

LA ACTIVIDAD CICLÓNICA TROPICAL EN MÉXICO: PELIGROS Y RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS ASOCIADOS

Dra. Christian Domínguez Sarmiento

COLECCIÓN
RIESGO Y SOCIEDAD
VOLUMEN 1



SD SECRETARÍA DE
DESARROLLO
INSTITUCIONAL



**LA ACTIVIDAD
CICLÓNICA TROPICAL
EN MÉXICO:
PELIGROS Y RIESGOS
HIDROMETEOROLÓGICOS
ASOCIADOS**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Enrique Luis Graue Wiechers
Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General

Dra. Patricia Dolores Dávila Aranda
Secretaria de Desarrollo Institucional

Dra. Naxhelli Ruiz Rivera
Coordinadora del Seminario Universitario de Riesgos Socio-Ambientales

Mtra. Laura Sánchez de Jesús
Secretaria Técnica del Seminario Universitario de Riesgos Socio-Ambientales

COLECCIÓN RIESGO Y SOCIEDAD | VOLUMEN 1

LA ACTIVIDAD CICLÓNICA TROPICAL EN MÉXICO: PELIGROS Y RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS ASOCIADOS

Dra. Christian Domínguez Sarmiento

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático



Universidad Nacional Autónoma de México
2022

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Domínguez, Christian, autor.

Título: La actividad ciclónica tropical en México : peligros y riesgos hidrometeorológicos asociados / Christian Domínguez Sarmiento.

Descripción: Primera edición. | CDMX, México : Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Desarrollo Institucional, 2022. | Serie: Colección Riesgo y Sociedad ; volumen 1.

Identificadores: LIBRUNAM 2173516 (libro electrónico) | ISBN 9786073066679 (libro electrónico). | ISBN 9786073068451 (libro electrónico).

Temas: Ciclones -- México. | Huracanes -- México. | Desastres naturales -- Prevención -- México. | Sistemas de alerta de huracanes. | Meteorología tropical.

Clasificación: LCC QC934.5.M6 (libro electrónico) | DDC 551.553--dc23

- AVISO LEGAL -

La actividad ciclónica tropical en México: peligros y riesgos hidrometeorológicos asociados

Esta edición de un ejemplar (2.4 Mb) fue preparada por la Secretaría de Desarrollo Institucional.

Primera edición electrónica en formato PDF: 30 de noviembre de 2022.

D.R. © 2022

Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CDMX,
México | www.unam.mx

Secretaría de Desarrollo Institucional
www.sdi.unam.mx

Seminario Universitario de Riesgos Socio-Ambientales | sursa.sdi.unam.mx

Coordinación editorial: Naxhelli Ruiz Rivera
y Laura Sánchez de Jesús
Corrección de estilo: Mario Alberto Islas Flores
Diseño editorial: Zazilha Lotz Cruz García
Edición digital: Luis Josue Rueda Rojas

Imagen de cubierta: «Hurricane Alex»,
earthobservatory.nasa.gov

Esta edición y sus características son propiedad de la UNAM.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

La publicación presenta los resultados de una investigación científica que contó con dictaminaciones doble ciego de expertos externos, con un resultado positivo, y con la aprobación del Comité Editorial de la Secretaría de Desarrollo Institucional, el cual garantiza la calidad académica de la obra, de acuerdo con sus normas editoriales. Los contenidos de la obra fueron analizados con software de similitudes, por lo que cumplen plenamente con los estándares científicos de integridad académica.

El proyecto fue financiado por la Secretaría de Desarrollo Institucional a través del Seminario Universitario de Riesgos Socio-Ambientales.

ISBN (colección): 978-607-30-6666-2
ISBN (libro digital PDF): 978-607-30-6845-1
DOI: 10.22201/sdi.9786073068451e.2022

Hecho en México

CONTENIDO

1. Los ciclones tropicales y la escala Saffir-Simpson.....	7
2. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la actividad ciclónica tropical en México.....	13
3. Vulnerabilidad, riesgo hidrometeorológico y desastres.....	21
4. Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT): propuestas para mejorar la peligrosidad y la comunicación del riesgo.....	35
Referencias.....	39

1. LOS CICLONES TROPICALES Y LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON

El tiempo meteorológico, que está determinado por el comportamiento de variables atmosféricas como temperatura, precipitación, presión y viento en un momento dado, es muy cambiante en México. Algunos días son soleados y sin lluvia, mientras que otros son bastante nublados y con mucha lluvia en todo el país. Los fenómenos meteorológicos que afectan al territorio durante la temporada de lluvias son los ciclones tropicales, las ondas del este, las bajas presiones y la zona de convergencia intertropical.

Los ciclones tropicales ocurren generalmente entre mayo y noviembre, tanto en el océano Atlántico del norte como en el océano Pacífico del este, porque durante estos meses la temperatura superficial del mar supera los 26 °C. Los ciclones tropicales son famosos por los vientos destructivos y las lluvias torrenciales que pueden ocasionar sobre la parte continental, y son considerados fenómenos naturales tan devastadores como los sismos (Hsiang y Camargo, 2016). Estos sistemas meteorológicos se caracterizan por presentar una circulación cerrada que gira contra las manecillas del reloj (conocida como circulación ciclónica) e inicia en la superficie, donde los vientos asociados a la circulación del ciclón tropical convergen hacia su centro, conocido como el ojo del ciclón tropical (Domínguez et al., 2019). Esta circulación del ciclón tropical se extiende verticalmente y produce divergencia (separación de los vientos horizontales) desde los 6 hasta los 18-20 km de altura.

La escala Saffir-Simpson fue creada en Estados Unidos en 1971 por el ingeniero civil Herbert Saffir y el entonces director del Centro Nacional de Huracanes, Robert Simpson (Iacovelli, 1991), con la finalidad de establecer una métrica que relacionara los vientos superficiales del ciclón tropical con los daños

ocasionados a la infraestructura. Esta escala sirve para clasificar los ciclones tropicales en depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes de categorías 1 a 5 (Organización Meteorológica Mundial [OMM], s. f.).

Es interesante mencionar que esta escala define los ciclones tropicales como una familia grande de sistemas atmosféricos con un núcleo caliente (temperaturas cálidas en el centro del sistema) y cuyos vientos en superficie van desde los 63 km/h hasta llegar a superar los 252 km/h (tabla 1). Sin embargo, la escala Saffir-Simpson no considera otros peligros asociados a la circulación del ciclón tropical, por ejemplo, las lluvias torrenciales, los deslizamientos y las inundaciones ocasionadas por desbordamientos de ríos y presas. Aunado a esto, la categoría del ciclón tropical no está asociada a la cantidad de lluvia posible. Por ejemplo, un huracán categoría 1 podría producir más lluvia que uno categoría 3. Esta diferencia en la cantidad de lluvia producida está relacionada con varios factores ambientales: el tamaño del ciclón tropical, su velocidad de traslación (velocidad que tiene el ciclón para llegar de una ubicación a otra), la temperatura de la superficie del mar, la humedad del ambiente, la orografía, el tipo de suelo, entre otros.

Tabla 1. Escala Saffir-Simpson para clasificar ciclones tropicales

Ciclón tropical	Vientos máximos sostenidos a 10 m sobre la superficie (km/h)
Depresión tropical	<63
Tormenta tropical	64-118
Huracán categoría 1	119-153
Huracán categoría 2	154-177
Huracán categoría 3	178-208
Huracán categoría 4	209-251
Huracán categoría 5	252 o más

Fuente: OMM, s. f.

Los ciclones tropicales se forman sobre el océano y se considera que tocan tierra cuando el ojo del sistema está sobre la parte continental. En México, los

ciclones tropicales han tocado tierra con diferentes categorías a lo largo de sus costas (figura 1). Resulta interesante notar que la península de Yucatán y la de Baja California, regiones geográficas con topografía plana (representada por el color verde en la figura 1), han sido afectadas con mayor frecuencia por huracanes categoría 3, por lo que enfrentan el peligro de vientos intensos y oleaje extremo.

La situación es distinta para el resto de las costas mexicanas, donde se localizan la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, ya que estas costas han sido más perjudicadas por depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes menores (categorías 1 y 2), con lo que enfrentan peligros diferentes a los vientos intensos. Las sierras madres sirven como barreras naturales que evitan la intensificación de los vientos de los ciclones tropicales una vez que están tierra adentro. Lo anterior se debe a que la fricción con las montañas provoca que la circulación del ciclón tienda a desorganizarse; sin embargo, los peligros no desaparecen con los vientos, aún existen y están relacionados con las lluvias torrenciales y, en consecuencia, con los deslizamientos de laderas (provocados por la saturación del suelo debido a las lluvias extremas), inundaciones y desbordamientos tanto de ríos como de presas.

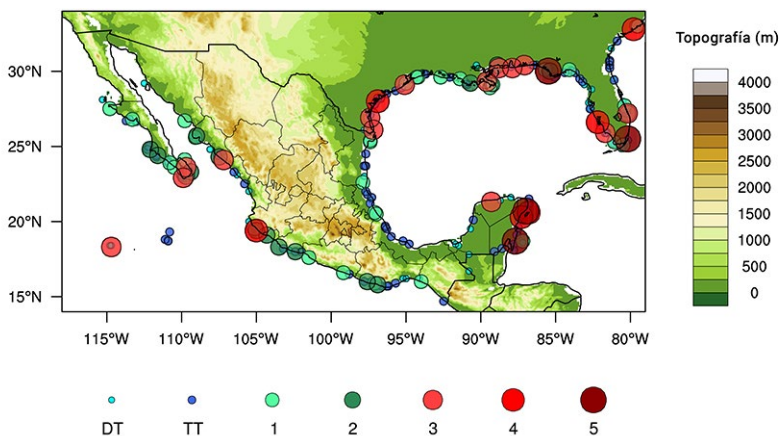


Figura 1. Ciclones tropicales que han tocado tierra en las costas mexicanas, 1980-2018

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos HURDAT (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.; <https://www.nhc.noaa.gov/data/>).

