

PRIMER COMPENDIO SOBRE LAS MEJORES INVESTIGACIONES EN CAMBIO CLIMÁTICO DE LA UNAM 2021





Dr. Enrique Graue Wiechers
Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General

Dr. William Henry Lee Alardín
Coordinador de la Investigación Científica

Dr. José Manuel Saniger Blesa
Secretario Investigación y Desarrollo

Dr. Francisco Estrada Porrúa
Coordinador del Programa de Investigación en Cambio Climático



**Coordinación de
la Investigación
Científica**



PINCC
Programa de Investigación
en Cambio Climático

**PRIMER COMPENDIO SOBRE LAS
MEJORES INVESTIGACIONES EN
CAMBIO CLIMÁTICO DE LA UNAM
2021**

Primera edición: enero 2023

D.R.® Universidad Nacional Autónoma de México

Av. Universidad 3004, Copilco Universidad, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX

Editor: Rubén Darío Martínez Ramírez

Corrección de estilo: Samy Zacarías Reyes García y Marisol García Romero

Diseño editorial y diseño de portada: Vanesa Gómez Vivas

ISBN: 978-607-30-7730-9

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

Todos los derechos reservados.

Hecho en México.

ÍNDICE



Primer compendio sobre las mejores investigaciones en cambio climático de la UNAM 2021

7

Ganadores de la Categoría 1: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la respuesta del sistema climático a forzantes externos de origen natural y/o antropogénico.

- Descifrando el impacto de la variabilidad natural y el calentamiento global en los climas globales de oleaje - *Itxaso Odériz Martínez* 17
- Reconstrucción de alta resolución del monzón de América del Sur durante el Holoceno - *Juan Pablo Bernal Uruchurtu* 25
- Cambios futuros en los ciclones tropicales y las ondas del este sobre América del Norte - *Christian Domínguez Sarmiento* 33

Menciones honoríficas Categoría 1

- Estimaciones cuantitativas de la variabilidad climática en el centro de México en escalas orbitales y milenarias durante los últimos 40,000 años - *Margarita Caballero Miranda* 41
- Respuestas de la precipitación y la vegetación en la Sierra Madre Oriental al cambio climático de los últimos 32,500 años - *Priyadarsi D. Roy* 49

Ganadores de la Categoría 2: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sobre los impactos observados o proyectados de este fenómeno y sobre opciones de adaptación al mismo.

1. Evaluando el riesgo y las posibles adaptaciones al cambio climático bajo un enfoque de sistema socioecológico - *Gemma Abisay Ortiz Haro* 59

2. Priorizando la conservación de la biodiversidad ante escenarios de cambio global - *Alma V. Mendoza Ponce* 69
3. El cambio climático favorece la proliferación del gusano cogollero del maíz - *Ek del Val de Gortari* 77

Menciones honoríficas Categoría 2

1. El colapso de la corriente AMOC y los impactos sobre la diversidad de anfibios a nivel global - *Julián A. Velasco* 83
2. El cambio climático: una amenaza para la avifauna de los bosques secos estacionales del Neotrópico - *David A. Prieto-Torres* 91
3. Prediciendo la hibridación como consecuencia del cambio climático - *Angela Nava Bolaños* 101

Ganadores de la Categoría 3: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero, descarbonización y transición energética, política climática y gobernanza.

1. Los incendios: una fuente importante de emisiones de carbono en México - *Rogelio Omar Corona Núñez* 107
2. Hacia un sector de transporte bajo en carbono en México - *Jorge Marcial Islas-Samperio* 113
3. Factores de corrección de metano para estimar emisiones de plantas aerobias de tratamiento de aguas residuales en México - *Adalberto Noyola Robles* 123

Miembros del jurado del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático PINCC 2021 129

Sobre las y los autores 130

Primer compendio sobre las mejores investigaciones en cambio climático de la UNAM 2021



