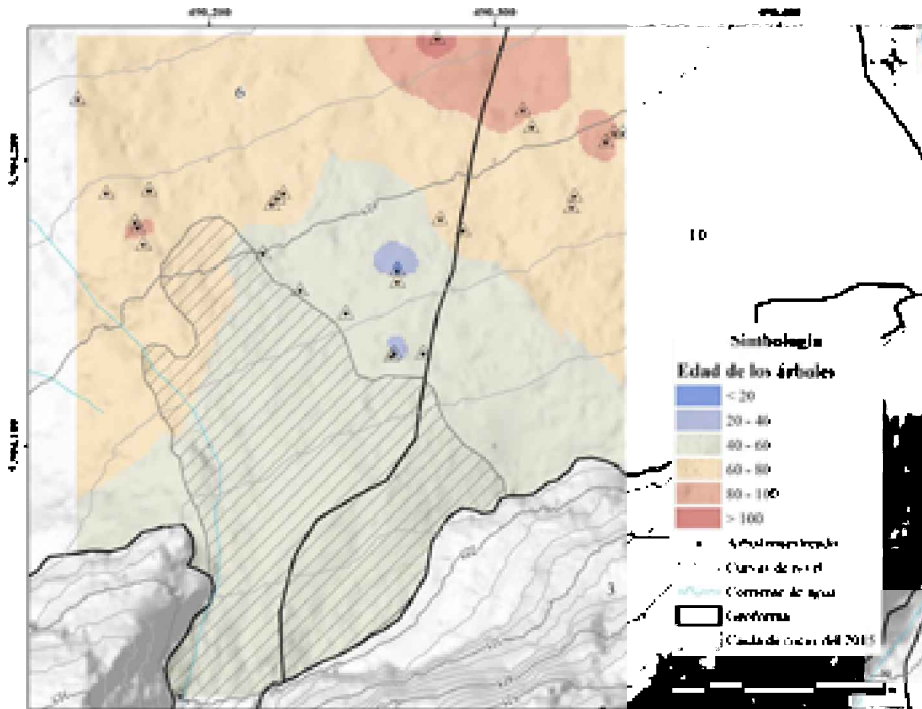


Figura 4. Edades del sitio III. Simbología de formas de relieve: 3-Escarpe principal, 6-Flujo de detritos, 10-Talud superior.

CRONOLOGÍA DE EVENTOS GEOMORFOLÓGICOS

Se identificaron 911 anomalías de crecimiento (AC) provocadas por la caída de rocas. El 82 % de las AC correspondieron a supresión abrupta de crecimiento (SAC), seguida por los ductos resiníferos tangenciales (DRT), con un 14 % (Tabla 5). A partir del Índice de Shroder, se determinaron 74 eventos en el periodo dendrocronológico de 1635 a 2017. Sin embargo, el análisis se centró en el periodo 1850-2017, debido al limitado número de muestras (10) entre los años 1635 y 1850. Los tres sitios de muestreo sólo coinciden en el periodo 1915-2017.

Tabla 5. Anomalías de crecimiento presentes en las series dendrocronológicas.

TIPO DE RESPUESTA	SITIO I	SITIO II	SITIO III	TOTAL	AC
SAC	249	346	160	755	82.9 %
DTR	39	68	24	131	14.4 %
Callo	4	12	5	21	2.3 %
Madera de reacción	1	2	1	4	0.4 %
				911	100.00 %
			No. Eventos totales		74

El evento de 1991 cuenta con un total de 135 series dendrocronológicas, con altos valores del Índice de Shroder (sitio I, 60 %; sitio II, 48 % y sitio III, 49 %). Al considerar los tres sitios de muestreo en conjunto, se identificaron 51 eventos de caída de rocas en el periodo de estudio. Los años con los mayores valores del Índice de Shroder fueron 1855 (36 %), 1925 (37 %), 1991 (52 %) y 2015 (37 %).

La frecuencia de la caída de rocas en los escarpes de Stawamus Chief fue mayor durante la primera mitad del siglo XX y disminuyó drásticamente a partir de 1960. El periodo 1940-1959 registró la mayor cantidad de eventos de caída de rocas (11), y se calculó un Índice de Shroder de 53.33 %; este periodo se asocia al desarrollo habitacional de Valleycliffe; mientras que en el periodo 1980-1999 se registraron dos eventos y el valor más alto del Índice de Shroder es de 60 % (Figura 5).

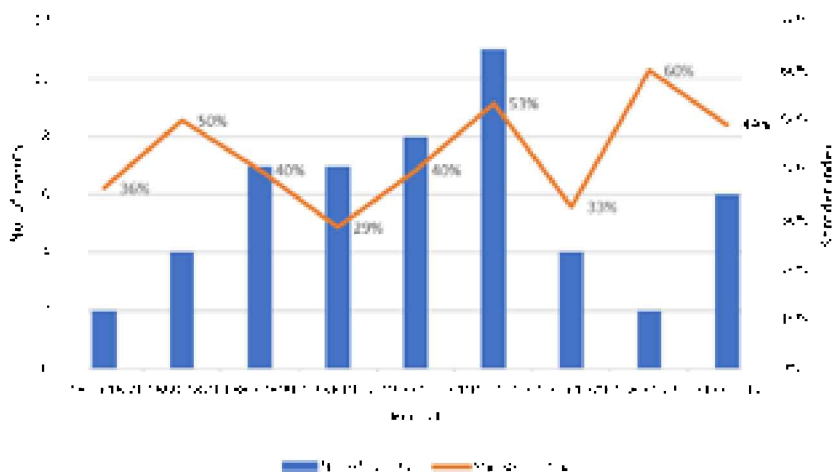


Figura 5. Número de eventos e Índice máximo de Shroder en la zona de estudio por periodo de veinte años.

PERIODOS DE RETORNO

El sitio II presenta periodos de retorno más cortos (<14 años) en comparación con el sitio I (>14 años), por lo que consideramos que los árboles que se desarrollan en el área del sitio II han sido mayormente afectados por eventos geomorfológicos, ya que residen en un área de alta actividad (Figura 6). El muestreo en el sitio I se realizó en dos formas de relieve: a) en laderas muy inclinadas y b) en el talud escalonado. En las primeras, se identificaron periodos de retorno inferiores a 8 años, mientras que, en talud escalonado, los periodos de retorno superan los 18 (Figura 6). Los árboles en el sector norte rebasan los 120 años, mientras que en la parte sur se encuentran árboles con edades mayores de 200 años. En la porción inferior del talud escalonado, sobrepasan los 140 años, con periodos de retorno menores de 14 años.

El muestreo en el sitio II se realizó en el talud escalonado y al pie del escarpe principal. Los periodos de retorno estimados varían entre 10 y 14 años; los árboles más cercanos a la pared del escarpe presentan periodos de retorno de 10 a 12 años. Los árboles poseen edades menores a 80 años, las cuales concuerdan con un periodo importante de eventos registrados entre 1925 y 1930; se calculó un Índice de Shroder de 40 % para el año 1925. La respuesta de los árboles puede estar vinculada a un flujo de detritos.

El muestreo en el sitio III se realizó en un flujo de detritos y en el talud superior. Los periodos de retorno no superan los 25 años (Figura 7); sin embargo, hay una zona en la porción cercana al escarpe con periodos de retorno de 40 años. La zona ubicada entre las elevaciones de 100 a 150 m (SNM) presenta una distribución de periodos de retorno de 10 a 15 años y los árboles cumplen edades de 40 a 80 años, por otro lado, las zonas más altas ostentan periodos de retorno menores a 15 años y edades de entre los 40 y 60 años.

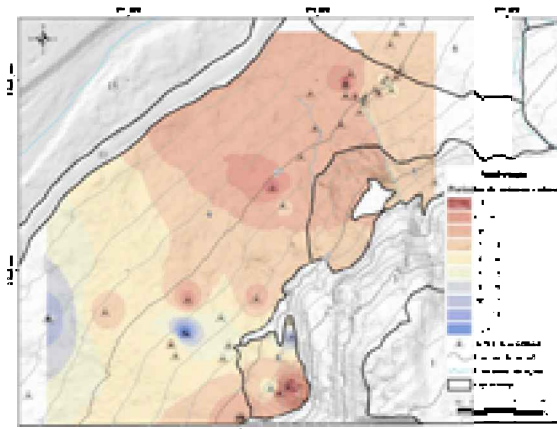


Figura 6. Mapa de periodos de retorno de los clústeres I y II. Simbología de formas de relieve: 1-Superficie cumbre escalonada, 3-Escarpe principal, 4-Escalón, 5-Escarpe secundario, 6-Flujo de detritos, 7-Ladera muy inclinada, 9-Talud escalonado, 11-Talud inferior, 15-Terraza inferior.