La cantidad de lluvia que produce un ciclón tropical es uno de los principales peligros asociados a estos sistemas y, por ello, es trascendental determinar las causas por las que estos fenómenos naturales precipiten de manera abundante sobre México. Hasta ahora, se sabe que la lluvia de un ciclón tropical también depende de su etapa de madurez, porque un ciclón que tiene una circulación bien definida tardará más en desintegrarse cuando toque tierra en comparación con un ciclón tropical que apenas se formó y está desorganizado al momento de tocar tierra (Ooyama, 1982). Asimismo, existen casos en los cuales las tormentas tropicales y los huracanes que han afectado a México se han intensificado unas horas antes de tocar tierra. Esta intensificación repentina se debe a que la fricción entre sus vientos y la superficie terrestre aumenta drásticamente cuando se aproximan a las costas, lo cual ocasiona que sus vientos se aceleren cerca del centro de su circulación y así logran intensificarse momentos antes de tocar tierra (Emanuel, 2005).

Además, la lluvia asociada al paso de los ciclones tropicales se ve favorecida por la presencia de las sierras madres en México, ya que las montañas ayudan a que los vientos y las masas de aire húmedo de la tormenta asciendan de manera forzada y se produzcan lluvias torrenciales al momento de tocar tierra (Emanuel, 2005). Sin embargo, una vez que el ciclón tropical se va desplazando tierra adentro, la ausencia de humedad sobre el continente lo debilita, ya que la superficie no proporciona una cantidad adecuada de humedad a la organización del ciclón. Los movimientos ascendentes del ciclón tropical se debilitan y si el suelo está seco, disminuye también la lluvia del ciclón después de que tocó tierra. Los ciclones tropicales producen mucha más lluvia sobre el océano que sobre el continente porque el primero siempre les proporciona la humedad y el calor que necesitan para seguir evolucionando.

En el caso contrario, cuando el suelo está muy húmedo (un ejemplo son los pantanos y manglares), la humedad que fluye hacia la circulación del ciclón tropical se incrementa y, en consecuencia, este producirá mucha lluvia sobre la parte continental (Emanuel, 2005). Las cuencas hidrológicas también pueden proporcionar la humedad requerida para que el ciclón tropical siga produciendo lluvia (Braun, 2006). Otro aspecto interesante a considerar es que, aunque el terreno sea plano o seco, los ciclones tropicales pueden producir mucha

lluvia sobre la parte continental si interactúan con sistemas frontales, puesto que la humedad de estos sistemas puede ser suficiente para que los ciclones tropicales sobrevivan.

Aparte de la falta de humedad como un factor ambiental para debilitar un ciclón tropical, otros determinantes para el debilitamiento son la presencia de fuertes vientos en superficie y a 10-12 km (conocido como cizalladura ambiental), la interacción con aguas relativamente frías, cuya temperatura es menor a 26 °C y el desplazamiento lento o nulo sobre una ubicación en el océano que favorezca el afloramiento hacia la superficie de aguas frías, es decir, un movimiento semiestacionario que no cambie en el tiempo (Corral et al., 2010). Una vez que los ciclones tropicales tocan tierra y siguen avanzando sobre el país, tienden a debilitarse en su categoría, pero es posible que no disminuyan sus lluvias por las razones mencionadas.

2. EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) Y LA ACTIVIDAD CICLÓNICA TROPICAL EN MÉXICO

El clima y el tiempo meteorológico son dos conceptos diferentes aunque suelen emplearse de manera incorrecta en la comunicación diaria sobre el estado del tiempo. El clima es el promedio de los registros de la temperatura y la precipitación de por lo menos treinta años en un sitio determinado. El clima varía según la latitud y altitud, por ejemplo, la temperatura de la superficie terrestre es diferente entre los trópicos y los polos.

Cierta parte del territorio mexicano se encuentra en los trópicos (23.5° S-23.5° N), por lo que se ve afectado por sistemas tropicales, como los ciclones tropicales y las ondas del este, además de por sistemas que se originan en las latitudes medias (30°-60° N), como los frentes fríos, que traen masas de aire frío a México desde mediados de septiembre hasta mayo del siguiente año. Las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), ocasionadas por la inclinación del eje de rotación terrestre y el movimiento de traslación de la Tierra, determinan la temperatura y precipitación que se espera en el país.

Por ejemplo, en la Ciudad de México, gran parte de la lluvia ocurre normalmente durante los meses de mayo a octubre; sin embargo, el clima también cambia año con año, ya que algunos veranos pueden ser más húmedos que otros porque llueve más, o bien podría ser que algunos inviernos sean más cálidos en comparación con otros porque se alcanzan temperaturas más altas en promedio. Lo anterior se conoce como variabilidad climática. El clima puede mudar de un año a otro debido a cambios en la circulación global del planeta. Existen oscilaciones climáticas que pueden modificar el clima global; es decir,

cambiar el comportamiento de los vientos y la humedad en todo el planeta en cuestión de meses. Por eso es importante estudiar sus efectos.

El ejemplo por excelencia de una oscilación climática es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), aunque existen muchas más. En esta oscilación, la atmósfera y el océano desempeñan un papel trascendental para cambiar el clima, pues existe una comunicación entre ellos. Las fases de esta oscilación se definen utilizando las temperaturas de la superficie del mar en el océano Pacífico tropical (5°N-5°S). Por ejemplo, la fase fría, conocida como La Niña, está representada por anomalías negativas en las temperaturas de la superficie del mar menores a -0.5 °C; es decir, temperaturas más frías que su promedio climatológico. Las condiciones neutrales están representadas por cambios en las temperaturas de la superficie del mar que varían de 0.5 °C a -0.5 °C. Por último, la fase cálida, conocida como El Niño, está representada por anomalías positivas en las temperaturas de la superficie del mar mayores a 0.5 °C en el océano Pacífico tropical (Huang et al., 2016). Es preciso que una anomalía dure por varios meses para que sea catalogada como una fase del ENOS. La máxima intensidad de El Niño o La Niña ocurre en invierno del hemisferio norte; es decir, al final del año, y puede continuar hasta el verano del siguiente año (Farfán et al., 2021).

El ENOS es el principal impulsor del cambio en el clima —de manera natural— de todo el continente americano. Esta oscilación puede hacer que varíe el comportamiento de las lluvias, incluso de la precipitación extrema considerada como un peligro hidrometeorológico, y de las temperaturas en la superficie terrestre. Durante El Niño, las lluvias en el centro-sur de México tienden a disminuir durante los meses de mayo hasta noviembre, debido a que pocos ciclones tropicales provenientes del Golfo de México y del mar Caribe afectan al país; asimismo, no existen las condiciones ambientales para que se desarrollen nubes que produzcan lluvias extremas (figura 2a) y que, por lo general, alcanzan alturas de más de 10-12 km desde la superficie. Con ello se espera que existan menos días con lluvias extremas y disminuya este peligro hidrometeorológico en gran parte del país (figura 2c); sin embargo, en invierno (diciembre-enero-febrero) se espera que ocurran más lluvias y temperaturas frías en el norte del país, porque más frentes fríos afectan esta región en comparación con la precipitación y la temperatura promedio que ocurren durante esta estación (Magaña et al., 2003).

La marca del ENOS en el clima es completamente diferente en condiciones de La Niña (Sun et al., 2015). Durante el verano existen las condiciones ambientales para que se desarrollen las nubes y se incremente el número de ciclones tropicales que se forman tanto en el mar Caribe como en el este del océano Atlántico, lo que produce mucha lluvia en el centro-sur e incluso en el noreste del país (figura 2g; 2i). Así, la peligrosidad del número de días de lluvia extrema aumenta durante esta fase del ENOS; sin embargo, durante el invierno el norte de México tiende a secarse y las temperaturas son relativamente más cálidas, en particular porque menos frentes fríos afectan esta región (Magaña et al., 2003; Wang y Enfield, 2003). En condiciones neutrales no existe ninguna señal clara del ENOS en el clima de manera general, como puede apreciarse en las figuras 2d-f.

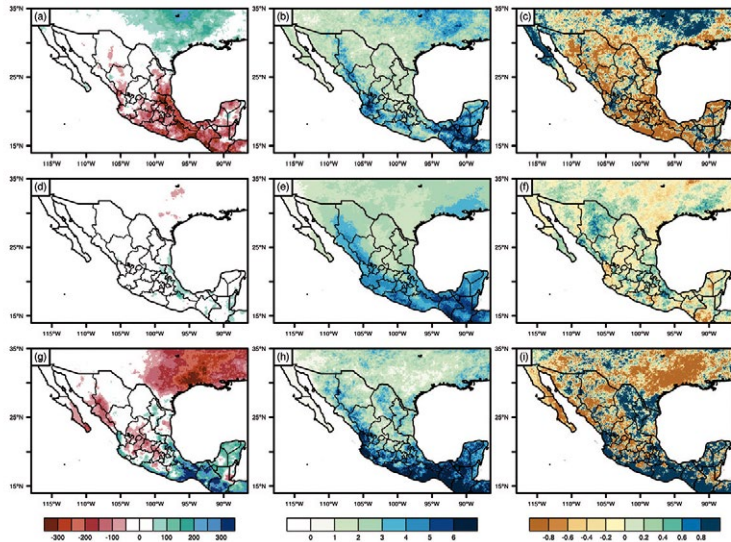


Figura 2. Anomalías en la precipitación acumulada desde mayo hasta noviembre (mm) para: a) años con presencia de El Niño, d) años con condiciones neutrales, g) años con La Niña; número promedio de días con precipitación extrema para: b) años El Niño, e) años con condiciones neutrales, h) años con La Niña; y anomalías promedio de los días con precipitación extrema para: c) años con El Niño, f) años con condiciones neutrales, i) años con La Niña durante el periodo 1981-2017.