La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha tenido un papel fundamental en el desarrollo de conocimiento sobre cambio climático en nuestro país y en América Latina. Es pionera y líder a nivel nacional y regional en el estudio de distintos aspectos de este fenómeno, incluyendo sus causas, la elaboración de escenarios climáticos y socioeconómicos, la evaluación de impactos en sistemas naturales y humanos, así como de opciones de adaptación, de mitigación y de política pública. El conocimiento generado en la UNAM ha contribuido de manera importante a la toma de decisiones en México, nutriendo diversos documentos de gobierno, incluyendo todas las comunicaciones nacionales de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, al igual que varios Programas Estatales de Acción Climática y Planes de Acción Climática Municipal.

Es en este contexto, y considerando los grandes retos que este fenómeno plantea para el país, que la UNAM crea en 2010 el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) para convocar, integrar y coordinar las capacidades y esfuerzos de la Universidad relacionados con este fenómeno. El PINCC promueve la investigación de frontera en cambio climático con un enfoque multidisciplinario e integral, la generación de conocimiento útil para la toma de decisiones, así como la difusión y divulgación de la ciencia del cambio climático hacia la sociedad.

En 2021, el PINCC organizó el Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático, con el objetivo de reconocer y difundir algunas de las contribuciones destacadas al estudio del cambio climático realizadas por académicos de la UNAM durante los últimos cinco años. Los textos aquí incluidos nos muestran la ciencia detrás de los artículos premiados, su importancia y contexto, escritos en un lenguaje accesible para un público general y explicados por sus autores.

Las contribuciones están organizadas en tres secciones que reflejan grandes áreas de estudio en cambio climático y cada una contiene los textos correspondientes a los ganadores de los tres primeros lugares, así como aquellos de las menciones honoríficas otorgadas por el jurado.

La **primera sección** de este compendio presenta las investigaciones relacionadas con la respuesta del sistema climático a forzantes externos de origen natural y/o antropogénico, incluyendo aquellas sobre paleoclima, el periodo observacional, así como el clima futuro:

La Dra. Itxaso Odériz y coautores analizan los efectos del calentamiento global en el clima de oleaje global y muestran que, en varias regiones del planeta, la señal correspondiente a la intervención humana ya es mayor que aquella asociada con la variabilidad natural. Esta sección continúa con el trabajo del Dr. Juan Pablo Bernal y coautores, quienes nos presentan un estudio paleoclimático que permitió obtener una reconstrucción de alta resolución del monzón de América del Sur durante el Holoceno. Esta reconstrucción se logró a través del análisis de elementos traza en el registro más detallado existente para la zona, y que proviene de una estalagmita ubicada en el sur de Brasil. El tercer capítulo corresponde al trabajo de la Dra. Christian Domínguez y coautores donde analizan salidas de un modelo físico del clima de última generación para entender las implicaciones que los cambios proyectados en ciclones tropicales y ondas del Este podrían tener sobre los patrones y la cantidad de lluvia que nuestro país recibe. Esta sección se complementa con dos menciones honoríficas dedicadas al estudio y reconstrucción de los paleoclimas de México. La Dra. Margarita Caballero y coautores nos presentan reconstrucciones cuantitativas de la salinidad, temperatura y precipitación en la región central de México, durante los últimos 40,000 años, obtenidas del análisis de diatomeas obtenidas en 40 sitios ubicados en la zona. Por su parte, la contribución del Dr. Roy Priyadarsi se centra en la reconstrucción de la precipitación y vegetación en el noreste de México durante los últimos 32,500 años, y en analizar cómo modos de variabilidad natural modularon los cambios climáticos registrados en la zona.