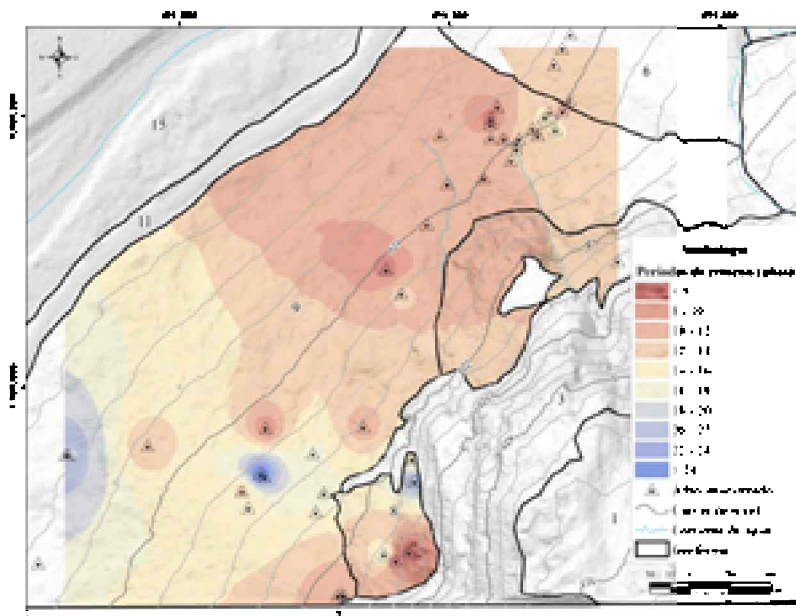


Figura 7. Mapa de periodos de retorno del clúster III. Simbología de formas de relieve: 3-Escarpe principal, 6-Flujo de detritos, 4-Talud superior.

POTENCIALES FACTORES DETONANTES: PRECIPITACIÓN Y SISMOS

Acorde al registro de datos de precipitación y temperatura, el área se caracteriza por un periodo húmedo de septiembre a abril. Este punto se puede destacar observando el periodo con registro de datos de precipitación (1959 a 2017) coincide con 12 eventos de caída de roca. El análisis de las precipitaciones diarias indica que, al menos existió un evento de precipitación máxima superior a 50 mm durante el estudio.

Hay que advertir que tras realizar el análisis de precipitaciones acumuladas para tres y cinco días se observó que las máximas acumuladas durante los meses de noviembre a febrero son mayores al umbral de 50 mm, valor crítico identificado como disparador de eventos de caída de rocas (Macciotta *et al.*, 2017). El año que presentó la menor precipitación acumulada en tres días fue en 1969 con 71.4 mm en el mes de diciembre (Tabla 6). Lo anterior permite examinar que el área es propensa a eventos de caída de roca cuyo detonante es la precipitación.

En los años de 1989, 1991, 2009 y 2015 se registraron valores de precipitación diaria acumulada en cinco días superiores al 10 % de la precipitación anual. Cabe resaltar que en 1991 se calculó el valor más alto del índice de Shroder (60 %), para ese mismo año se aconteció una precipitación acumulada en cinco días de 273 mm (Tabla 6).

Tabla 6. Precipitaciones acumuladas de tres y cinco días en el periodo 1960-2017. Se resalta en negritas los años donde se superó el 10 % de la precipitación total anual.

AÑO	ÍNDICE DE SHRODER		PRECIPITACIÓN (MM)			% PRECIPITACIÓN ANUAL	
	MÁXIMO VALOR DEL ÍNDICE POR CLÚSTER	ÍNDICE PARA TOTAL EL ÁREA	Σ 3 DÍAS	Σ 5 DÍAS	PREC. ACUM. ANUAL	3 DÍAS	5 DÍAS
1968	10.5 %	0.0 %	206.7	228.3	2739.9	7.5	8.3
1969	32.6 %	26.4 %	71.4	124	2051.1	3.5	6
1971	21.6 %	14.5 %	134.1	173.5	2148.3	6.2	8.1
1973	16.2 %	11.1 %	187.2	205.2	2146.1	8.7	9.6
1989	34.0 %	27.6 %	183.4	214.8	2118.1	8.7	10.1
1991	60.0 %	51.9 %	194.8	273.8	2259.8	8.6	12.1
2003	18.8 %	10.7 %	167.8	248.4	2702.4	6.2	9.2
2007	17.0 %	14.1 %	238.3	251.6	2905.8	8.2	8.7
2009	11.3 %	0.0 %	189.4	289.4	2097.2	9.0	13.8
2012	12.2 %	0.0 %	155	173.5	2271.4	6.8	7.6
2015	49.1 %	36.6 %	215.2	246.2	2393.3	9.0	10.3
2016	17.0 %	0.0 %	50.8	172.5	2403.7	2.1	7.2

En los años de 1991, 2003, 2007, 2009 y 2015 la precipitación acumulada a 5 días superó el doble de lo acontecido en noviembre. Se identificaron lluvias torrenciales de alto impacto como detonante de la caída de rocas en el escarpe; tales años coinciden con eventos de caída de rocas con Índices de Shroder de 60.0, 18.8, 17.0, 11.3 y 49.1 %.

En el periodo de 1909 a 2005, se presentaron 61 sismos con magnitud entre 4.5 y 9 en la escala de Richter en la provincia de Columbia Británica; diez tuvieron una magnitud de entre 6 y 8, las cuáles coincidieron con siete (14 %) eventos de colapso identificados en las series dendrocronológicas.

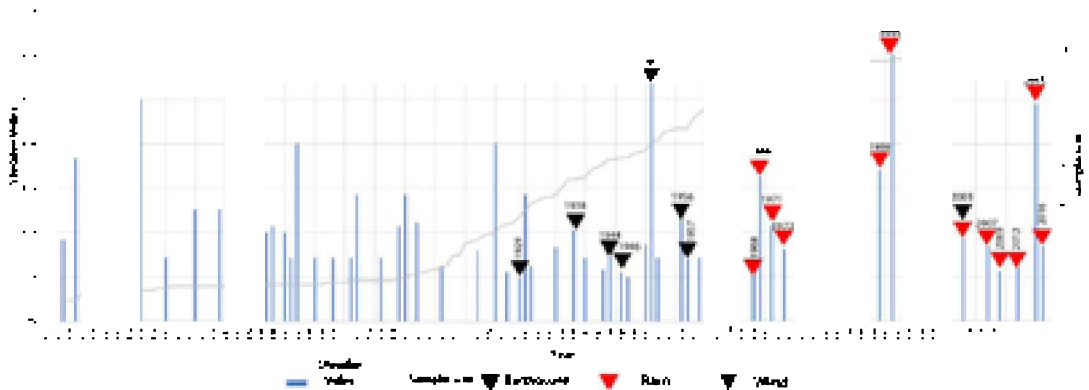


Figura 8. Cronología de eventos de caída de rocas y su coincidencia con posibles factores detonantes. Las flechas negras indican sismo, las flechas rojas indican precipitaciones acumuladas de tres o cinco días superiores al 10 % de la precipitación anual, y las flechas grises indican vientos fuertes.

DISCUSIÓN

Los anillos de los árboles protagonizan la única fuente de información útil para evaluar la frecuencia y distribución espacial de ciertos eventos geomorfológicos ocurridos en zonas montañosas. En consecuencia, los resultados pueden ser integrados en la estimación de peligros y riesgos a escalas temporales amplias. El muestreo en Stawamus Chief se realizó en los árboles con presencia de heridas visibles y respuestas en el tallo que correspondieran a daños por caída de rocas. Sin embargo, es posible que las cicatrices generadas por impactos de rocas, de hace más de 80 años, estén ocultas en su totalidad, por lo que escapan a la cronología de eventos (Lafortune, Filion y Héту 1997).

La presente investigación empleó el Índice de Shroder, indicador que ha sido utilizado en los informes dendrocronológicos como primera alternativa para una evaluación de la frecuencia de eventos geomorfológicos. Se utilizó un valor crítico del Índice de Shroder de 10 %, al ser un valor adecuado para un tamaño de muestra de aproximadamente 60 árboles (Morel *et al.*, 2015), por lo tanto, el número de muestras analizadas es adecuado para identificar la caída de rocas en un periodo de 167 años. Un tamaño de muestra menor sólo permite reconstruir periodos de tiempo más cortos (Trappman, Corona y Stoffel 2013; Morel *et al.*, 2015). Los valores del Índice de Shroder obtenidos en la presente investigación reafirman lo reportado en estudios previos para la reconstrucción de diferentes procesos geomorfológicos en Estados Unidos (Shroder, 1978), Francia (Corona, López Saez y Stoffel 2014), Canadá (Lafortune, Filion y Héту 1997), Ucrania (Šilhán, Pánek y Hradecký 2012), entre otros. Por lo tanto, los valores del Índice

de Shroder son adecuados para la reconstrucción de eventos dendrogeomorfológicos, como se identificó en el sur de los Alpes Franceses (Corona, López Saez y Stoffel 2014).

Investigaciones previas realizadas en el sur de la Columbia Británica realizadas por Blais Stevens y Hungr (2008), se menciona que en el periodo 1850-2007 se presentaron 154 eventos de deslizamientos, los cuales coinciden parcialmente con los resultados obtenidos en la presente. Blais Stevens y Hungr (2008) recolectaron datos a partir de registros históricos para conocer la frecuencia y tipo de proceso geomorfológico en la carretera 99; ellos mencionan que los deslizamientos se detonaron debido a la construcción de dicha carretera y de un desarrollo habitacional cercano a partir de 1950. La investigación se basó en la búsqueda de periódicos y documentos históricos, por lo que existe la posibilidad de que los datos anteriores a 1950 fuesen escasos. Previo a esa fecha, únicamente se detectó un evento por década, mientras que en el presente estudio se identificaron en el escarpe noroeste de Stawamus Chief 33 eventos de caída de roca entre 1850 y 1949. Después de 1959 se atestiguó una reducción significativa de eventos, a pesar del alto desarrollo en la infraestructura de la provincia. Sin embargo, Blais Stevens y Hungr (2008) determinaron que en la década de 1990 se registró el mayor número de deslizamientos (43). En el escarpe estudiado solamente se presentó un evento de caída de roca, el cual tuvo el Índice de Shroder más alto (60 %).