Fuente: Domínguez et al., 2021.

El ENOS también modula la actividad de los ciclones tropicales en términos de sus trayectorias y tiempos de vida (Kossin et al., 2010; Camargo et al., 2008). Durante El Niño se espera una actividad ciclónica tropical menor al promedio anual (14 ciclones tropicales) en el océano Atlántico (Camargo et al., 2007) (figura 3a; 3b); sin embargo, se pueden formar más ciclones tropicales cercanos a las costas del Pacífico mexicano con un tiempo de vida largo (por lo menos siete días), y una vez formados, podrían moverse hasta la mitad del océano Pacífico, cerca de Hawái (Camargo et al., 2008; Domínguez y Magaña, 2018) y convertirse en huracanes intensos (categoría 3, 4 o 5) durante su trayectoria. Las bandas nubosas de estos ciclones tropicales pueden afectar los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

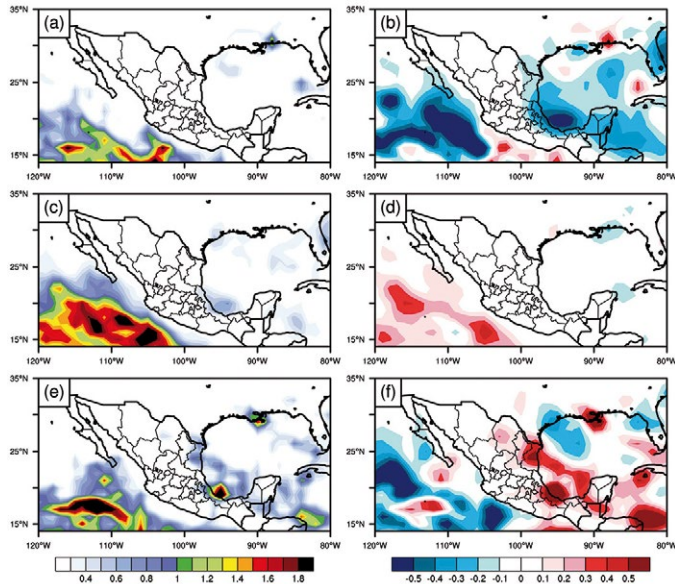


Figura 3. Promedio anual de la densidad de ciclones tropicales, calculada como el número de ciclones tropicales en un área de $1^\circ \times 1^\circ$, para: a) años El Niño, c) años con condiciones neutrales, e) años La Niña; anomalías de la densidad de ciclones tropicales para: b) años El Niño, d) años con condiciones neutrales, f) años La Niña durante el periodo 1981-2017.

Fuente: Domínguez et al., 2021.

En condiciones neutras se espera que se formen más ciclones tropicales en el océano Pacífico del este y que su trayectoria sea cercana a las costas occidentales del país (figura 3c, 3d). Durante La Niña se espera que disminuya la actividad ciclónica tropical en el océano Pacífico (figura 3f), pero que se formen más ciclones tropicales en el mar Caribe o en el oeste del océano Atlántico. Varios ciclones tropicales provenientes de esta cuenca pueden seguir una trayectoria recta hasta tocar tierra en el noreste de México (figura 3e; 3f); sin embargo, este tipo de trayectorias no ocurre durante El Niño en el océano Atlántico (Domínguez y Magaña, 2018). Por lo tanto, el ENOS puede modular la formación y la trayectoria de los ciclones tropicales en las dos cuencas oceánicas que afectan a México, y así modula indirectamente la lluvia en ciertas regiones del país (Domínguez et al., 2021b).

Los ciclones tropicales tienen efectos positivos y negativos en México. En cuanto a los efectos positivos, los ciclones tropicales desempeñan un papel fundamental en el ciclo hidrológico de las regiones áridas y semiáridas del país porque contribuyen con hasta 60% de la precipitación acumulada de mayo a noviembre. Cuando estas regiones se encuentran en condiciones de sequía, los ciclones tropicales pueden llenar los embalses, ríos y lagos, así como ayudar a la recuperación de los niveles de las presas (Domínguez y Magaña, 2018; Sisto et al., 2016). Sin embargo, como parte de los efectos negativos y su peligrosidad, estos sistemas producen lluvias torrenciales que pueden provocar daños a la infraestructura local y a las viviendas (Cenapred, 2019a).

Las afectaciones locales pueden variar, incluyen pérdidas económicas mínimas o cuantiosas y dependen principalmente de la infraestructura, las condiciones socioeconómicas de la población, el desarrollo económico de la región y las estrategias locales (Banco Mundial, 2018). Por ejemplo, dos ciudades costeras mexicanas ubicadas en diferentes estados pueden experimentar simultáneamente vientos intensos e inundaciones repentinas producidas por el oleaje y las lluvias torrenciales asociadas al paso del ciclón tropical; no obstante, los daños y los tiempos de recuperación de ambas ciudades serán diferentes (Caetano et al., 2017; Holland et al., 2019).

De acuerdo con lo anterior, el sistema ENOS puede determinar cuáles regiones de México recibirán más (o menos) lluvia asociada con ciclones tropicales

en función de su fase (Domínguez et al., 2021b). Durante la fase de El Niño, la temporada ciclónica (que inicia en mayo y termina en noviembre) es más activa en las costas del suroeste de México ubicadas en el Pacífico mexicano. De tal forma, se presentarán más lluvias y días extremos de lluvia relacionados con los ciclones tropicales en los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, en comparación con el promedio climatológico de días de lluvia extrema debida a ciclones tropicales durante estos meses para el periodo 1981-2017 (figura 4a-c).¹

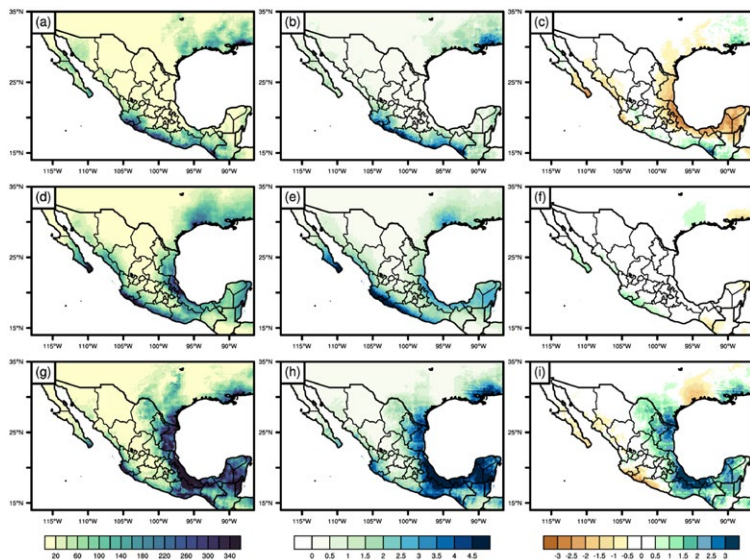


Figura 4. Precipitación acumulada promedio de ciclones tropicales desde mayo hasta noviembre (mm) para: a) años El Niño, d) años con condiciones neutrales, g) años La Niña; número promedio de días en que los ciclones tropicales produjeron precipitaciones extremas para: b) El Niño, e) condiciones neutrales, h) años La Niña; y anomalías promedio de días de ciclones tropicales para: c) años El Niño, f) años con condiciones neutrales, i) años La Niña durante el periodo 1981-2017.

Fuente: Domínguez et al., 2021.

¹ Es interesante mencionar que aun cuando la actividad ciclónica tropical produce más días de lluvia extrema debida a ciclones tropicales en estos estados, las anomalías de la precipitación acumulada desde mayo a noviembre son negativas, como ya se mencionó (figura 2a).

La situación es diferente para los otros estados del centro-sur del país. Durante las condiciones neutrales, existe una pequeña señal en las costas del Pacífico mexicano; es decir, los ciclones tropicales tienden a presentar trayectorias paralelas a la costa y más cercanas al territorio mexicano, lo que produce más días con lluvia extrema en comparación con el promedio climatológico de días de lluvia extrema debida a ciclones tropicales (figura 4d-f). Durante la fase de La Niña, la temporada ciclónica es muy activa en el Golfo de México y el mar Caribe, como se discutió previamente. Se esperarán más lluvias torrenciales y días con lluvia extrema en los estados de la vertiente del Golfo de México y la península de Yucatán (figura 4g-i).