La **segunda sección** de este compendio está dedicada a los estudios sobre la vulnerabilidad, impactos y adaptación en sistemas socioeconómicos y naturales, tanto para condiciones climáticas actuales como futuras:

Esta sección inicia con la investigación realizada por la Mtra. Abi Haro y coautores sobre la evaluación de los riesgos y posibles acciones de adaptación de productores de maíz en México, frente al cambio climático. Mediante un enfoque de sistemas socioecológicos se muestra que durante este siglo la mayor parte de los municipios del país enfrentarán un nivel creciente de riesgo socioambiental, que difícilmente

será compensable con medidas de asistencia comúnmente usadas, tales como los subsidios agrícolas. En el segundo capítulo, la Dra. Alma Mendoza y coautores presentan una metodología para la identificación de áreas prioritarias para la conservación de biodiversidad, considerando los cambios en el clima y en el uso del suelo proyectados para este siglo. Mediante modelación espacialmente explícita desarrollan estimaciones de vulnerabilidad y amenaza que permiten priorizar áreas de conservación que lleven a hacer más eficientes y efectivos los esfuerzos para minimizar los impactos sobre la biodiversidad de estos fenómenos. En la contribución de la Dra. Ek del Val y coautores se presenta una investigación de laboratorio sobre los efectos del cambio climático en la proliferación del gusano cogollero del maíz que afecta de forma importante la producción de este cultivo. Los resultados de su investigación ilustran cómo, además de los impactos directos causados por el cambio climático en la producción agrícola, los cambios en las condiciones climáticas pueden favorecer la presencia de plagas y, con ello, reducir aún más la capacidad de producción del país. Esta sección cuenta con tres capítulos adicionales correspondientes a las menciones honoríficas seleccionadas por el jurado. Las tres abordan distintos aspectos de los impactos del cambio climático en la biodiversidad: el Dr. Julián Velasco y coautores abordan por primera vez los efectos conjuntos del cambio climático y el colapso de la circulación termohalina, debido a un rápido derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia en la riqueza de especies de anfibios. La contribución del Dr. David Prieto-Torres y coautores sugieren que los efectos del cambio climático en la avifauna en bosques del Neotrópico y en las áreas naturales protegidas ubicadas en esa región, podrían amenazar la estabilidad y funcionamiento del ecosistema. La Dra. Angela Nava y coautores investigan cómo los cambios proyectados en áreas de distribución de especies provocados por el cambio climático pueden fomentar la hibridación de especies que, si bien puede aumentar la variación genética, también puede llevar a extinciones locales.

La **tercera sección** de esta obra presenta las contribuciones relacionadas con las emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero, la descarbonización y transición energética, así como la política climática y gobernanza:

En el primer capítulo de esta sección el Dr. Rogelio Corona y coautores presentan un análisis de los incendios forestales en México, su variación temporal y espacial, así como la influencia que el fenómeno de El Niño/La Niña tiene sobre ellos. Sus resultados sugieren que el

número de incendios y el área afectada, así como las emisiones de carbono asociadas se encuentran subestimadas en las cifras oficiales. En particular, las emisiones de dióxido de carbono por incendios forestales podrían ser de un orden de magnitud mayores a las reportadas en los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero de México. En el segundo capítulo, el Dr. Jorge Islas-Samperio y coautores nos presentan un análisis sobre el sector transporte en México, en el que proponen un escenario basado en veintiuna medidas de mitigación para transformarlo en un sector bajo en carbono. Los autores presentan resultados de análisis costo-beneficio y estimaciones de la inversión requerida para lograr la meta de un sector transporte bajo en carbono. La contribución del Dr. Adalberto Noyola se centra en proponer nuevos factores de corrección para estimar las emisiones de metano provenientes del tratamiento de aguas residuales. Los factores de corrección propuestos contribuyen a estimaciones más precisas que los recomendados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y comúnmente utilizados para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Finalmente, el PINCC agradece la amplia participación de los académicos de la Universidad en la realización de este Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático, tanto aquellos que sometieron sus artículos, como aquellos que formaron parte del jurado en las tres categorías del premio. De la misma forma, el Programa agradece la colaboración de las siguientes dependencias en la realización este esfuerzo: Coordinación de la Investigación Científica, Secretaría de Investigación y Desarrollo, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Instituto de Geofísica, Instituto de Geología, Instituto de Geociencias, Instituto de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores de Iztacala, Instituto de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Instituto de Geografía, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de Biología, Instituto de Investigaciones Jurídicas, Facultad de Ciencias, Coordinación Universitaria para la Sustentabilidad, Programa Universitario de Estudios Interdisciplinarios del Suelo, Programa Universitario de Investigación en Salud, Programa Espacial Universitario y Programa Universitario de Alimentación Sostenible.