De acuerdo con Stoffel *et al.* (2019) los sismos pueden detonar diferentes tipos de deslizamientos, siendo la caída de roca el evento más susceptible y frecuente, dentro de un radio de influencia de hasta 400 km. Para el caso del escarpe de Stawamus Chief, se registraron 14 sismos de magnitud superior a 6 en la escala de Richter en el periodo de 1700 a 2004. Se identificaron deslizamientos en tres ocasiones y dos tsunamis dentro de la Columbia Británica. Además, dentro de un radio de influencia del epicentro de 400 km hubo coincidencia con tres eventos registrados en 1912, 1936 y 1946, respectivamente. A pesar de identificar a la precipitación como primordial, el Ministerio Forestal Canadiense ha mencionado que la isla Queen Charlotte y la isla de Vancouver son los centros sísmicos más importantes para la activación de la caída de rocas en Stawamus Chief (Ministry of Forest, 2015); adicionalmente, se especula que en un año posterior al sismo puede ser precursor, debido a que podría generar fracturas o aumentar las zonas de debilidad en la roca.

Los datos de precipitación de las cuatro estaciones meteorológicas analizadas indican que los eventos de máxima precipitación ocurren entre octubre y noviembre, y disminuyen en el mes de marzo, siendo este último donde se presentan los procesos de deshielo, mismos que generan, a su vez, caída de rocas (Macciotta *et al.*, 2017). A partir del análisis de las estaciones cercanas a Stawamus Chief, se determinó que las lluvias acumuladas en tres días varían entre 50.8 mm hasta 238.3 mm. Los resultados del análisis de precipitación también sugieren una estrecha relación con la frecuencia y ocurrencia de caída de rocas, tal y como lo sugiere Macciotta *et al.* (2017), quienes determinaron que en

la región la caída de rocas se detona con precipitaciones de entre 50 y 238 mm; estas representan el 3 % de la precipitación total anual, especialmente en laderas orientadas al noroeste. La precipitación se considera el detonador más importante en la zona de estudio: en los eventos de caída de roca registrados, precipitó al menos 50 mm; incluso en dos años se registró el doble de precipitación media de noviembre, lo cual coincide con la mayor frecuencia de caída de rocas en la carretera 99 (Macciotta *et al.*, 2017). Sin embargo, la ocurrencia de un factor detonante no necesariamente desencadena un evento de caída de rocas. Delonca *et al.* (2014) afirman que los efectos climatológicos varían respecto a la probabilidad de generarlo.

Por otra parte, los procesos de hielo y deshielo también pueden detonar el suceso con un retraso de hasta dos días. En Squamish, durante el mes de marzo se registran temperaturas mínimas menores a -8° y máximas de unos 7.5 °C, con amplitudes térmicas diarias de alrededor de 13 °C. Tal variación favorece al deshielo y la consecuente caída de rocas (Macciotta *et al.*, 2017). Otro factor detonante es el cambio del uso de suelo (Glade, 2003; Alcántara Ayala, Esteban Chávez y Parrot, 2006; Reichenbach, Mondini y Rossi, 2004; Persichillo, Bordini y Meisina, 2017); por ejemplo, la pérdida de la cobertura promueve la reducción del *permafrost*, desestabilizando el material aglutinante de los escarpes; no obstante, en el área escasean antecedentes de la relación entre cambio de uso de suelo y caída de rocas.

Los efectos negativos que genera un evento geomorfológico pueden atenuarse mediante la aplicación de ciertas medidas. En el distrito de Squamish Lillooet se han llevado a cabo diferentes estrategias a partir de la comprensión de fenómenos geomorfológicos. Como muestra, en el abanico del flujo de detritos de Charles Creek, a 43 km de Squamish, se han registrado al menos siete eventos desastrosos, de los cuales el 18 de septiembre de 1969 causó la peor devastación. En ese mismo año en Stawamus Chief se presentó un evento de caída de rocas que obligó a las autoridades a construir una represa para retener el material desplazado del flujo de detritos; esta ha tenido un excelente funcionamiento al mitigar los efectos de la inestabilidad de laderas, tal como ocurrió en noviembre de 2006, cuando sucedió un evento de flujo de detritos con un volumen de 20 000 m³ que fue retenido exitosamente. Las medidas de mitigación por parte de las autoridades comenzaron en la década de los setenta, debido a los eventos que sucedieron en años anteriores y a los decesos en la carretera 99 (Blais Stevens y Hungr, 2008).

Hay que reconocer que la implementación de medidas de mitigación reduce el riesgo, generalmente, partir de la reforestación en áreas sujetas a peligro por caída de rocas es efectivo, ya que los árboles reducen la aceleración de los bloques, disminuyendo los efectos negativos en elementos tanto naturales como antropogénicos (Dupire *et al.*, 2016; Moos *et al.*, 2018). En el caso de Stawamus Chief, el camino en la parte más baja del parque Mamquam ha sido afectado al menos por un evento de caída de rocas en

2015, por lo que es una vía susceptible; en ese sentido, la densidad de árboles presentes en la zona proporciona un nivel de protección que podría incrementarse con alguna obra de retención de detritos.

Los bosques como medida de mitigación son una alternativa natural ante los desprendimientos, tanto por su factibilidad económica como por los beneficios ambientales que brindan a la zona (Dupire *et al.*, 2016; Bianchi *et al.*, 2018). Además, se podrían determinar las trayectorias a partir del punto de desprendimiento mediante la identificación de los golpes en los árboles (Lan *et al.*, 2010). Otra opción es la instalación de vallas en los senderos cercanos al escarpe del parque provincial Stawamus Chief, como lo describen Moya *et al.* (2010).

En este trabajo se comprobó la utilidad de los métodos dendrocronológicos en la identificación y determinación de la peligrosidad y actividad de la caída de rocas. Sin embargo, se sugiere continuar la investigación de amenazas a través de técnicas dendrogeomorfológicas; es conveniente estudiar las trayectorias a partir del punto de desprendimiento y analizar el comportamiento del bosque como medida de protección. La limitante en la realización de estudios dendrogeomorfológicos es la merma de datos ocasionada por eventos de alta magnitud, los cuales suelen asolar ciertas áreas, por lo que es posible que se pierda la información (Ballesteros *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

El estudio de las caídas de rocas en el parque provincial Stawamus Chief por medio de técnicas dendrogeomorfológicas es de utilidad en la estimación de la intensidad, frecuencia y distribución espacial de eventos peligrosos; estos parámetros son útiles en la elaboración de planes de prevención y mitigación de riesgos hacia los elementos vulnerables de la zona, tales como los visitantes del parque (excursionistas, escaladores, ciclistas) y, en general, la infraestructura cercana a los escarpes. El mapa geomorfológico y la dinámica identificada indican que, en el parque provincial, se pueden realizar estudios de eventos de caída de rocas y flujo de detritos y reptación, no solo en las unidades muestreadas, sino en el resto de las unidades interpretadas al pie del escarpe.

En la serie cronológica de 167 años, se reconstruyeron 51 eventos de caída de roca; el 14 % de ellos pudo detonarse por algún sismo de magnitud igual o mayor de 6 en la escala de Richter, y el 24 % por precipitaciones acumuladas de tres o cinco días asociadas a valores inferiores a 50 mm. Otros procesos naturales que contribuyen a la inestabilidad incluyen el ciclo de congelación-descongelación dentro de las articulaciones ubicadas del monolito de granodiorita, el crecimiento de raíces adentro de las articulaciones y el derretimiento de la nieve.

De las cuatro especies muestreadas en Stawamus Chief, se concluyó que las especies con el mayor potencial para registrar la caída de rocas son *T. plicata* y *P. menziesii*. *T. heterophylla* presentó el mayor número de marcas de disturbio de crecimiento, como supresión abrupta de anillos y ductos resiníferos tangenciales; sin embargo, debido a la dureza de su madera fue la especie que presentó mayor dificultad.

El muestreo dendrocronológico permitió crear una primera cronología de caída de rocas en el parque provincial Stawamus Chief, al facilitar mapas de periodos de retorno, los cuales son clave en la identificación de zonas con mayor peligro para los visitantes o, en otras palabras, ayudan a determinar los senderos con menor riesgo de accidentes. El método puede aplicarse en áreas de estudio y especies vegetales diversas, y contribuir al ordenamiento territorial, la gestión de riesgos y la seguridad social al incorporar los resultados a los planes y programas de prevención y mitigación de daños en el área. En efecto, este tipo de investigaciones contribuye a programas nacionales estratégicos (Pro-naces) en México, relacionados con la salud, agua, sistemas socioecológicos, seguridad humana y cultura.

AGRADECIMIENTOS

Orlando Lemus agradece al Conacyt la beca de maestría. Manuel E. Mendoza agradece al proyecto papiit-unam y a Texas A&M University por la Halbouty visiting professor chair. El equipo de investigadores del presente trabajo extiende su sincero agradecimiento a Craig Walsh del distrito de Squamish por proporcionar la nube de puntos de lidar, a Antonio Navarrete, de ciga-unam por el procesamiento de la nube y a Alejandro Carrera por la elaboración de los mapas finales.

REFERENCIAS

- Alcántara Ayala, I., Esteban Chávez, O., Parrot, J. F. (2006). Landsliding related to land-cover change: a diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*, 65(2), pp.152-165. doi: 10.1016/j.catena.2005.11.006
- Ballesteros Cánovas, J. A., Stoffel, M., St. George, S., Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 39(6), pp. 794-816. doi:10.1177/0309133315608758.