El ENOS, una oscilación climática, puede producir variaciones en la peligrosidad de los ciclones tropicales respecto tanto a su categoría como a su precipitación en una escala estacional; es decir, en una escala de varios meses. En resumen, el ENOS puede proporcionar información sobre el comportamiento estacional de los ciclones tropicales con meses de anticipación y dar una idea sobre qué esperar para las diferentes regiones de México dependiendo de su fase. Es importante mencionar que esta relación del ENOS con la actividad ciclónica no debe ser entendida como el comportamiento de un solo ciclón, sino como el comportamiento colectivo de los ciclones tropicales que ocurran durante una temporada.

3. VULNERABILIDAD, RIESGO HIDROMETEOROLÓGICO Y DESASTRES

La vulnerabilidad se puede definir como las condiciones sociales, económicas y físicas que determinan la susceptibilidad de las comunidades a experimentar los efectos de las amenazas de algún fenómeno perturbador, ya sea natural o antrópico (UNISDR, 2017). Algunos ejemplos de vulnerabilidad son el grado o nivel de fragilidad en la vivienda, de organización social, de preparación para enfrentar amenazas y de marginación social, así como las condiciones socioeconómicas de la sociedad, el desarrollo político-institucional y el rezago social (Alcántara-Ayala, 2019b). Estas variables sociales determinan la medida en que las comunidades están preparadas para enfrentar uno o varios peligros de manera simultánea.

No existe una metodología única para definir la vulnerabilidad porque depende de cómo se responde la pregunta ¿a qué somos vulnerables?, y la respuesta puede variar en función de la amenaza; es decir, sismos, deslizamientos de laderas, ciclones tropicales, inundaciones, sequías, entre otros. Por lo tanto, existen varios métodos para estimar su magnitud y distribución espacial. Por lo regular se utilizan datos sociales cuantificados por el Gobierno mediante los censos que se realizan cada diez años (Domínguez et al., 2021b).

En cuanto al riesgo, se define como el grado de pérdida de vidas o bienes materiales dañados que ocurren en una sociedad o en una comunidad durante un periodo determinado. Se determina probabilísticamente en función de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad de una sociedad o comunidad ante la ocurrencia de un evento dado (Aven, 2016). Por ello, considerando la variación de las amenazas que ocurren en una escala climática (varios meses del año),

el riesgo climático puede definirse como una interacción entre las variables atmosféricas y las condiciones sociales (Domínguez et al., 2021b).

Si la vulnerabilidad es alta, cualquier amenaza natural puede ocasionar altos riesgos climáticos que se materializarán en impactos económicos y mortalidad. En consecuencia, la conjunción de una alta vulnerabilidad y amenazas naturales conducirá a desastres (Oliver-Smith et al., 2017; Silver et al., 2019). Estos se definen como interrupciones en el funcionamiento de una sociedad en cualquier escala, que ocasionan grandes pérdidas humanas, materiales, económicas y ambientales (UNISDR, 2017). En este sentido, los desastres son la materialización del riesgo y no son naturales: se construyen socialmente porque dependen de la vulnerabilidad (Alcántara-Ayala, 2019a). No es apropiado que los desastres tengan un apellido. Por ejemplo, no es adecuado utilizar términos como desastres volcánicos, geológicos, hidrometeorológicos, etcétera, puesto que los desastres no deben explicarse en términos de amenazas naturales, pues la respuesta social y la organización para enfrentarlos también cumplen un papel trascendental en su determinación (Alcántara-Ayala, 2019b).

Los peligros hidrometeorológicos son los procesos que ocurren en la atmósfera o en la hidrósfera (como los ríos y los océanos) y que pueden causar daños a la infraestructura, la vida humana y el funcionamiento de la sociedad o comunidad (UNISDR, 2017). Los peligros hidrometeorológicos son las sequías, las temperaturas extremas, las tormentas, las inundaciones, los deslizamientos y los incendios forestales. A escala mundial, estos peligros se han asociado con 91 % de los desastres mundiales durante el periodo 2000-2019. Durante este periodo, 97 % de las personas afectadas en todo el mundo sufrieron desastres relacionados con el clima (CRED y UNISDR, 2020). Este tipo de desastres asociados con fenómenos hidrometeorológicos ha aumentado 82.7 % al comparar las estadísticas del periodo 1980-1999 con las del periodo 2000-2019 (figura 5), y representa 78 % del total de pérdidas económicas registradas en el mundo (CRED y UNISDR, 2020).



Figura 5. Desastres, muertes, afectaciones y pérdidas económicas durante los periodos 1980-1999 y 2000-2019

Fuente: CRED y UNISDR, 2020.

Los peligros hidrometeorológicos produjeron 45.5% de todos los desastres en México durante el periodo 1900-2018 (Alcántara-Ayala, 2019b). Los ciclones tropicales son los principales fenómenos naturales que provocan pérdidas económicas de alto impacto. Por ejemplo, los huracanes Manuel e Ingrid, ocurridos en 2013 (categoría 1 y tormenta tropical cuando tocaron tierra, respectivamente), produjeron daños por 4 200 millones de dólares (Alcántara-Ayala, 2019b; Cenapred, 2019a). En promedio, los ciclones tropicales representan 86.5% del costo anual de los desastres en México, y el principal peligro son las lluvias extremas que producen (Cenapred, 2019a). Si bien la intensidad de los vientos de un ciclón tropical es importante para definir los peligros que podrían experimentar las ciudades costeras, la intensidad no guarda una relación clara con las fuertes lluvias que pueden producir los ciclones tropicales (Yu et al., 2017). En México, las depresiones tropicales y las tormentas tropicales pueden causar grandes pérdidas económicas.

El 48.8% de los municipios mexicanos están en condiciones de pobreza, y es ahí donde los desastres ocurren comúnmente. La mayoría de los daños graves y las grandes pérdidas económicas se han registrado en los municipios

del sur de México porque su marginación social es enorme y su desarrollo económico es bajo (Alcántara-Ayala, 2019b). Los desastres en México no solo están vinculados a las fuertes lluvias, sino también al aumento del deterioro de las cuencas hidrológicas, la deforestación de áreas naturales y la degradación ambiental relacionados con la explotación de recursos naturales. Este deterioro hidrológico y ambiental propicia que las comunidades sean más vulnerables física y socialmente a las lluvias intensas (Oliver-Smith et al., 2017; Alcántara-Ayala, 2019b).

La Unesco (2019) propone que es necesario crear sistemas integrados de alerta temprana multirriesgos para reducir los desastres, es decir, que se consideren varias amenazas al mismo tiempo. A su vez, las acciones encaminadas a disminuir los costos de los desastres deben empezar con la identificación de las regiones vulnerables y el desarrollo de políticas públicas para tomar decisiones informadas. El reto más grande es que los actores sociales nacionales y locales deben estar familiarizados con los estudios científicos para que promuevan interacciones entre la ciencia y la política (Claudet et al., 2020). Del mismo modo, la investigación científica debe estudiar, ayudar a comprender y gestionar la reducción del riesgo de desastres de manera adecuada (UNDRR, 2015). Lo anterior es muy importante para reducir también los impactos socioeconómicos de los desastres y la mortalidad.

Domínguez et al. (2021b) encontraron que el ENOS modula en gran medida las trayectorias y los eventos de lluvia extrema asociados al paso de ciclones tropicales y que, en conjunto con una vulnerabilidad alta, se pueden determinar las regiones con una mayor probabilidad de desastres. En dicho estudio, la vulnerabilidad hacia los días con lluvia extrema asociada al paso de ciclones tropicales se define usando dos variables sociales: el grado de marginación local y el rezago social, las cuales se obtienen del portal de la Comisión Nacional de Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2010). El grado de marginación social es una métrica que mide el grado en que las comunidades tienen acceso a la educación, una vivienda adecuada e ingresos laborales medios a altos. Entre más pequeño sea el grado de marginación social, las carencias sociales y la pobreza serán menores (Conapo, 2012). El rezago social es una métrica basada en cuatro carencias sociales: rezago educativo, viviendas de

baja calidad y acceso escaso o nulo a servicios de salud y a servicios básicos. Los valores de esta métrica están dentro de una referencia nacional. Cabe resaltar que el rezago social no es una medida de la pobreza porque no incorpora el ingreso laboral y la seguridad social (Coneval, 2010). Entre más pequeño sea el rezago social, las privaciones sociales de una comunidad serán menores. Domínguez et al. (2021b) combinaron ambas métricas para crear un índice de vulnerabilidad social. Eligieron estas dos variables sociales porque sus valores pueden ayudar a determinar el grado de vulnerabilidad de las regiones afectadas por eventos de lluvia extrema asociada a ciclones tropicales. El grado de marginación local y el rezago social se normalizan utilizando la ecuación (1), porque las dos métricas tienen diferentes magnitudes:

$$(1) \quad X_{normalized} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde X es la variable social y X_{min} y X_{max} son el valor mínimo y máximo de la variable a nivel nacional respectivamente.

Las figuras 6a y 6b muestran el grado de marginación local normalizado en 2000 y 2010 respectivamente. Las diferencias (valor del año 2010 menos el valor del año 2000) muestran que esta variable social ha incrementado su valor hasta en 0.8 en algunas regiones del país (figura 6c). Por el contrario, el rezago social normalizado ha disminuido ligeramente. La vulnerabilidad social se define como un índice obtenido mediante la multiplicación de estas dos variables sociales y se expresa de 0 a 1. Cuando el índice es cero significa no vulnerable; cuando el índice es uno significa altamente vulnerable. Al comparar el índice de vulnerabilidad social de 2010 con el de 2000, se puede observar que en algunas localidades en México ha disminuido y en otras ha aumentado ligeramente (figura 6j). Lo que parecería contrario al interés que han expresado los responsables de la formulación de políticas públicas sobre reducir la vulnerabilidad social y crear medidas de prevención contra los desastres (Alcántara-Ayala, 2019a).