Dr. Francisco Estrada Porrúa,
Coordinador

Programa de Investigación en Cambio Climático

Resultados del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático PINCC 2021



Ganadores de la Categoría 1: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la respuesta del sistema climático a forzantes externos de origen natural y/o antropogénico. Esta categoría incluye clima del pasado, periodo observado y escenarios para el futuro. ▲

1°

PRIMER LUGAR

Título del artículo: Natural Variability and Warming Signals in Global Ocean Wave Climates

Nombre de la autora: Itxaso Odériz Martínez

Dependencia: Instituto de Ingeniería

2°

SEGUNDO LUGAR

Título del artículo: High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil

Nombre del autor: Juan Pablo Bernal Uruchurtu

Dependencia: Centro de Geociencias

3°

TERCER LUGAR

Título del artículo: Future Changes in Tropical Cyclone and Easterly Wave Characteristics over Tropical North America

Nombre de la autora: Christian Domínguez Sarmiento

Dependencia: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

*

MENCIONES HONORÍFICAS CATEGORÍA 1

Título del artículo: Quantitative estimates of orbital and millennial scale climatic variability in central Mexico during the last ~40,000 years

Nombre de la autora: Margarita Caballero Miranda

Dependencia: Instituto de Geofísica



Título del artículo: Depositional histories of vegetation and rainfall intensity in Sierra Madre Oriental Mountains (northeast Mexico) since the late Last Glacial

Nombre del autor: Priyadarsi D. Roy

Dependencia: Instituto de Geología

Ganadores de la Categoría 2: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sobre los impactos observados o proyectados de este fenómeno y sobre opciones de adaptación al mismo. ▲



PRIMER LUGAR

Título del artículo: Evaluating Risk and Possible Adaptations to Climate Change Under a Socio-Ecological System Approach

Nombre de la autora: Gemma Abisay Ortiz Haro

Dependencia: Instituto de Ecología



SEGUNDO LUGAR

Título del artículo: Spatial prioritization for biodiversity conservation in a megadiverse country

Nombre de la autora: Alma V. Mendoza Ponce

Dependencia: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático



TERCER LUGAR

Título del artículo: Climate change can trigger fall armyworm outbreaks: a developmental response experiment with two Mexican maize landraces

Nombre de la autora: Ek del Val de Gortari

Dependencia: Instituto de Investigaciones Ecosistemas y Sustentabilidad



MENCIONES HONORÍFICAS CATEGORÍA 2

Título del artículo: Synergistic impacts of global warming and thermohaline circulation collapse on amphibians

Nombre del autor: Julián A. Velasco

Dependencia: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático



Título del artículo: Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests

Nombre del autor: David A. Prieto-Torres

Dependencia: Facultad de Estudios Superiores Iztacala



Título del artículo: Predicting hybridisation as a consequence of climate change in damselflies

Nombre de la autora: Angela Nava Bolaños

Dependencia: Facultad de Ciencias

Ganadores de la Categoría 3: Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero, descarbonización y transición energética, política climática y gobernanza.