- Bianchi, E., Accastello, C., Trappmann, D., Blanc, S., Brun, F. (2018). The Economic Evaluation of Forest Protection Service Against Rockfall: A Review of Experiences and Approaches. *Ecological Economics* 154 (septiembre), pp. 409-418. doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.08.021.
- Black, B. A., Shaw, D. C., Stone J. K. (2010). Impacts of Swiss needle cast on overstory Douglas-fir forests of the western Oregon Coast Range. *Forest Ecology and Management* 259(8), pp. 1673-1680. doi: 10.1016/j.foreco.2010.01.047.
- Blais-Stevens, A., Hungr, O. (2008). *Landslide Hazards and Their Mitigation Along the Sea To Sky Corridor, British Columbia*. 4th Canadian Conference on Geohazards.
- Blais-Stevens, A., Behnia, P., Kremer, M., Page, A., Kung, R., Bonham-Carter, G. (2012). Landslide susceptibility mapping of the Sea to Sky transportation corridor, British Columbia, Canada: comparison of two methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), pp. 447-466. doi: 10.1007/s10064-012-0421-z.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 4, pp. 71-81. doi: 10.5194/nhess-4-71-2004.
- Butler, D. R. (1987). Teaching General Principles and Applications of Dendrogeomorphology. *Journal of Geological Education* 35(2), pp. 64-70. doi: 10.5408/0022-1368-35.2.64.
- Clague, J. J., Bobrowsky, P. T. (2010). International Year of Planet Earth 8. Natural Hazards in Canada. *Geoscience Canada* 37(1), pp. 17-37.
- Corona, C., Lopez Saez, J., Stoffel, M. (2014). Defining optimal sample size, sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstructions. *Quaternary Geochronology* 22, pp. 72-84. doi: 10.1016/j.quageo.2014.02.006.
- Cui, Y., Miller, D., Schiarizza, P., Diakow, J. L. (2017). British Columbia digital geology. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, British Columbia Geological Survey Open File 2017-8, 9p. Data version 2019-12-19. Última modificación el 19 de diciembre de 2019. Recuperado el 20/07/2020 de <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/industry/mineral-exploration-mining/british-columbia-geological-survey/geology/bc-geology-overview>
- Delonca, A., Gunzburger Y., Verdelm T. (2014). Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14(8), pp. 1953-1964. doi 10.5194/nhess-14-1953-2014.
- Dorren, L., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M., Wehrli, A. (2007). State of the art in rockfall-forest interactions. *Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen*. 158(6): 128-141. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128>
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J. M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., Curt, T. (2016). The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity. *Forest Ecology and Management* 382, pp. 269-279. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.020.

- Elleouet, J. S., Aitken, S. N. (2019). Long-distance pollen dispersal during recent colonization favors a rapid but partial recovery of genetic diversity in *Picea sitchensis*. *New Phytologist* 222(2), pp. 1088-1100. doi: 10.1111/nph.15615.
- Franco Ramos, O., Stoffel, M., Ballesteros Cánovas, J. A. (2019). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. *Journal of Mountain Science* 16(9), pp. 2096-2109. doi: 10.1007/s11629-019-5496-6.
- Franklin, J. (1997). Senior SA. The Ontario rockfall hazard rating system. 647-658. Athens: Proceedings of the conference on Engineering Geology and Environment.
- Gausson, H., Bagnouls, F. (1952). L'indice xérothermique. *Bulletin de l'association de Géographes français*. 222-223, pp. 10-16.
- Gedalof, Z., Smith, D. J. (2011). Dendroclimatic response of mountain hemlock (*Tsuga mertensiana*) in Pacific North America. *Canadian Journal of Forest Research* 31(2), pp. 322-332. doi: .org/10.1139/x00-169.
- Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *CATENA* 51, pp. 297-314. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00170-4.
- Government of Canada (2019). Última modificación el 19 de diciembre de 2017. Recuperado el 20/08/2020 de <https://www.nrcan.gc.ca/hazards/landslides>
- Lan, H. D., Martin, C., Zhou, C., Lim, H. (2010). Rockfall hazard analysis using LIDAR and spatial modeling. *Geomorphology* 118 (1-2), pp. 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.002>
- Hooke, J. M. (2019). Changing landscapes: Five decades of applied geomorphology. *Geomorphology* 1-19. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.06.007.
- Hungr, O., Evans, S. G., Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls and rockslides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal* 36(2), pp. 224-238. doi: 10.1139/t98-106.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95(4), pp. 406. doi: 10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2.
- Lafortune, M., Filion, L., Hétu, B. (1997). Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec) [Dynamics of a forest edge on an active scree slope occurring in a cold temperate climate environment (Gaspé Peninsula, Québec)]. *Géographie Physique et Quaternaire* 51(1), pp. 67-80. doi: 10.7202/004840ar.
- Lan, H., Martin, C. M., Zhou, C., Lim, C. H. (2010). Rockfall hazard analysis using LIDAR and spatial modeling. *Geomorphology* 118(1-2), pp. 213-223. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.01.002.
- Lee, E. H., Beedlow, P. A., Waschmann, R. S., Tingey, D. T., Wickham, C., Cline, S., Carlile, C. (2016). Douglas-fir displays a range of growth responses to temperature,

- water, and Swiss needle cast in western Oregon, USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 221, pp. 176-188. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.02.009
- Lim, C. H., Martin, C. D., Herd, E. P. (2004). Rock fall hazard assessment along railways using GIS. 57th Canadian Geotechnical Conference, 1-8.
- Lopez Saez, J., Corona, C., Eckert, N., Stoffel, M., Bourrier, F., Berger, F. (2016). Impacts of land-use and land-cover changes on rockfall propagation: Insights from the Grenoble conurbation. *Science of the Total Environment* 547, pp. 345-355. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.148.
- Luckman, B. H., Fiske, C. J. (1995). Estimating long-term rockfall accretion rates by lichenometry. In Slaymaker O. (Ed). *Steepland Geomorphology*, 233-255.
- Macciotta, R., Hendry, M., Cruden, D. M., Blais Stevens, A., Edwards, T. (2017). Quantifying rock fall probabilities and their temporal distribution associated with weather seasonality. *Landslides* 14(6), pp. 2025-2039. doi: 10.1007/s10346-017-0834-7.
- Maerz, N. H., Youssef, A., Fennessey, T. W. (2005). New risk-consequence rockfall hazard rating system for Missouri highways using digital image analysis. *Environmental Engineering Geoscience* 11(3), pp. 229-249.
- Marcinkowski, K., Peterson, D. L., Ettl, G. J. (2015). Nonstationary temporal response of mountain hemlock growth to climatic variability in the North Cascade Range, Washington, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(6), pp. 676-688. doi: 10.1139/cjfr-2014-0231.
- Martin, J., Looker, N., Hoylman, Z., Jencso, K., Hu, J. (2018). Differential use of winter precipitation by upper and lower elevation Douglas fir in the Northern Rockies. *Global Change Biology* 24(12), pp. 5607-5621. doi: 10.1111/gcb.14435.
- Ministry of Forest (2015). *Annual service plan report*. Vancouver: Ministry of Forest, Lands and Natural Resources. Vancouver, Canada.
- Moos, C., Fehlmann, M., Trappmann, D., Stoffel, M., Dorren, L. (2018). Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis - Two case studies in Switzerland. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32, pp. 55-74. doi: 10.1016/j.ijdr.2017.09.036.
- Morel, P., Trappmann, D., Corona, C., Stoffel, M. (2015). Defining sample size and sampling strategy for dendrogeomorphic rockfall reconstructions. *Geomorphology* 2367, pp. 79-89. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.02.017.
- Moya, J., Corominas, J., Pérez Arcas, J., Baeza, C. (2010). Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology* 118(3-4), pp. 393-408. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.007.
- NRC (2008). Canada's Most Damaging Landslides. *Geofacts*. Accessed April 19, 2019. www.publications.gc.ca/collections/collection_2008/nrcan/M4-59-2-2008E.pdf [April 19, 2019].

- NRC (2017). *Landslides*. recuperado el 19/04/2019 de <https://www.nrcan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/landslides/10661>.
- Owens, P., Slaymaker, O. (2004). *Mountain Geomorphology*. Londres: Routledge
- Perret, S., Stoffel, M., Kienholz, H. (2006). Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps. A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 74(1-4), pp. 219-231. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.08.009.
- Persichillo M. G., Bordoni, M., Meisina, C. (2017). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Sci Total Environ* 574, pp. 924-937. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.125.
- Pierson, L. A., Davis, S. A., Van Vickle, R. (1990). Rockfall Hazard Rating System, Implementation Manual. Report FHWA-OR-EG-90-01. Federal Highway Administration (fhwa). Oregon, e.u.a., u.s.
- Rapp A. (1960). Recent Development of Mountain Slopes in Kärkevagge and Surroundings, Northern Scandinavia. *Geografiska Annaler* 42(2-3), pp. 65-200, doi: 10.1080/20014422.1960.11880942.
- Reichenbach, P., Mondini, A. C., Rossi, M. (2014). The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: The Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environ Management* 54(6), pp. 1372-1384. doi: 10.1007/s00267-014-0357-0.
- Sanborn, P., Geerstema, M., Jull, T., Hawkes, B. (2006). Soil and sedimentary charcoal evidence for Holocene forest fires in an inland temperate rainforest, east-central British Columbia, Canada. *Holocene* 16(3), pp. 415-427.
- Sassa, K., Fukouka, H., Wang, F., Wong, G. (2005). Landslides. Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides. Berlín: Springer.
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre Bachet, F., Bräcker, O. U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8, pp. 9-38.
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, pp. 168-185.
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J. (2012). Tree-ring analysis in the reconstruction of slope instabilities associated with earthquakes and precipitation (the Crimean Mountains, Ukraine). *Geomorphology* 173-174, pp. 174-184. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.06.010.
- Solomina, O. N. (2002). Dendrogeomorphology: research requirements. *Dendrochronologia* 20(1-2), pp. 233-245. doi: 10.1078/1125-7865-00019.
- Speer, J. H., Shah, S. K., Truettner, C., Pacheco, A., Bekker, M. F., Dukpa, D., Tenzin, K. (2019). Flood history and river flow variability recorded in tree rings on the Dhur River, Bhutan. *Dendrochronologia* 56 (junio), p. 125605. doi: 10.1016/j.dendro.2019.125605.

- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M., Monbaron, M. (2005). Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest. A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68(3-4), pp. 224-241. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.11.017.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. (2009). What Tree Rings Can Tell About Earth-Surface Processes: Teaching the Principles of Dendrogeomorphology. *Geography Compass* 3(3), pp. 1013-1037. doi: 10.1111/j.1749-8198.2009.00223.x.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. R., Luckman, B. M. (2010). *Tree Rings and Natural Hazards*. Londres: Springer.
- Sutherland, E. K., Brewer, O. W., Falk, D. A., Velásquez, M. E. (2017). Fire History Analysis and Exploration System. Arizona, Missoula Forestry Sciences Lab.
- Thompson, N. P., Lewis, K. J., Poirier, L. M. (2018). Adjacency to a harvest trail increases drought resistance of interior Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*) in partially harvested stands in central British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 48(7), pp. 809-820. doi: 10.1139/cjfr-2018-0007
- Trappmann, D., Corona, C., Stoffel, M. (2013). Rolling stones and tree rings: A state of research on dendrogeomorphic reconstructions of rockfall. *Progress in Physical Geography* 37(5), pp. 701-716. doi: 10.1177/0309133313506451.
- Villa, B., Guibal, F., Torre, F., Martin, J. L. (2004). Assessing spatial variation in browsing history by means of fraying scars. *Journal of Biogeography* 31(6), pp. 987-995. doi: 10.1111/j.1365-2699.2004.01040.x.
- Zinck, A. (2013). *Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies*. IRC, Enschede, Países Bajos.

14

CAPÍTULO

Dagne Boudet Rouco¹
Manuel Eduardo Mendoza Cantú¹
Teodoro Carlón Allende²
José Villanueva Díaz³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Michoacán, México.

²CONACYT - Instituto de Geofísica, Universidad
Nacional Autónoma de México, Michoacán, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias, México.

**REVISIÓN SOBRE APLICACIÓN DE TÉCNICAS
DENDROCRONOLÓGICAS EN LA ESTIMACIÓN DE
PELIGROS ASOCIADOS A GRANDES PRECIPITACIONES
PLUVIALES EN ZONAS DE MONTAÑAS**

RESUMEN

Los desastres provocados por eventos extremos del clima, en particular las precipitaciones, están aumentando a nivel mundial tanto en magnitud como en frecuencia. Los peligros asociados a eventos hidrometeorológicos intensos pueden conducir a desastres, cuyos resultados están condicionados por factores físicos o sociales. Por ello, la evaluación de peligros requiere de información sobre la intensidad o magnitud del evento y la probabilidad de ocurrencia o frecuencia. En las zonas montañosas, los eventos relacionados con las precipitaciones: inundaciones y procesos de remoción en masa, están entre los peligros más comunes que confrontan las poblaciones locales. Diversos autores han utilizado las técnicas dendrocronológicas para estimar el advenimiento de este tipo de peligros; los árboles pueden preservar evidencia de actividad geomórfica pasada, así como interacciones con los procesos hidrológicos, lo que puede proporcionar la datación de eventos con resolución anual o subanual. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo una revisión de lo escrito por diferentes autores sobre la aplicación de técnicas dendrocronológicas en la estimación de peligros asociados a grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña.

Palabras clave: anillos de árboles, dendrocronología, inundaciones, lluvias, procesos de remoción en masa.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Sexto Informe sobre Cambio Climático del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), celebrado en 2021, en la mayoría de las regiones terrestres ha aumentado la frecuencia e intensidad de los eventos con grandes precipitaciones. Los estudios de peligros asociados a precipitaciones extremas cada vez cobran

mayor importancia debido al pronóstico de un veloz acrecentamiento en la variabilidad del ciclo del agua y los extremos de precipitación, a comparación de los cambios medios en la mayoría de las regiones del mundo, así como en todos los escenarios de emisiones futuras con un alto nivel de confianza.

Los peligros asociados a eventos hidrometeorológicos extremos pueden conducir a desastres donde factores físicos y sociales condicionan tal resultado; por tal motivo, la evaluación de peligros requiere conocer la intensidad, magnitud, probabilidad y frecuencia del evento. En ese sentido, la existencia de datos y observaciones históricas confiables donde ocurren estos sucesos ayuda a que los análisis sean relativamente simples de establecer en una cronología (Zeng *et al.*, 2020; Böhner y Bechtel, 2017; Seneviratne *et al.*, 2012). Por el contrario, la falta de registros en estaciones hidrometeorológicas provoca que la evaluación de peligros obtenida de grandes precipitaciones en zonas montañosas sea limitada; por lo tanto, se debe recurrir a técnicas para estimarlos; en estas se han usado productos de percepción remota, análisis y modelamiento de datos con sistemas de información geográfica, modelaciones numéricas, y en los últimos años es cada vez más frecuente la utilización de técnicas dendrocronológicas.

El objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión de la literatura publicada entre el 2011 y mayo de 2021 en la base de datos de Scopus sobre la aplicación de técnicas dendrocronológicas para la estimación de peligros asociados a grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña.

PELIGROS ASOCIADOS A EVENTOS DE GRANDES PRECIPITACIONES PLUVIALES

Los principales peligros desencadenados por el efecto de grandes precipitaciones pluviales en zonas montañosas son las inundaciones y los procesos de remoción en masa (PRM) (Guzzetti *et al.*, 2007). Estos eventos dependen de múltiples factores: el grado de inclinación y orientación de la pendiente, el tipo de suelo y su uso, la estructura geológica, las condiciones hidrogeológicas y las características de las precipitaciones (Šilhán, 2015; Borga *et al.*, 2014). Para el último factor debe tomarse en cuenta su comportamiento histórico, intensidad-duración y acumulación previa antes del acontecimiento (Melchiorre y Frattini, 2012; Hong *et al.*, 2006; Finlay *et al.*, 1997).

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, una inundación se define como “el desbordamiento de agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas” (WMO/UNESCO, 2012). La reconstrucción de inundaciones pasadas permite cartografiar áreas de peligro relacionadas con una magnitud de inundación determinada, y en algunos casos, con una frecuencia conocida, lo que mejora la evaluación del peligro de inundaciones (Garrote *et al.*, 2018).

Un PRM se define como el movimiento ladera abajo de una masa de roca, escombros o tierra por efecto de la gravedad (Cruden y Varnes, 1996). Dicho desplazamiento puede darse en tres modos distintos: caída, deslizamiento y flujo, aunque también existen combinaciones (Bobrowsky y Highland, 2012).

Si bien *grandes precipitaciones* no es propiamente un término técnico, se emplea para referirse a las precipitaciones que, en apenas pocos días o incluso en 24 horas, alcanzan valores extremos capaces de generar amenazas. Este término es útil durante el análisis de lluvias producidas por fenómenos meteorológicos extremos, mejor conocidas como lluvias torrenciales, que pueden generar tanto acumulados iguales o superiores a 60 mm en menos de una hora como una serie de precipitaciones acumuladas relevantes y continuas. Esta clase de precipitaciones generalmente se asocia a ondas tropicales, líneas de turbonada, frentes, ciclones tropicales y extratropicales, entre otros (Planos *et al.*, 2011). Dado todo lo anterior, la caracterización de frecuencias sobre eventos por grandes precipitaciones es fundamental en la evaluación de los peligros de inundaciones (Ruiz Villanueva *et al.*, 2017; Merz y Blöschl, 2003) y PRM (Pasculli *et al.*, 2021; Peres *et al.*, 2018; Haque *et al.*, 2016; Kirschbaum *et al.*, 2012; Larsen y Simon, 1993; Caine, 1980).

DATACIÓN Y ESTIMACIÓN DE EVENTOS PELIGROSOS A PARTIR DE TÉCNICAS DENDROCRONOLÓGICAS

La dendrocronología es la ciencia para la datación de eventos y variaciones del pasado en el medio ambiente, a través del estudio comparativo de los anillos de crecimiento en árboles y maderas envejecidas (Kaennel y Schweingruber, 1995). Las inundaciones repentinas pueden afectar el desarrollo de los árboles de diferentes maneras, lo que se evidencia en el crecimiento de sus anillos (Stoffel y Bollschweiler, 2009). Por ejemplo, los árboles que se sitúan cerca de los cauces y son afectados por inundaciones presentan cicatrices por el impacto de materiales arrastrados por la corriente durante una crecida (Camarero y Ortega Martínez, 2021; Ballesterio Cánovas *et al.*, 2015).

Mediante la aplicación de técnicas dendrocronológicas es posible identificar y datar disturbios en los anillos de crecimiento de árboles afectados por distintos procesos geomorfológicos. La combinación de la dendrocronología con la geomorfología, es decir, la dendrogeomorfología, se basa en la capacidad de los árboles dañados por procesos geomórficos para registrar perturbaciones externas en sus secuencias de anillos de crecimiento (Shroder, 1978). La dendrogeomorfología es una ciencia útil para analizar la frecuencia y magnitud de los deslizamientos a escala intraanual en laderas boscosas (Šilhán & Stoffel, 2015).