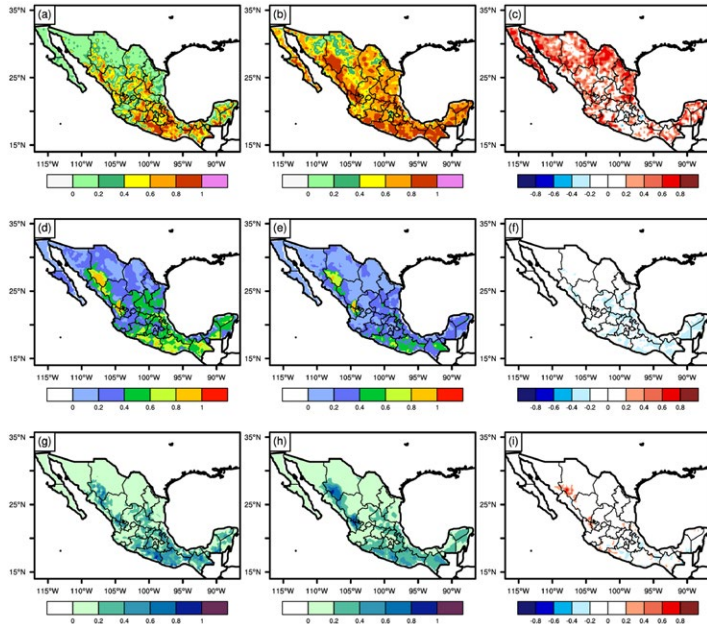


Figura 6. Grado de marginación local normalizado en: a) 2000, b) 2010, y c) su diferencia; rezago social normalizado en: d) 2000, e) 2010, y f) su diferencia; y el índice de vulnerabilidad social en: g) 2000, h) 2010, y i) su diferencia.

Fuente: Domínguez et al., 2021b.

La ecuación para definir el riesgo climático R utiliza la probabilidad de que ocurra una amenaza H expresada con valores entre 0 y 1, multiplicada por el índice de vulnerabilidad social de 2010 V , que también se debe expresar de 0 a 1. Por lo tanto, los valores de riesgo oscilan de 0 a 1, donde 0 significa sin riesgo y 1 significa el riesgo más alto y la inminente ocurrencia de un desastre. Su ecuación está expresada como sigue:

$$(2) \quad R = H \times V$$

La ecuación (2) representa de manera implícita la exposición, porque la vulnerabilidad existe cuando se está expuesto (Neri y Magaña, 2016).

Con la finalidad de estudiar cómo cambia el riesgo climático en diferentes condiciones del ENOS, Domínguez et al. (2021b) promediaron el valor del riesgo climático durante los años en que las fases del ENOS estuvieron activas. Además, calcularon el riesgo climatológico como el promedio del riesgo durante el periodo 1981-2017 con la finalidad de calcular sus anomalías; es decir, determinar dónde aumenta o disminuye el riesgo climático con respecto a su promedio. En ese estudio también se utilizó la base de datos del costo de desastres nombrada EM-DAT, que fue creada por el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (CRED, por sus siglas en inglés) de la Universidad Católica de Lovaina, con la finalidad de explorar cómo podrían cambiar los costos de los desastres dependiendo de la fase del ENOS.

La figura 7a muestra que la región suroeste del país tiene una alta probabilidad de ocurrencia de lluvias extremas asociadas a ciclones tropicales (hasta 0.8) en condiciones El Niño; sin embargo, esta probabilidad disminuye hasta 0.3 durante condiciones La Niña (figura 7g). En condiciones El Niño, algunas zonas del suroeste de México tienen un alto riesgo (calculado usando la ecuación 2) de experimentar desastres, pues sus valores superan 0.5 (figura 7b) y su riesgo climático aumenta en más del 80% (figura 7c). La mayoría de las ciudades del suroeste de México dependen de las actividades turísticas y son altamente vulnerables a las precipitaciones extremas porque el grado de marginación local y el rezago social es mayor que 0.7 (figura 6b; 6e). Por el contrario, el riesgo climático disminuye en más de 80% sobre los estados de la costa este de México en condiciones El Niño (figura 7c) porque disminuye la probabilidad de ocurrencia de lluvias extremas asociadas a ciclones tropicales (figura 7a) (Domínguez et al., 2021b).

En condiciones neutrales, la probabilidad de que ocurran lluvias extremas debido al paso de ciclones tropicales en Baja California Sur supera 0.8 (figura 7d). Esta probabilidad es mayor en condiciones neutrales que durante años El Niño. También se puede observar que el riesgo aumenta 40-60% en las regiones noroeste y centro-oeste (figura 7f). Es interesante notar que el noreste de México sufre una reducción del riesgo climático de hasta 80% (figura 7f) (Domínguez et al., 2021b).

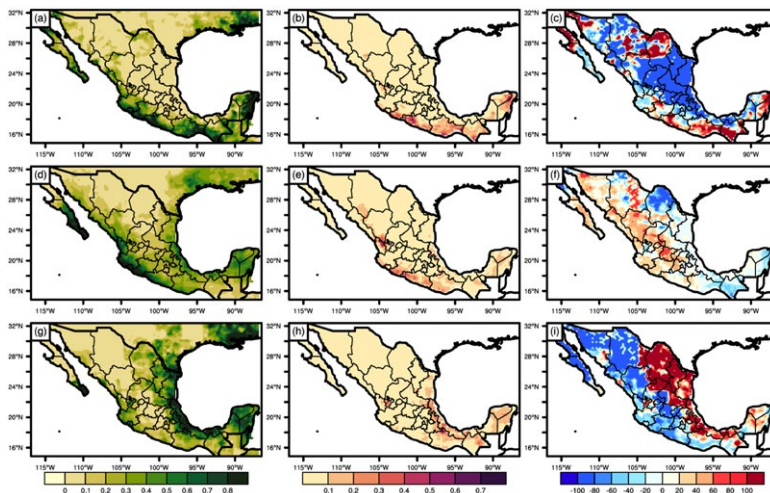


Figura 7. Probabilidad promedio de días con precipitaciones extremas asociadas a la ocurrencia de ciclones tropicales (peligrosidad) para: a) El Niño, d) condiciones neutrales, g) La Niña; riesgo climático promedio para: b) El Niño, e) condiciones neutrales, h) La Niña; y anomalías promedio del riesgo climático (%) durante: c) El Niño, f) condiciones neutrales, y i) La Niña.

Fuente: Domínguez et al., 2021b.

Por otra parte, en la costa oriental de México la probabilidad de que ocurran lluvias extremas asociadas al paso de ciclones tropicales es más de 0.6 en condiciones La Niña (figura 7g). Aunque esta región tiene valores moderados de riesgo, que van de 0.2 a 0.5, las anomalías en el riesgo climático muestran que, bajo condiciones La Niña, este aumenta más de 80%, es decir, que los desastres tienen mayor probabilidad de ocurrir.

Los impactos socioeconómicos para cada fase de ENOS se definen como el costo medio de los desastres (en dólares americanos) ocurridos durante años en los que la fase está activa. Estos impactos contemplan todos los peligros asociados a los ciclones tropicales: lluvias extremas, vientos intensos, deslizamientos de laderas y desbordamientos de ríos y presas. Durante los años El Niño, el 18.8% de todos los estados mexicanos sufrieron costosos desastres hasta acumular en promedio 335 millones de dólares en impactos socioeconómicos.

La base de datos EM-DAT muestra que las pérdidas económicas en el suroeste del país son de hasta 60 millones de dólares en promedio bajo esta fase del ENOS (figura 8a). En condiciones neutrales, 37.5% de todos los estados se vieron afectados económicamente por desastres; en promedio se acumularon 1023 millones de dólares en pérdidas. De manera específica, la costa occidental de México experimentó pérdidas de hasta 100 millones de dólares (figura 8b). Durante los años La Niña, 28.1% de los estados mexicanos reportaron pérdidas económicas, siendo los más afectados los estados de la costa este, puesto que registraron 2075 millones de dólares en impactos socioeconómicos (figura 8c). El país sufre más desastres durante la fase La Niña debido a la presencia de más ciclones tropicales en el Golfo de México. En consecuencia, los estados de la costa este experimentan más lluvias torrenciales que, combinadas con su vulnerabilidad local, producen más desastres.

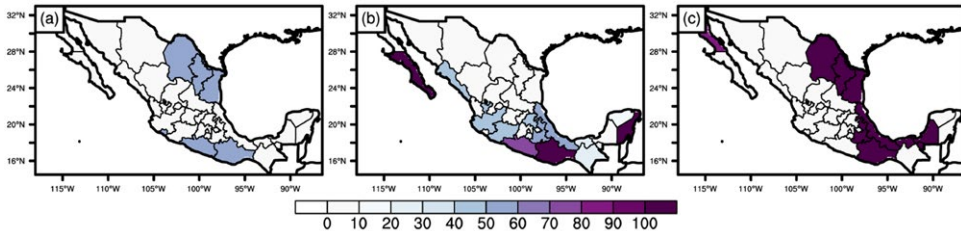


Figura 8. Costos promedio de los desastres en millones de dólares americanos por estado con base en EM-DAT para: a) El Niño, b) condiciones neutrales, y c) La Niña.

Fuente: Domínguez et al., 2021b.