PRIMER LUGAR

Título del artículo: Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico

Nombre del autor: Rogelio Omar Corona Núñez

Dependencia: Instituto de Ecología



SEGUNDO LUGAR

Título del artículo: Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico

Nombre del autor: Jorge Marcial Islas-Samperio

Dependencia: Instituto de Energías Renovables



TERCER LUGAR

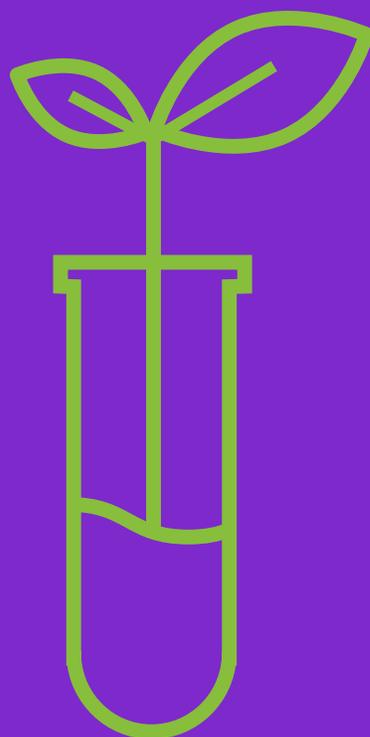
Título del artículo: Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review

Nombre del autor: Adalberto Noyola Robles

Dependencia: Instituto de Ingeniería

GANADORES

Categoría 1



Descifrando el impacto de la variabilidad natural y el calentamiento global en los climas globales de oleaje¹

Itxaso Odériz Martínez², Rodolfo Silva³

Resumen

El entendimiento de cómo las condiciones climáticas de gran escala impactan al oleaje, es esencial para las predicciones futuras de éste en un clima cambiante, y lo que se deriva de él: riesgos costeros, recurso energético, etc., ya que la variabilidad natural puede: (1) enmascarar una señal de calentamiento global, (2) complicar los proyectos de conservación, restauración y adaptación al cambio climático y (3) amortiguar o amplificar los impactos asociados con el calentamiento global. Por ello, este trabajo realiza una síntesis del estudio publicado en Odériz *et al.* (2021), quienes descomponen el clima del oleaje en grandes tipos del clima de oleaje (del este, del oeste y del sur), y analizan en qué climas la señal de calentamiento ha superado la señal de variabilidad natural, estos son los oleajes extratropicales y subtropical del océano Índico, el warm pool y los oleajes tropicales del Pacífico y del Atlántico.

Palabras clave: Oleaje; variabilidad natural; calentamiento global; PDO; SAM; ENSO

Abstract

The understanding of the large-scale climatology implies on wave climate conditions is critical for wave projections in a changing climate, as coastal risk assessment, energy resources quantification, etc. is derived from these projections. Natural variability can (1) mask a signal of global warming, thus (2) dampening or amplifying the impacts associated with global warming and therefore complicating conservation, restoration and adaptation projects designed to tackle climate change. This chapter therefore summarizes the study of Odériz *et al.* (2021), who break down the wave climate into global wave climate types (easterlies, westerlies and southerlies), and identify the wave climate types where the warming signal has exceeded that of natural variability. These are the extratropical and subtropical wave climate types of the Indian Ocean, the warm pool and the tropical wave climate types of the Pacific and the Atlantic.

Key words: Ocean waves; natural variability; global warming; PDO; SAM; ENSO

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Odériz, I., Silva, R., Mortlock, T. R., Mori, N., Shimura, T., Webb, A., Padilla-Hernández, R., & Villers, S. (2021). Natural variability and warming signals in global ocean wave climates. *Geophysical Research Letters*, 48, 1-12. <https://doi.org/10.1029/2021GL093622>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Itxaso Odériz y que fue premiado dentro de la Categoría 1 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, México. Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Cantabria, España. Correo: itxaso.oderiz@gmail.com

³ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, México. Correo: RSilvaC@iingen.unam.mx

Introducción

El oleaje moldea las costas, en conjunto con la interacción de marea astronómica, marea de tormenta, vientos, que inducen dinámicas costeras que, en su interacción con factores locales como el fondo marino, ecosistemas costeros y estructuras, generan flujos de energía, los cuales crean un balance de sedimentos, oxigenación de las aguas o conectividad de ecosistemas, entre otras cuestiones.