Los estudios dendrogeomorfológicos sobre inundaciones o PRM se basan generalmente en el concepto de *proceso-evento-respuesta*, definido por Shroder en 1978. Pueden producir una o más respuestas sobre la morfología de los árboles perjudicados, tales como crecimiento de madera de reacción, supresión, liberación y terminación del crecimiento, brotación y sucesión o cambios estructurales y morfológicos diversos en los caracteres interno y externo de la madera (Ballestero Cánovas *et al.*, 2015; Díez Herrero *et al.*, 2008; Shroder, 1978). Bajo este esquema, el proceso puede ser causado por cualquier tipo de agente geomórfico, mientras que el evento puede estar representado por un defecto visible en el exterior del árbol ocasionado durante el proceso. Y la respuesta se refiere a la huella anatómica dejada por el evento de inundación en el registro de los anillos (Ballestero Cánovas *et al.*, 2015).

La caracterización y datación de estos eventos peligrosos a partir de la dendrocronología solo se puede realizar si en la zona de estudio existen árboles que se hayan desarrollado antes del incidente, y que aún se mantengan en pie o al menos una parte de ellos para la extracción de evidencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis de la literatura sobre los peligros asociados a grandes precipitaciones pluviales, inundaciones y PRM en zonas montañosas a partir del estudio de publicaciones en la base de datos de Scopus. Los criterios de búsqueda se basaron en los artículos y capítulos de libros publicados entre enero de 2011 y mayo de 2021, con el fin de conocer los avances y las estrategias de investigación más recientes sobre el tema en cuestión. Las palabras clave fueron seleccionadas en inglés: “Dendrochronology and floods and Mountain”; “Dendrochronology and landslides or rockfall or debris flow or mass movement and mountain”; “Dendrochronology and hazard and Mountain”, ya que todas las publicaciones en Scopus cuentan con resúmenes y palabras clave en este idioma, aunque el del texto sea otro.

Las publicaciones extraídas de la búsqueda de Scopus con las palabras clave antes mencionadas fueron analizadas y filtradas; solo se consideraron aquellas que examinaron los peligros asociados a eventos de grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña. Posteriormente, se clasificaron según las temáticas abordadas y se concentraron en una base de datos en Microsoft Excel, donde se agrupó cada trabajo de acuerdo con los criterios expuestos en la Tabla 1. A partir de dicho estudio se elaboró un análisis estadístico de artículos publicados por temática, año y país.

RESULTADOS

De acuerdo con los criterios descritos para la búsqueda en Scopus, se encontraron 70 publicaciones que desarrollan técnicas dendrocronológicas para el estudio de peligros relacionados con eventos de grandes precipitaciones pluviales, señalados en la Figura 1: 40 de ellos (57.2 %) relacionados con el estudio de los peligros de PRM, 29 (41.4 %) con el de peligro por inundaciones y 1 (1.4 %) con ambas temáticas. Los tópicos más relevantes en las publicaciones revisadas fueron el análisis y reconstrucción de eventos de PRM y determinación de umbrales de precipitaciones pluviales para la ocurrencia de inundaciones y PRM, así como artículos de revisión del estado del arte en el tema. Otros temas presentados son la influencia de fenómenos meteorológicos y climatológicos en la conyuntura de eventos peligrosos en zonas de montaña, y la influencia del cambio climático.

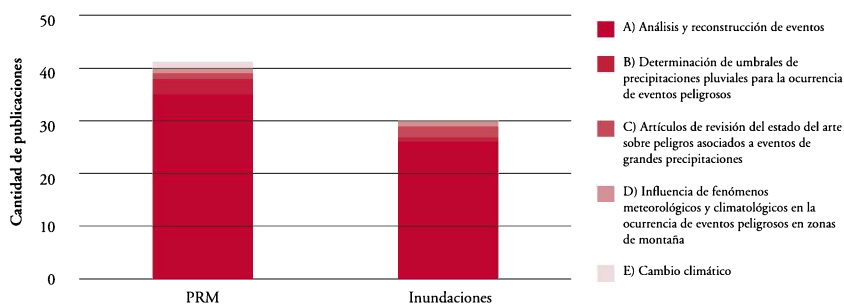


Figura 1. Cantidad de publicaciones por temática relacionadas con la utilización de técnicas dendrocronológicas en los estudios de peligros asociados a eventos de grandes precipitaciones pluviales en el período 2011-mayo de 2021. A) Análisis y reconstrucción de eventos; B) determinación de umbrales de precipitaciones pluviales para la ocurrencia de eventos peligrosos; C) artículos de revisión del estado del arte sobre peligros asociados a eventos de grandes precipitaciones; D) influencia de fenómenos meteorológicos y climatológicos en la ocurrencia de eventos peligrosos en zonas de montaña E) cambio climático.

La tendencia de la cantidad de artículos se ha incrementado en los últimos 10 años, fundamentalmente las publicaciones relacionadas con PRM. Es importante señalar que el periodo de cierre del análisis de la cantidad de publicaciones fue en mayo de 2021 debido a que en esa fecha se elaboró este trabajo. Tras un máximo en el año 2015, el número de estudios acerca de inundaciones se limitó durante unos años; sin embargo, en el año 2020 volvieron a alcanzar un pico positivo. Por su parte, las publicaciones sobre PRM mantuvieron un ascenso en el periodo 2016-2021; los números obtenidos hasta mayo de 2021 superaron todas las cifras de la primera mitad de la década, excepto del año 2013, cuando las igualaron (Figura 2).

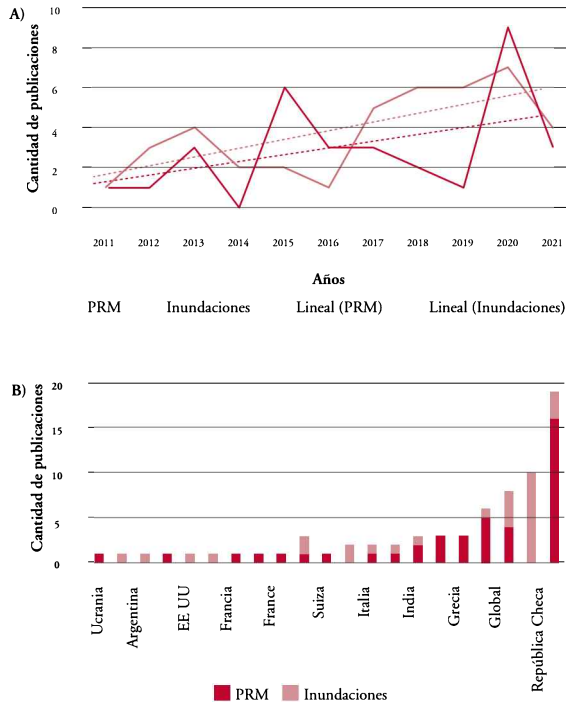


Figura 2. Cantidad de publicaciones por A) año y B) por países sobre peligros asociados a eventos de grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña en el período 2011-mayo de 2021.

Se identifica que las investigaciones consideran diversas especies de árboles. Las más analizadas en los peligros por PRM son *Larix decidua* (36.6 % del total de publicaciones), *Picea abies* (31.7 %) y *Fagus sylvatica* (19.5 %); mientras que en estudios relacionados con peligros por inundaciones, las especies frecuentemente observadas son *Picea abies* (25.8 %), *Pinus sylvestris* (22.6 %) y *Alnus glutinosa* (16.1 %). Todas estas son comunes y abundantes en ambientes con climas templados, fríos y montañosos, por lo que es usual que se encuentren ejemplares de edad adecuada y, por lo tanto, un historial suficientemente extenso para los estudios de peligro.

Cabe destacar que, para los trabajos sobre peligro de inundaciones, se utilizaron 70 especies, mientras que para aquellos sobre peligros por deslizamientos fue una menor variedad: 29 (Figura 3); esto está asociado a que en los ambientes riparios se puede encontrar una mayor diversidad de especies que en ambientes templados fríos, debido a que las características hidroclimáticas son propicias; por ejemplo, el agua que fluye a través de una zona riparia facilita el reciclamiento de los nutrientes (Granados Sánchez *et al.*, 2006).