El comportamiento del costo promedio de los desastres (figura 8) es muy parecido al comportamiento espacial de las anomalías de riesgo climático (figura 7), las cuales fueron calculadas utilizando la peligrosidad como la probabilidad de días de lluvia extrema asociada a ciclones tropicales bajo diferentes condiciones del ENOS. Así, es posible demostrar que la peligrosidad más importante asociada a los ciclones tropicales sobre el país es la lluvia extrema.

En resumen, la vulnerabilidad local y las fases del ENOS influyen en gran medida en los cambios del riesgo climático asociado a ciclones tropicales, que

a su vez determinan la ocurrencia de los desastres y sus impactos socioeconómicos. Si la vulnerabilidad social no se reduce, la fase del ENOS podría seguir señalando en buena medida qué regiones de México se verían más afectadas por desastres (Domínguez et al., 2021b). Por lo tanto, es de vital importancia incrementar el nivel de preparación local para enfrentar las amenazas y mejorar la percepción pública del riesgo como medidas iniciales para disminuir la vulnerabilidad, ya que, en caso contrario y si los tomadores de decisiones no implementan estrategias locales eficientes de prevención, cualquier amenaza elevará el riesgo y materializará el desastre.

Los resultados de Domínguez et al. (2021b) indican que la lluvia extrema asociada al paso de los ciclones tropicales está aumentando en Chiapas, Tabasco, el sur de Veracruz, la península de Yucatán y el noroeste del país (figura 9). Estos resultados deberían propiciar que los Gobiernos locales y estatales de estas regiones empiecen a desarrollar planes de adaptación, prevención y respuesta contra ciclones tropicales más peligrosos, debido a que producirán lluvias más extremas.

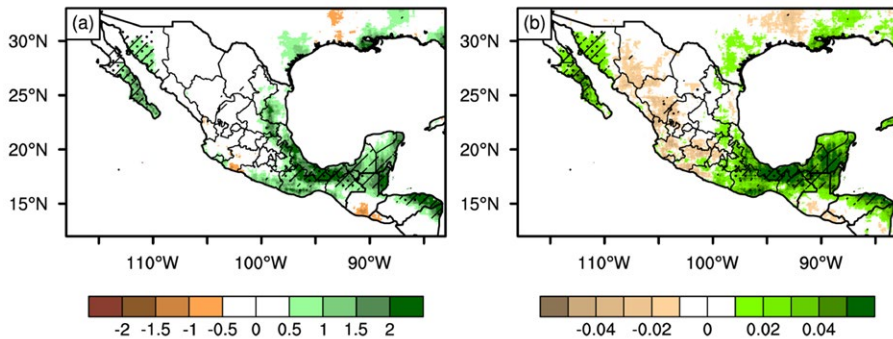


Figura 9. Tendencias en: a) precipitación acumulada de ciclones tropicales (mm/año), y b) días en los que los ciclones tropicales produjeron precipitaciones extremas (días/año) durante el periodo 1981-2017. Las regiones punteadas indican un nivel de significancia de 95 % al aplicar la prueba t de Student y las regiones rayadas indican el mismo nivel de significancia pero al aplicar la prueba de Mann-Kendall.

Fuente: Domínguez et al., 2021b.

Al parecer, en el futuro los ciclones tropicales se volverán más peligrosos debido a un aumento en su precipitación extrema. Cuando se intenta determinar qué pasará en el futuro, el uso de los modelos climáticos es clave. Actualmente, estos simulan todo el planeta y son mejor conocidos como simuladores de la Tierra. Los modelos dividen al planeta entero en una malla y a esto se le llama resolución espacial del modelo (figura 10), que puede ser de 1° - 2° ; es decir, que existe un cuadro de la malla cada 100-200 km. Además, representan matemáticamente la atmósfera, el océano, la criósfera y el tipo de suelo de manera simultánea. Los países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá, Francia, Alemania, Reino Unido, Japón, Corea, China, entre otros, formularon sus propios modelos climáticos que permitieron crear representaciones de la atmósfera de décadas pasadas (por ejemplo, de 1980-2010). Cuando estas representaciones (datos del modelo) se compararon con los datos atmosféricos observados durante las mismas décadas simuladas por los modelos, se concluyó que en general tienen una buena habilidad relativa para simular la atmósfera; es decir, tienen una adecuada habilidad para representar las variaciones espaciales de precipitación y temperatura (Koutroulis et al., 2016; Eyring et al. 2019). En las décadas futuras es muy probable que los modelos climáticos tengan resoluciones espaciales cada vez más finas (por ejemplo, una malla de 10-25 km).

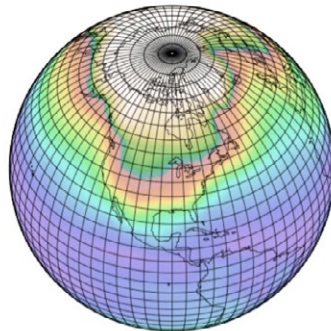


Figura 10. Representación gráfica de la malla de un modelo climático

Fuente: Modificado de Youngman et al., 2011.

El Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos creó el simulador de la Tierra llamado Modelo Climático Simulador de la Tierra (CESM, por sus siglas en inglés) para determinar los cambios futuros en el clima; sin embargo, uno de los problemas de este simulador es que no tiene una resolución espacial fina, es decir, los cuadros de la malla están espaciados cada 100 km. Por ejemplo, una parte del Estado de México y la Ciudad de México podrían estar dentro de un cuadro grande que pertenezca a esta malla. Así, surge la necesidad de contar con información espacial más detallada acerca de los cambios futuros en el clima.

Con dicha finalidad se usan los modelos regionales, que como su nombre lo dice, son capaces de simular solo una cierta parte del planeta que sea de interés para el usuario. NCAR hizo que las salidas (simulaciones) del simulador de la Tierra CESM fueran más finas mediante el uso del modelo regional «Investigación del tiempo meteorológico y pronóstico» (WRF, por sus siglas en inglés). Este modelo regional se corrió usando diferentes configuraciones que representan los procesos de la formación de nubes, radiación, entre otros, de tal forma que se crearon tres diferentes escenarios futuros que proyectan un cambio climático regional a una escala espacial de 36 kilómetros.

Los escenarios de cambio climático regional suponen que las emisiones de gases de efecto invernadero aumentarán drásticamente en el futuro, lo que causará un incremento en la radiación atrapada en la atmósfera de la Tierra de 8.5 W/m^2 (conocido científicamente como RCP8.5). Tres escenarios de cambio climático (rktm, rnty y rtty) y su promedio en diferentes décadas (futuro cercano: 2020-2030; futuro mediano: 2030-2040 y 2050-2060, y futuro lejano: 2080-2090) muestran que los ciclones tropicales aumentarán la precipitación que producen en el noroeste del país en comparación con la década de 1990-2000 (figura 11) (Dominguez et al. 2021a). Lo anterior concuerda con la tendencia mostrada por los datos observados durante el periodo 1981-2017 (figura 9).

Por lo tanto, quedan algunas preguntas sobre la mesa: ¿qué vamos a hacer? ¿Cómo nos vamos a adaptar? ¿Qué estrategias podemos implementar? ¿Parte de la adaptación puede contemplar educar/concientizar a la población sobre los riesgos hidrometeorológicos? La respuesta debe estar en el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT).

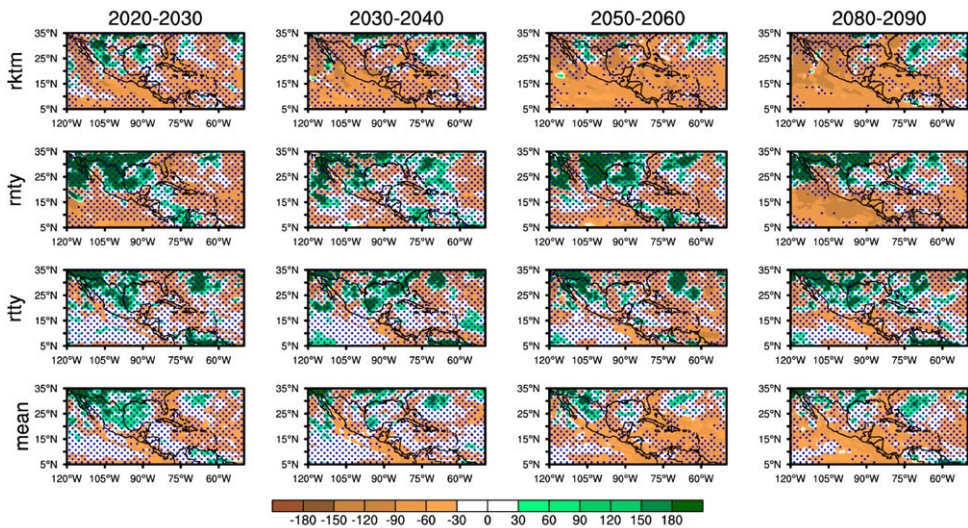


Figura 11. Cambio porcentual promedio anual (%) de la precipitación asociada con ciclones tropicales en los escenarios de cambio climático futuros comparados con el periodo de referencia (1990-2000). Las regiones punteadas indican un nivel de significancia de 95 % al aplicar la prueba de dos muestras de Kolmogorov-Smirnov.

Fuente: Domínguez et al., 2021a.

4. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA CICLONES TROPICALES (SIAT-CT): PROPUESTAS PARA MEJORAR LA PELIGROSIDAD Y LA COMUNICACIÓN DEL RIESGO

México resulta afectado por fenómenos perturbadores de origen natural o antrópico, por lo que el país debe crear estrategias regionales de afrontamiento antes, durante y después de los desastres (Domínguez et al., 2019). Los sistemas de alerta temprana (SIAT) surgen como herramientas útiles que sirven para coordinar las acciones institucionales del Gobierno antes y durante las amenazas de un fenómeno perturbador mediante avisos a la población (Cenapred, 2019b).

Un SIAT está constituido por cuatro componentes principales: 1) conocimiento científico previo sobre los fenómenos antrópicos o naturales que propicie la elaboración de planes de afrontamiento y prevención; 2) sistema de monitoreo, basado en instrumentación, que determine adecuadamente las características del fenómeno; 3) comunicación y difusión de alertas públicas con protocolos de seguridad establecidos para la población, y 4) planes de respuesta individuales, familiares y gubernamentales previamente definidos.

El objetivo principal de un SIAT es salvar vidas, lo cual se logra únicamente cuando existe una acción coordinada entre el Gobierno y la población, ya que la respuesta de esta es esencial para determinar el éxito de un SIAT. La comunicación y la difusión de la magnitud del fenómeno también cumplen un papel importante porque condicionan la eficacia de su ejecución (Cenapred, 2019b). La sociedad debe participar de manera activa en cada uno de los elementos del SIAT. Si no existe una correcta difusión de las alertas o no se llevan a cabo protocolos y planes de respuesta, el SIAT no funcionará correctamente, aun cuando se tenga la mejor instrumentación para monitorear el fenómeno (Travieso Bello y Romo Aguilar, 2020).

El SIAT para Ciclones Tropicales (SIAT-CT) nació a consecuencia de las inundaciones catastróficas que se presentaron en Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco en 1999, y empezó operaciones en el año 2000 (Sinaproc, 2019). Cuatro etapas conforman el SIAT-CT: el aviso, la prevención, la preparación y

la alerta. Considerando la cuestión de la peligrosidad (componente físico) del SIAT-CT, se emplea únicamente la intensidad del ciclón tropical, la velocidad de traslación, la distancia del sistema a la costa del país y el tiempo en que tocará tierra (Sinaproc, 2019). Este sistema de alerta utiliza dos escalas: la promedio y la de circulación. La primera depende de la categoría del ciclón tropical, que está definida por la escala Saffir-Simpson y se expresa mediante la ecuación (3):

$$(3) \quad e = 0.5 (I + C)$$

«I» corresponde a la categoría del ciclón tropical en la escala Saffir-Simpson. Si el ciclón tropical es una depresión o una tormenta tropical, entonces $I = 0$. El término «C» se refiere a la escala de circulación, que se define por el radio promedio en el que existen vientos máximos de por lo menos 63 km/h en los cuatro cuadrantes (noreste, noroeste, suroeste y sureste, definidos con respecto al centro del sistema) que integran un ciclón tropical (ecuación 4):

$$(4) \quad C = 0.0377 * R$$

«R» es el radio promedio en kilómetros de los cuatro cuadrantes en donde el viento es por lo menos 63 km/h. Si el ciclón tropical comienza a desintegrarse y disminuye su categoría a depresión tropical, «R» tendrá el valor promedio de los radios máximos de cada cuadrante en donde los vientos alcanzaron 63 km/h en la última posición donde el ciclón tropical fue considerado tormenta tropical. Así, la peligrosidad del ciclón tropical es calculada por las ecuaciones (3) y (4), y su valor adimensional varía de 0 a 5.

Después, su peligrosidad se clasifica en cada una de las etapas del SIAT-CT considerando su distancia al país y el tiempo que tardará en afectar las costas mexicanas (Sinaproc, 2019). Cabe resaltar que, durante su etapa de formación, cuando los ciclones tropicales se inician como disturbios o depresiones tropicales, no se determina ningún radio, lo que limita el valor de la escala promedio y la de circulación. Esto representa una gran restricción, porque la peligrosidad de las depresiones tropicales no es considerada en el SIAT-CT y puede conducir a una mala comunicación del riesgo debido a una subestimación

de la peligrosidad (Domínguez-Sarmiento et al., 2018b). Por ejemplo, cinco ciclones tropicales (tres depresiones tropicales, una tormenta tropical y un huracán categoría 4) afectaron a México en 1999. El ciclón tropical que más daños ocasionó fue la depresión tropical 11, debido a que precipitó 1098 mm en 24 horas en el norte de Veracruz, donde se produjeron inundaciones y murieron alrededor de 400 personas (Beven, 1999; Roth, 2007). Así que las depresiones tropicales también tienen consecuencias importantes en el país, como ya se mencionó.

Lo anterior demuestra que el SIAT-CT debería considerar las lluvias torrenciales dentro de su definición de peligrosidad para comunicar de mejor manera el riesgo (Domínguez et al., 2019). Lamentablemente, los tomadores de decisiones siempre asocian la peligrosidad del ciclón tropical con su intensidad y dejan de lado otras de sus características, entre ellas, la precipitación. Las consecuencias de incluir únicamente la intensidad de los vientos en la peligrosidad se traducen en un aumento en el número de decesos relacionados con el paso de ciclones tropicales desde la implementación del SIAT-CT (Magaña et al., 2014), lo cual está probablemente vinculado con una mala comunicación del riesgo.

En un futuro, sería ideal que la definición de peligrosidad del SIAT-CT incluyera la marea de tormenta (únicamente para ciudades costeras), la cantidad de precipitación extrema que pueden producir los ciclones tropicales, su tamaño (su extensión de bandas nubosas) en lugar del radio de los vientos mayores que 63 km/h, la velocidad de traslación y la categoría del ciclón tropical, pero ponderada localmente; es decir, que dependa de la vulnerabilidad local. Por lo tanto, la modificación de la peligrosidad en el SIAT-CT debe traducirse en la creación de un índice multiamenaza que use las variables mencionadas y que sustituya el uso de la escala Saffir-Simpson en México.

Con respecto a los componentes sociales del SIAT-CT, también queda un camino largo por recorrer, porque la mayoría de la población afectada por ciclones tropicales no sabe que existe, y eso reduce la eficiencia de la comunicación del riesgo y la elaboración de planes de respuesta (tercer y cuarto componentes del SIAT). El desconocimiento de la población sobre las alertas del SIAT-CT incrementa el riesgo de sufrir un desastre, pues las personas más vulnerables no suelen tener planes de respuesta familiares o individuales bien estructurados

(Domínguez-Sarmiento et al., 2018b). La participación de la sociedad es esencial para que el SIAT-CT tenga éxito.

El SIAT-CT debería contar con una estrategia de publicidad comprometida por parte del Gobierno nacional con la finalidad de integrar los componentes tres y cuatro del SIAT orientados hacia un mejor entendimiento de las multiamenazas del fenómeno. De igual modo, sería ideal que el Gobierno evaluara la percepción del riesgo antes, durante y después del impacto de los ciclones tropicales, así como del funcionamiento del SIAT-CT, con la finalidad de encontrar áreas de oportunidad regionales en las que el sistema debe mejorar. Hasta la fecha (marzo de 2022), no existe ninguna evaluación local o regional sobre el funcionamiento del SIAT-CT.

En conclusión, el SIAT-CT funciona desde el año 2000 con una definición limitada de la peligrosidad de los ciclones tropicales, ya que utiliza solamente la escala Saffir-Simpson para comunicar el riesgo; sin embargo, su diseño y funcionamiento necesitan actualizarse e incluir la precipitación y el tamaño de los ciclones tropicales, de manera que considere multiamenazas simultáneas. Aunado a esto, el SIAT-CT debería contemplar dentro de su diseño la vulnerabilidad local que existe en México debido al paso de los ciclones tropicales, ya que un ciclón tropical podría ocasionar desastres de diferente magnitud en localidades alejadas geográficamente. Por ejemplo, un huracán afectará de distinta manera la zona costera de Oaxaca que la región de Los Cabos. Además, es importante educar a las personas para que estén preparadas antes de que comience la temporada ciclónica tropical, y esta preparación puede estar vinculada con el uso de la información climática generada por la relación del ENOS y la actividad ciclónica tropical en México. El SIAT-CT necesita tanto del Gobierno como de la sociedad para convertirse en una herramienta completamente útil.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2019a). Time in a Bottle: Challenges to Disaster Studies in Latin America and the Caribbean. *Disasters*, 43, S18-S27. <https://doi.org/10.1111/disa.12325>
- Alcántara-Ayala, I. (2019b). Desastres en México: mapas y apuntes sobre una historia inconclusa. *Investigaciones Geográficas*, 100, 1-17. <https://doi.org/10.14350/rig.60025>
- Aven, T. (2016). Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on their Foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Banco Mundial. (2018). *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* (reporte anual). Banco Mundial.
- Beven, J. (1999). *Brief information about tropical depression Eleven*. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL111999_Eleven.pdf
- Braun, S. A. (2006). High-resolution Simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part II: Water budget. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63, 43-64. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/63/1/jas3609.1.xml>
- Caetano, E., Marton, L., Innocentini, V., Domínguez, C., Caracas, A. y Galván, L. (2017). El cambio del nivel del mar y eventos extremos en el Pacífico mexicano. En A. V. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez y J. L. Rojas Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático* (pp. 85-104). UJAT/UNAM/UAC.
- Camargo, S. J., Robertson, A. W., Barnston, A. G. y Ghil, M. (2008). Clustering of Eastern North Pacific Tropical Cyclone Tracks: ENSO and MJO Effects. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, Q06V05. <https://doi.org/10.1029/2007gc001861>
- Camargo, S. J., Emanuel, K. A. y Sobel, A. H. (2007). Use of a Genesis Potential Index to Diagnose ENSO Effects on Tropical Cyclone Genesis. *Journal of Climate*, 20, 4819-4834. <https://doi.org/10.1175/JCLI4282.1>

- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019a). *Desastres en México: impacto social y económico*. <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADESASTRESENMEXICO-IMPACTOSOCIALYECONMICO.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019b). *Sistemas de alerta temprana: Avisos que pueden salvar vidas*. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/298-INFOGRAFASISTEMASDEALERTATEMPRANA.PDF>
- Claudet, J., Bopp, L., Cheung, W., Devillers, R., Escobar-Briones, E., Haugan, P., Heymans, J., Masson-Delmotte, V., Matz-Lück, N., Miloslavich, P., Mullineaux, L., Visbeck, M., Watson, R., Zivian, A., Ansong, I., Araujo, M., Aricò, S., Bailly, D., Barbière, J.,... Gaill, F. (2020). A Roadmap for Using the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development in Support of Science, Policy, and Action. *One Earth*, 2 (1), 34-42.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2010). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Consejo Nacional de Población. (2012). *Índice de marginación a nivel localidad 2010*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/671850/Indice_de_marginacion_por_localidad_2010.pdf
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2010). *Grado de rezago social a nivel localidad*. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/%C3%8Dndice-de-Rezago-social-2010.aspx>
- Corral, A., Osso, A. y Llebot, J. E. (2010). Scaling of Tropical-cyclone Dissipation. *Nature Physics*, 6, 693-696. <https://doi.org/10.1038/nphys1725>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters y United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *The human cost of disasters: An overview of the last 20 years 2000-2019*. <https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>
- Domínguez, C., Done, J. M. y Bruyère, C. L. (2021). Future Changes in Tropical Cyclone and Easterly Wave Characteristics over Tropical North America. *Oceans*, 2(2), 429-447. <https://doi.org/10.3390/oceans2020024>
- Domínguez, C., Jaramillo, A. y Cuéllar, P. (2021b). Are the Socioeconomic Impacts Associated with Tropical Cyclones in Mexico Exacerbated by Local Vulnerability and ENSO Conditions? *International Journal of Climatology*, 41 (Suppl. 1), E3307–E3324. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>

- Domínguez, C., Llanos-Rodríguez, M., Ochoa-Martínez, C., Welsh-Rodríguez, C. y Pérez-Estrada, A. (2019). Sistema de Alerta Temprana ante Ciclones Tropicales: propuestas para su mejoría. *Quehacer Científico en Chiapas*, 14(2), 73-80.
- Domínguez, C. y Magaña, V. (2018a). The Role of Tropical Cyclones in Precipitation over the Tropical and Subtropical North America. *Frontiers in Earth Science*, 6(19). <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00019>
- Domínguez, C., Cuéllar, P., Welsh, C. y Ochoa-Martínez, C. (2018b). Percepción de riesgos hidrometeorológicos en personas interesadas en los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Antrópica: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(8), 201-214.
- Emanuel, K. A. (2005). Rain. En Oxford University Press (ed.), *Divine Wind: The History and Science of Hurricanes* (pp. 182-191). Oxford University Press.
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., Gleckler, P. J., Abramowitz, G., Caldwell, P., Collins, W. D., Gier, B. K., Hall, A. D., Hoffman, F. M., Hurtt, G. C., Jahn, A., Jones, C. D., Klein, S. A., Krasting, J. P., Kwiatkowski, L., Lorenz, R., Maloney, E., Meehl, G. A.,... Williamson, M. S. (2019). Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, 9, 102-110. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0355-y>
- Farfán, M., Domínguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I. y Flamenco, A. (2021). Forest Fire Probability under ENSO Conditions in a Semi-arid Region: A Case Study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 684 <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>
- Holland, G. J., Done, J. M., Douglas, R., Saville, G. R. y Ge, M. (2019). Global tropical cyclone damage potential. En: J. Collins y K. Walsh (eds.), *Hurricane Risk* (vol. 1). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02402-4_2
- Hsiang, S. y Camargo, S. (2016). Tropical Cyclones: From the Influence of Climate to Their Socioeconomic Impacts. En M. Chavez, M. Ghil y J. Urrutia-Fucugauchi (eds.), *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics* (pp. 303-342). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch18>
- Huang, B., L'Heureux, M., Hu, Z.-Z. y Zhang, H.-M. (2016). Ranking the Strongest ENSO Events while Incorporating SST Uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 43, 9165-9172. <https://doi:10.1002/2016GL070888>.
- Iacovelli, D. (1991). *The Saffir/Simpson Hurricane Scale: An Interview with Dr. Robert Simpson*. <https://novalynx.com/store/pc/Simpson-Interview-d53.htm>

- Kossin, J. P., Camargo, S. J. y Sitkowski, M. (2010). Climate Modulation of North Atlantic Hurricane Tracks. *Journal of Climate*, 23, 3057-3076. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3497.1>
- Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K. y L. Papadimitriou. (2016). Evaluation of Precipitation and Temperature Simulation Performance of the CMIP3 and CMIP5 Historical Experiments. *Climate Dynamics*, 47, 1881-1898. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2938-x>
- Magaña, V., Tejeda-Martínez, A. y Vázquez-Cruz, G. (2014). El Sistema de Alerta Temprana ante Ciclones Tropicales desde una perspectiva de riesgo. *H2O Gestión del Agua del Sistema de Aguas de la Ciudad de México*, 1(1), 50-55.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on Precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42, 313-330.
- Neri, C. y Magaña, V. (2016). Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8, 95-110. https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/8/2/wcas-d-15-0005_1.xml
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s. f.). *NHC Data Archive*. <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>
- Oliver-Smith, A., Alcántara-Ayala, I., Burton, I. y Lavell, A. (2017). The Social Construction of Disaster Risk: Seeking Root Causes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 469-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.10.006>
- Ooyama, K. (1982). Conceptual Evolution of the Theory and Modeling of the Tropical Cyclone. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60(1), 369-380. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.60.1_369
- Organización Meteorológica Mundial. (s. f.). *Ciclones tropicales*. <https://public.wmo.int/es/ciclones-tropicales>
- Roth, D. M. (2007). *Tropical Depression 11 – September 30-October 9, 1999. Weather Prediction Center* (reporte de la National Oceanic and Atmospheric Administration). <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/tropical/rain/td11of1999.html>
- Silver, J. M., Arkema, K. K., Griffin, R. M., Lashley, B., Lemay, M., Maldonado, S., Moultrie, S. H., Ruckelshaus, M., Schill, S., Thomas, A., Wyatt, K. y Verutes, G. (2019). Advancing Coastal Risk Reduction Science and Implementation by Accounting for Climate, Ecosystems, and people. *Frontiers in Marine Science*, 6, 556. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00556>

- Sistema Nacional de Protección Civil (2019). *Sistema de Alerta Temprana ante Ciclones Tropicales (SIAT-CT)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428441/MANUAL_SIAT_CT_2019.pdf
- Sisto, N. P., Ramírez, A. I., Aguilar-Barajas, I. y Magaña-Rueda, V. (2016). Climate threats, Water Supply Vulnerability, and the Risk of a Water Crisis in the Monterrey Metropolitan Area (Northeastern Mexico). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 91, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.08.015>.
- Sun, X., Renard, B., Thyer, M., Westra, S. y Lang, M. (2015). A Global Analysis of the Asymmetric Effect of ENSO on Extreme Precipitation. *Journal of Hydrology*, 530, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.016>.
- Travieso Bello, A. C. y Romo Aguilar, M. L. (2020). Participación social en los sistemas de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos. En O. Frausto Martínez, J. C. Morales Hernández y C. D. Aguilar Becerra (eds.). *Sistemas de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos en México* (pp. 13-27). Redescim-Conacyt.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2019). *Decade of ocean science for sustainable development*. <https://en.unesco.org/ocean-decade>
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2017). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. UNDRR. <https://www.undrr.org/terminology>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. https://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf
- Wang, C. y Enfield, D. B. (2003). A Further Study of the Tropical Western Hemisphere Warm Pool. *Journal of Climate*, 16, 1476-1493. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1476:AFSOTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1476:AFSOTT>2.0.CO;2)
- Youngman, B., Chandler, M., Sohl, L., Hafen, M., Ledley, T., Ackerman, S. y Kluge, S. (2011). Envisioning Climate Change Using a Global Climate Model. En Science Education Resource Center (SERC) at Carleton College, *Earth Exploration Toolbok*. https://serc.carleton.edu/eet/envisioningclimatechange/part_2.html
- Yu, Z., Wang, Y., Xu, H., Davidson, N., Chen, Y., Chen, Y. y Yu, H. (2017). On the Relationship Between Intensity and Rainfall Distribution in Tropical Cyclones Making Landfall over China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56, 2883-2901. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/56/10/jamc-d-16-0334.1.xml>

**La actividad ciclónica tropical en México:
peligros y riesgos hidrometeorológicos asociados**

se terminó de producir en noviembre de 2022.

Esta publicación fue editada por la Secretaría de Desarrollo Institucional a través del Seminario Universitario de Riesgos Socio-Ambientales, UNAM.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de Naxhelli Ruiz Rivera y Laura Sánchez de Jesús.

Para su formación se utilizó la superfamilia tipográfica Roboto, de Christian Robertson.