El clima de oleaje, en sus condiciones medias y extremas, está modulado por las condiciones climáticas de gran escala, al igual que otros parámetros climáticos como es la temperatura superficial del mar. Por ejemplo, en el hemisferio norte, las tormentas aparecen en invierno (en los meses de diciembre a febrero); en cambio, en verano se generan condiciones de calma. Estas condiciones se ven afectadas por la gran escala, tanto por las variaciones inducidas por el cambio climático antropogénico (nos referiremos a él a partir de aquí como cambio climático), como por la variabilidad natural. Ambos, cambio climático y variabilidad natural, modifican la distribución de la temperatura superficial del planeta de forma no homogénea y, en consecuencia, alteran los gradientes de presiones y de vientos, por ende, el de los oleajes que son generados por estos últimos. La principal diferencia entre el cambio climático y la variabilidad climática es su origen: el primero está inducido por las emisiones de gases de efecto invernadero; el segundo, por anomalías que se producen de fenómenos naturales en la atmósfera, que, a diferencia del cambio climático, tiene un comportamiento periódico. Por tanto, ambos modulan el clima de oleaje y repercuten en el riesgo costero y en la salud de los ambientes costeros donde los ecosistemas se establecen.

En un clima cambiante es esencial discernir cuándo los cambios en el oleaje están inducidos por cambio climático, variabilidad natural o ambos, con el fin de abordar planes de adaptación más adecuados en un marco de gestión costera resiliente. La complejidad de distinguirlos reside en que (1) allí donde el nivel de fluctuación natural sea amplio, la variabilidad natural puede enmascarar una señal de calentamiento global (Clem *et al.*, 2020; Tebaldi *et al.*, 2011); (2) la variabilidad natural puede amortiguar o amplificar los impactos asociados con el calentamiento global (Deser *et al.*, 2012). Por ello, la variabilidad natural en un clima cambiante puede complicar los proyectos de conservación, restauración y adaptación al cambio climático de los sistemas naturales y humanos (Duarte *et al.*, 2020; Moser, & Ekstrom, 2010).

El oleaje es más complejo que otras variables climáticas por su capacidad de propagación, en lo que los parámetros que estamos analizando están afectados por patrones de clima distantes a la zona de análisis. Por ello, en este trabajo, se presenta una síntesis del artículo de Odériz *et al.*

(2021), quienes identifican las señales de cambio climático asociados al calentamiento global y a la variabilidad natural en el oleaje en los últimos 34 años. Primero, se realizó una clasificación espaciotemporal del oleaje en tipos de clima, que están inducidos por la circulación atmosférica (sistemas planetarios de presiones y vientos). Después, para cada tipo de clima se evaluaron los cambios asociados a variabilidad natural (*El Niño Southern Oscillation* –ENSO; ENSO acoplado con *Southern Antartic Oscillation* –SAM y *Pacific Decadal Oscillation* –PDO) y las tendencias asociadas al calentamiento global.

Desarrollo

Marco climatológico del oleaje

El oleaje es un proceso de escala sinóptica (se genera y desarrolla en una escala de tiempo, de semanas a horas) y los procesos de cambio climático, así como los patrones climáticos, son de escalas planetaria, que repercuten en escalas más reducidas. En este trabajo hemos ampliado la perspectiva con la cual se estudia el oleaje y lo hemos analizado desde un marco climatológico global. En este marco, el oleaje está clasificado en climas, análogo a las regiones climáticas o a los vientos planetarios. La clasificación del oleaje se ha realizado bajo una nueva metodología que se denominó *agrupación dinámica*, y está basada en *K-medias*. El *K-medias* agrupa las variables que más se parecen entre sí buscando la menor similitud entre las variables pertenecientes a otros grupos. La novedad de la metodología recae en el preproceso y posproceso de los datos que primero se transforman de una matriz 3D (longitud, latitud, tiempo) a un vector 1D, se aplica la clasificación, y esta se convierte de un vector 1D a una matriz 3D (longitud, latitud, tiempo), como indica la Figura 1. El análisis se llevó a cabo con los valores medios mensuales de potencia de oleaje (P_w) y dirección media (Dir_m).