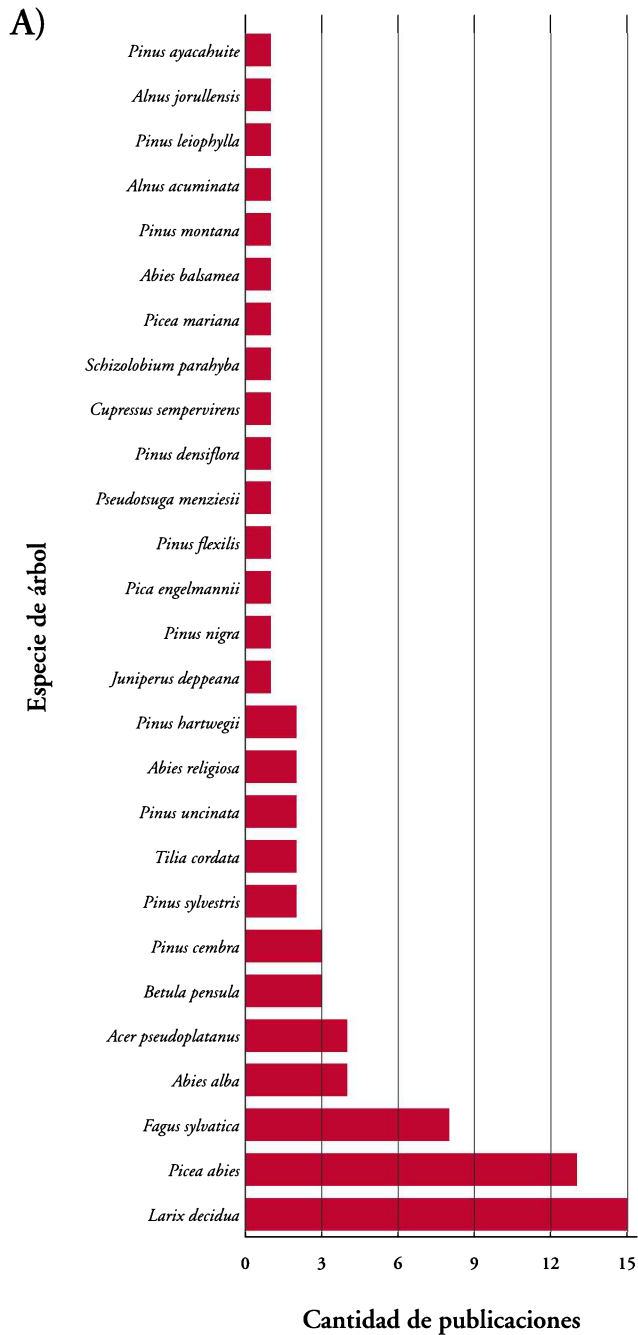


Figura 3. Cantidad de publicaciones y especies analizadas en A) PRM.

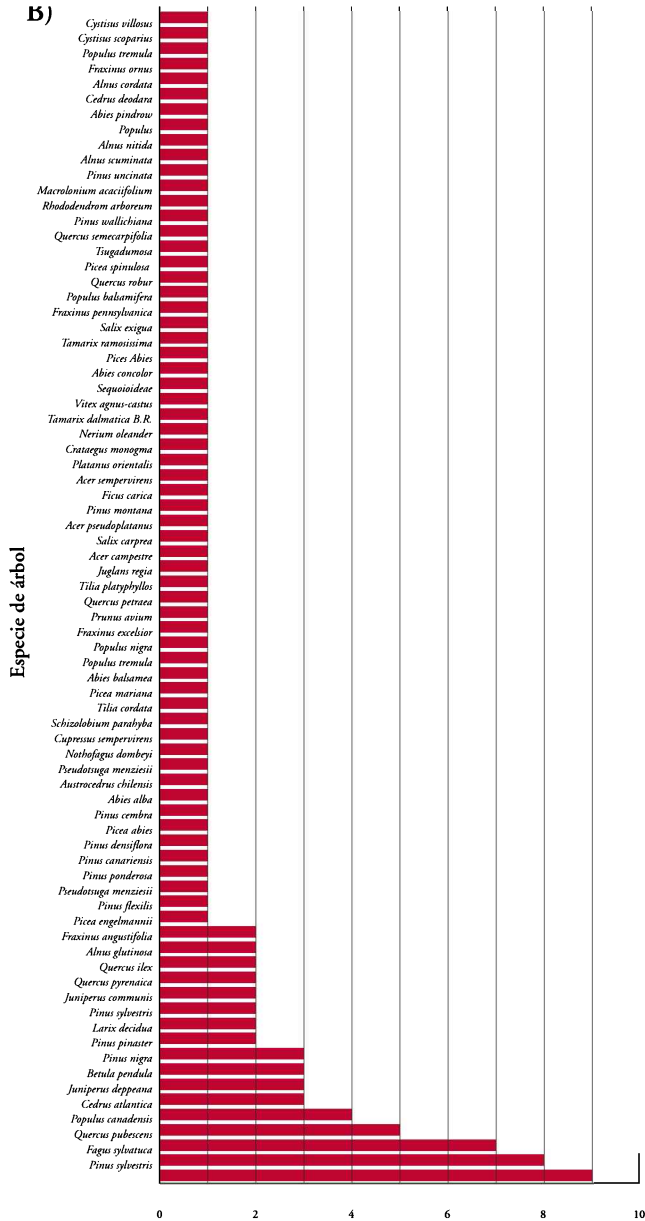


Figura 3 (continuación). B) Inundaciones vinculadas a eventos de grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña en el período 2011-mayo de 2021.

La revista que publicó el mayor número de trabajos relacionados con los PRM fue *Geomorphology*; y los relacionados con inundaciones, *Hydrological processes* (Figura 4).

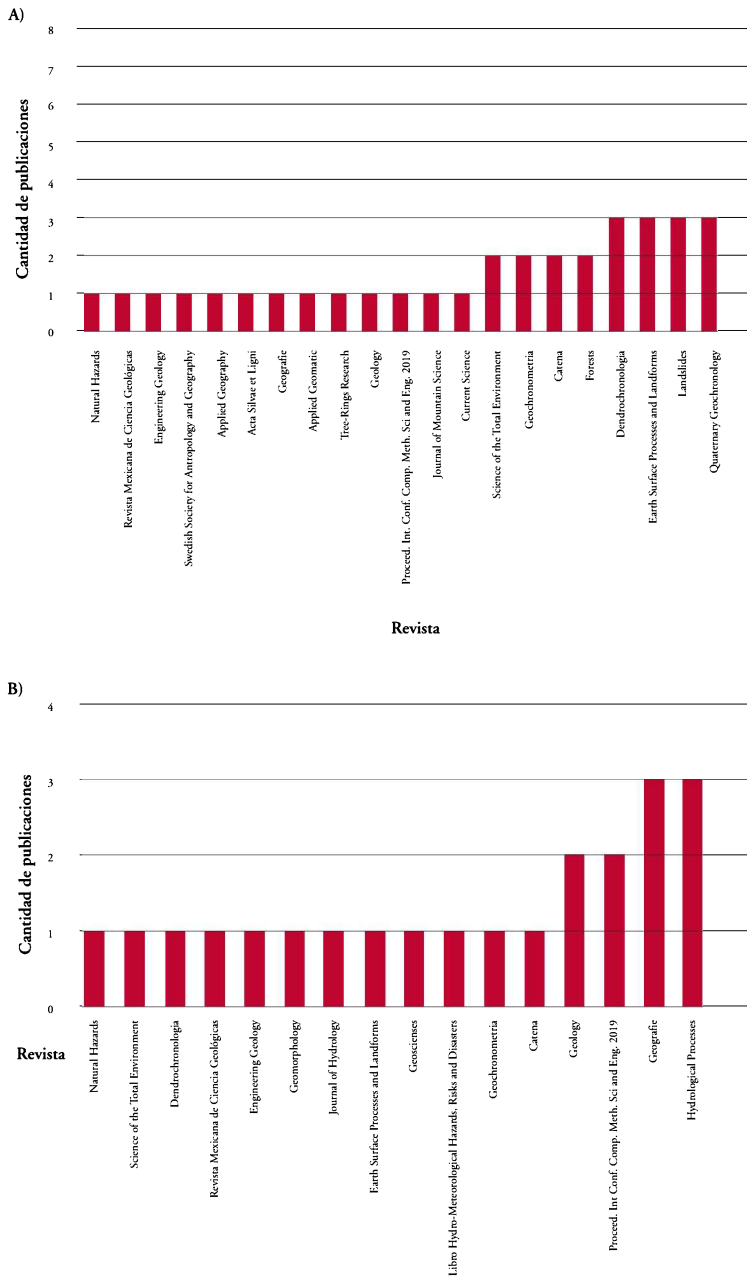


Figura 4. Cantidad de publicaciones por revistas A) PRM y B) inundaciones sobre peligros asociados a eventos de grandes precipitaciones pluviales en zonas de montaña en el período 2011-mayo de 2021.

DISCUSIÓN

En los últimos 10 años, ha incrementado el número de publicaciones que desarrollan técnicas dendrocronológicas en temas relacionados con el análisis de peligros. Los trabajos se han llevado a cabo principalmente en zonas de montaña templadas, donde las inundaciones suelen ser súbitas y los deslizamientos frecuentes debido a las características físico-geográficas de dichos ambientes.

Aunque existe un extenso número de publicaciones dedicadas al análisis y reconstrucción de situaciones de peligro asociadas a eventos de grandes precipitaciones en zonas de montaña, aún escasean los trabajos sobre la determinación de umbrales de precipitaciones pluviales para la ocurrencia de eventos peligrosos, la influencia de fenómenos meteorológicos y climatológicos en su acontecer, y la variabilidad y cambio climático. Estos temas son de vital importancia en el desarrollo de sistemas de alerta temprana y prevención de desastres. Asimismo, los anillos arborales se distinguen por su alta resolución temporal (anual o subanual) y espacial, útil para estudios de peligrosidad, lo que hace de la dendrocronología una ciencia rica por explotar en comparación con otras fuentes de información.

Las investigaciones sobre inundaciones permiten una mejor comprensión de la variabilidad hidrológica y climática en largos periodos de tiempo (*Díez Herrero et al.*, 2013; *Ballesteros Cánovas et al.*, 2015). Los fenómenos meteorológicos que traen consigo eventos de grandes precipitaciones difieren en función de la localización de la zona de estudio. Las más comunes en zonas montañosas son las precipitaciones orográficas en meses de verano, aunadas a fenómenos meteorológicos típicos de la circulación atmosférica en cada sitio estudiado. La mayor parte de los estudios se ha centrado en zonas templadas y frías, donde es frecuente que el agua resultante de grandes precipitaciones pluviales se sume a la aportada por el deshielo primaveral, esto último favorece la probabilidad de que sucedan eventos peligrosos. No obstante, solo una mínima parte de los estudios profundiza en el análisis sobre los orígenes meteorológicos y climatológicos de los acontecimientos por grandes precipitaciones; en consecuencia, se torna en un tópico a reforzar en futuros estudios.