En la clasificación del clima de oleaje se identifican tres climas globales: oleajes del este, del sur y del oeste. El clima de oleajes del oeste es un sistema muy energético (potencia de oleaje promedio ~59 kW/m) con direcciones de olas de 209° a 352°, y a este pertenecen los tipos de clima de oleajes extratropicales, monzónicos y *warm pool*. La variabilidad de los extratropicales responde, en alto grado, a las bajas presiones polares, y la de los monzónicos y el *warm pool* a la posición del cinturón de bajas presiones tropical (la Zona de Interconvergencia Tropical).

El clima de oleajes del sur se define como un sistema de energía moderada (potencia de oleaje promedio ~27 kW/m), que viaja en dirección hacia el norte (entre 135° y 216°), e incluye los tipos de clima de oleaje subtropicales y subpolares. Estos tienen una componente de oleaje distante

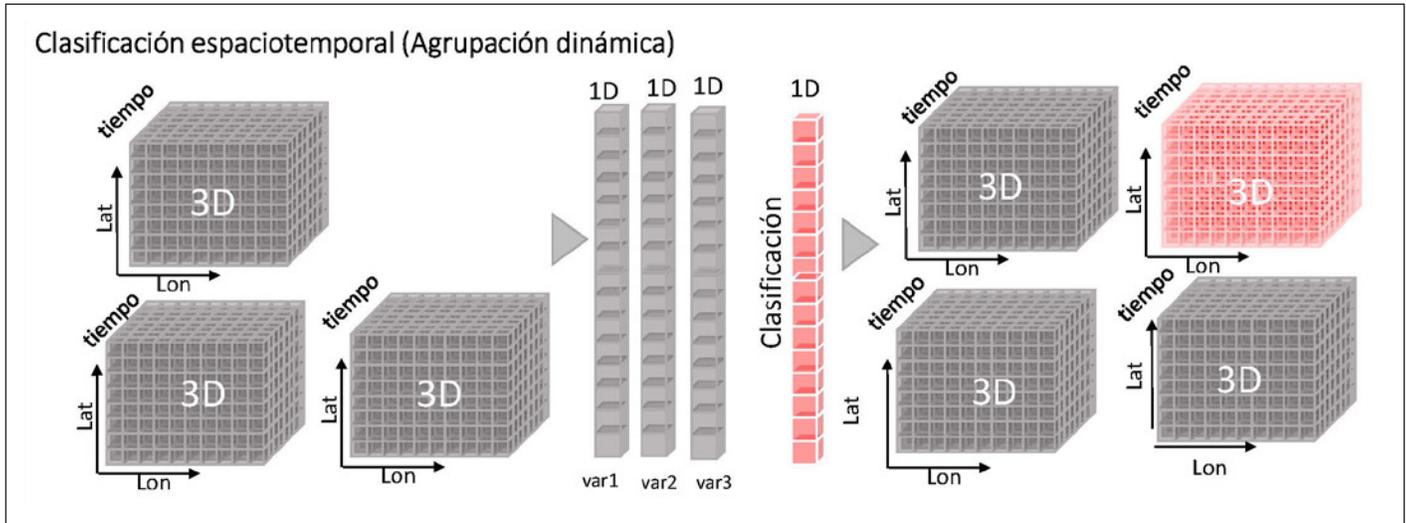


Figura 1. Esquema dinámico de la agrupación.

(*swell* en inglés) muy alta, sin embargo, sí existe una relación entre su variabilidad y las posiciones e intensidad del cinturón subtropical y subpolares de altas presiones, respectivamente. En cambio, el clima de oleajes del este es un clima poco energético (potencia de oleaje promedio $\sim 18 \text{ kW/m}$), con direcciones entre 6° y 138° , y abarca los tipos de climas de oleaje tropicales y polares. La variación de los tipos de climas de oleajes tropicales está relacionada con los vientos alisios y las fluctuaciones de las celdas de Hadley; mientras que la de los polares, con las bajas presiones polares. Estos climas de oleaje y sus respuestas a la variación de los sistemas de presiones y vientos planetarios, establecen una mejor comprensión de la vinculación que existe entre el oleaje y las variaciones climáticas de gran escala, permitiendo un análisis causal entre oleaje, variabilidad natural y calentamiento global, necesario para una cuantificación más precisa de los impactos que el clima futuro desencadene en el oleaje.