La serie de anillos arborales representa un archivo natural de suma importancia para comprensión del comportamiento de los PRM e inundaciones del pasado; asimismo, permiten obtener datos únicos sin la necesidad de un monitoreo de campo a largo plazo. También contribuyen al análisis de los factores desencadenantes, aunque la investigación dendrogeomorfológica tiene limitaciones como la edad de los árboles o destructividad del fenómeno de investigación, lo que genera numerosas incertidumbres (*Šilhán*, 2020).

Los anillos de árboles han demostrado ser, en diversas ocasiones, una herramienta confiable para la adquisición de datos sobre eventos que constituyen peligros, sobre todo,

los asociados a grandes precipitaciones pluviales. Es decir, el monitoreo retrospectivo y su análisis contribuyen sustancialmente a la comprensión de eventos peligrosos en cuencas hidrográficas y, por lo tanto, constituyen un instrumento útil para propósitos de ingeniería, así como para evaluaciones de amenazas y riesgos, a pesar de las limitaciones inherentes aplicadas a los estudios dendrocronológicos (Schraml *et al.*, 2013). Este tipo de análisis puede ser muy provechoso en cuencas no aforadas, aunque la incertidumbre disminuye si se incluyen datos históricos (Ruiz Villanueva *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

La investigación sobre eventos peligrosos detonados por acontecimientos de grandes precipitaciones pluviales apoya la generación de información y conocimiento con bases científicas robustas para minimizar la ocurrencia de desastres. Las técnicas dendrocronológicas permiten identificar las zonas con alto potencial de ocurrencia de estos eventos en zonas montañosas, cuya escasez de datos es muy frecuente.

No obstante, a pesar de las vastas ventajas que ofrecen las técnicas dendrocronológicas para la obtención de datos, características y cronología de eventos, también tienen algunas limitantes como la edad de los árboles vivos encontrados en las áreas de estudio. Esto último se debe a que tanto las inundaciones como los PRM son procesos destructivos capaces de eliminar toda evidencia.

La mayor parte de los trabajos revisados ignora la asociación de fenómenos meteorológicos a las causas de eventos provocados por grandes precipitaciones y acontecimientos peligrosos, así como la integración de estos estudios en los sistemas de alerta temprana, por lo que es una línea de trabajo abierta y necesaria por desarrollar.

REFERENCIAS

- Ballestero Cánovas, J. A., Stoffel, M., St George, S., y Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, 39 (6), pp. 794-816. <https://doi.org/10.1177/0309133315608758>
- Bobrowsky, P., y Highland, L. (2012). The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides A Landmark Publication for Landslide Education and Preparedness. In K. Sassa, B. Rouhban, S. Briceño, M. McSaveney, & B. He (Eds.), *Landslides: Global Risk Preparedness*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6>

- Böhner, J., y Bechtel, B. (2017). GIS in Climatology and Meteorology. *Comprehensive Geographic Information Systems*, 3, pp. 196-235. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09633-0>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., y Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, pp. 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62 (1-2), pp. 23-27. <https://doi.org/10.1080/04353676.1980.11879996>
- Camarero, J. J., y Ortega-Martínez, M. (2021). Tree growth in the aftermath of A flood: A tree-ring based reconstruction of the impacts of the 1996-Biescas catastrophe. *Dendrochronologia*, 65, 125783. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125783>
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board*, 247, pp. 36-75.
- Díez Herrero, A., Ballesteros Cánova, J. A., Ruiz Villanueva, V., y Bodoque, J. M. (2013). A review of dendrogeomorphological research applied to flood risk analysis in Spain. *Geomorphology*, 196, pp. 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.028>
- Díez Herrero, A., Huerta, L. L., y Llorente Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Finlay, P. J., Fell, R., y Maguire, P. K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (6), pp. 811-824. <https://doi.org/10.1139/t97-047>
- Garrote, J., Díez-Herrero, A., Génova, M., Bodoque, J., Perucha, M., y Mayer, P. (2018). Improving Flood Maps in Ungauged Fluvial Basins with Dendrogeomorphological Data. An Example from the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). *Geosciences*, 8 (8), pp. 300. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080300>
- Granados Sánchez, D., Hernández García, M. Á., y López-Ríos, G. (2006). Riparian Zones Ecology. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 12 (1), pp. 55-59.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., y Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98 (3-4), pp. 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Haque, U., Blum, P., da Silva, P. F., Andersen, P., Pilz, J., Chalov, S. R., Malet, J. P., Auflič, M. J., Andres, N., Poyiadji, E., Lamas, P. C., Zhang, W., Peshevski, I., Pértursson, H. G., Kurt, T., Dobrev, N., García-Davalillo, J. C., Halkia, M., Ferri, S., Keellings, D. (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslides*, 13 (6), pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3>

- Hong, Y., Adler, R., y Huffman, G. (2006). Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 33 (22), L22402. <https://doi.org/10.1029/2006GL028010>
- IPCC. (2021). *Assessment Report 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kaennel, M., y Schweingruber, F. H. (1995). *Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL, FNP.
- Kirschbaum, D., Adler, R., Adler, D., Peter-Lidard, C., & Huffman, G. (2012). Global Distribution of Extreme Precipitation and High-Impact Landslides in 2010 Relative to Previous Years. *Journal of Hydrometeorology. American Meteorological Society*, 13, pp. 1536-1551. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-02.1>
- Larsen, M. C., y Simon, A. (1993). A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler, Series A*, 75 A (1-2), pp. 13-23. <https://doi.org/10.1080/04353676.1993.11880379>
- Melchiorre, C., y Frattini, P. (2012). Modelling probability of rainfall-induced shallow landslides in a changing climate, Otta, Central Norway. *Climatic Change*, 113 (2), pp. 413-436. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0325-0>
- Merz, R., y Blöschl, G. (2003). A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, 39 (12), pp. 1-20. <https://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- Pasculli, A., Cinosi, J., Turconi, L., y Sciarra, N. (2021). Learning Case Study of a Shallow-Water Model to Assess an Early-Warning System for Fast Alpine Muddy-Debris-Flow. *Water*, 13 (6), pp. 1-31.
- Peres, D. J., Cancelliere, A., Greco, R., y Bogaard, T. A. (2018). Influence of uncertain identification of triggering rainfall on the assessment of landslide early warning thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (2), pp. 633-646. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-633-2018>
- Planos, E., Limia, M., Vega, R., Boudet, D., y Hernández, M. (2011). Las grandes precipitaciones en Cuba: Causas y características. *Programa Ramal "Análisis y Pronóstico Del Tiempo y El Clima Terrestre y Espacial" Proyecto 0801*, 73.
- Ruiz Villanueva, V., Allen, S., Arora, M., Goel, N. K., y Stoffel, M. (2017). Recent catastrophic landslide lake outburst floods in the Himalayan mountain range. *Progress in Physical Geography*, 41 (1), pp. 3-28. <https://doi.org/10.1177/0309133316658614>
- Ruiz Villanueva, V., Díez Herrero, A., Bodoque, J. M., Ballesteros Cánovas, J. A., y Stoffel, M. (2013). Characterisation of flash floods in small ungauged mountain basins of Central Spain using an integrated approach. *CATENA*, 110, pp. 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.015>

- Schraml, K., Kogelnig, B., Scheidl, C., Stoffel, M., y Kaitna, R. (2013). Estimation of debris flood magnitudes based on dendrogeomorphic data and semi-empirical relationships. *Geomorphology*, 201, pp. 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.009>
- 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., y Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (A Special, pp. 109-230). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological Analysis of Mass Movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9 (2), pp. 168-185. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0)
- Šilhán, K. (2015). Frequency, predisposition, and triggers of floods in flysch Carpathians: Regional study using dendrogeomorphic methods. *Geomorphology*, 234, pp. 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.041>
- Šilhán, K. (2020). Dendrogeomorphology of landslides: principles, results and perspectives. *Landslides*, pp. 2421-2441. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01397-4>
- Šilhán, K., y Stoffel, M. (2015). Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology*, 236, pp. 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.003>
- Stoffel, M., y Bollschweiler, M. (2009). Tree-ring reconstruction of past debris flows based on a small number of samples-possibilities and limitations. *Landslides*, 6 (3), pp. 225-230. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0165-4>
- WMO/UNESCO. (2012). International Hydrological Glossary. In WMO-*N*°385. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- Zeng, T., Wang, L., Li, X., Song, L., Zhang, X., Zhou, J., Gao, B., y Liu, R. (2020). A new and simplified approach for estimating the daily river discharge of the Tibetan Plateau using satellite precipitation: An initial study on the upper Brahmaputra river. *Remote Sensing*, 12 (13). <https://doi.org/10.3390/rs12132103>

La presente edición de
*La red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos
y la atención de los problemas nacionales estratégicos*
de Enrique González Sosa y Luis Felipe Pineda Martínez
fue maquetada en el Despacho de Publicaciones
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro
por Cristian Emanuel Tovar Navarro.
El cuidado de la edición estuvo a cargo
de Soid Lazlo Ruiz Ramírez.
Santiago de Querétaro, Qro., 08 de diciembre de 2023.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



INGENIERÍA Y SOCIEDAD
FACULTAD DE INGENIERÍA