Variabilidad natural vs. calentamiento global en los climas globales del oleaje

Una vez clasificado el oleaje en tipos de climas, se obtuvieron características representativas de cada uno de ellos, los promedios mensuales de la dirección media y potencia de cada clima. Se analizó la tendencia de largo plazo y las anomalías compuestas (una vez quitada la tendencia) para las fases de ENSO y ENSO, acoplado con SAM y PDO. Las anomalías compuestas y tendencias, mostradas en la Tabla 1, son solo aquellos valores estadísticamente significativos para el nivel de confianza del 95 %.

La variabilidad natural está inducida por patrones climáticos, como son el ENSO, PDO, SAM, que modifican la intensidad y dirección del oleaje. El SAM es el modo de variación polar del hemisferio sur y genera en su fase positiva,

una intensificación de los vientos y oleajes en la franja extratropical de este hemisferio. El ENSO, en su fase El Niño (fase positiva), debilita los vientos alisios e intensifica los vientos y oleajes de la región extratropical de Pacífico (Echevarria *et al.*, 2020; Odériz *et al.*, 2020b). El PDO es un fenómeno que ocurre en las latitudes medias del Pacífico central-norte, y tiene un comportamiento similar al del ENSO, por tanto, cuando ocurren simultáneamente, se acentúa el patrón del ENSO (Bromirski *et al.*, 2013; Odériz *et al.*, 2020a).

En este trabajo se identificó que el oleaje extratropical tiene una respuesta muy alta en los patrones climáticos (ENSO, PDO y SAM). El Niño intensifica los oleajes extratropicales en el Pacífico norte, y este efecto se amplifica cuando las fases positivas de ENSO y PDO ocurren simultáneamente. Otros estudios ya habían detectado esta respuesta del oleaje al ENSO (Izaguirre *et al.*, 2011; Odériz *et al.*, 2020b; Shimura *et al.*, 2013; Stopa & Cheung, 2014) y al PDO (Bromirski *et al.*, 2013; Odériz *et al.*, 2020a), individualmente.

En el cinturón extratropical del hemisferio sur la variabilidad natural es muy importante (Clem *et al.*, 2020; Hemer *et al.*, 2010), y los resultados muestran que un SAM positivo, acoplado a ENSO, intensifica la potencia de los oleajes extratropicales del océano Índico y del Pacífico sur.

La Niña (fase negativa del ENSO) produce un incremento de energía en los oleajes monzónicos del océano Índico, causado por el incremento que se produce en el gradiente de presiones entre el océano Índico y el Pacífico oriental (Wang, B. *et al.*, 2000; Wang, H. *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 1996).

Las tendencias de largo plazo de la potencia mensual de cada tipo de clima de oleaje se analizaron en el mismo periodo que el análisis de la variabilidad natural (1985–2018). El aumento de la energía de las olas en los océanos Índico y Atlántico sur coincide con un aumento en la potencia del

Wave Climates	Wave Climates Types (WCTs)	Ocean Basin
Easterlies	Polar	North Atlantic, North Pacific Oceans
	Tropical	Atlantic, Pacific, Indian Oceans
Southerlies	Subtropical	South Pacific, North Pacific, North Atlantic, South Atlantic, Indian Oceans
	Subpolar	North Atlantic, North Pacific Oceans
Westerlies	Extratropical	South Pacific, North Pacific, North Atlantic, South Atlantic, and Indian Oceans
	Monsoon	Indian Ocean
	Warm Pool	Indian and Pacific Oceans

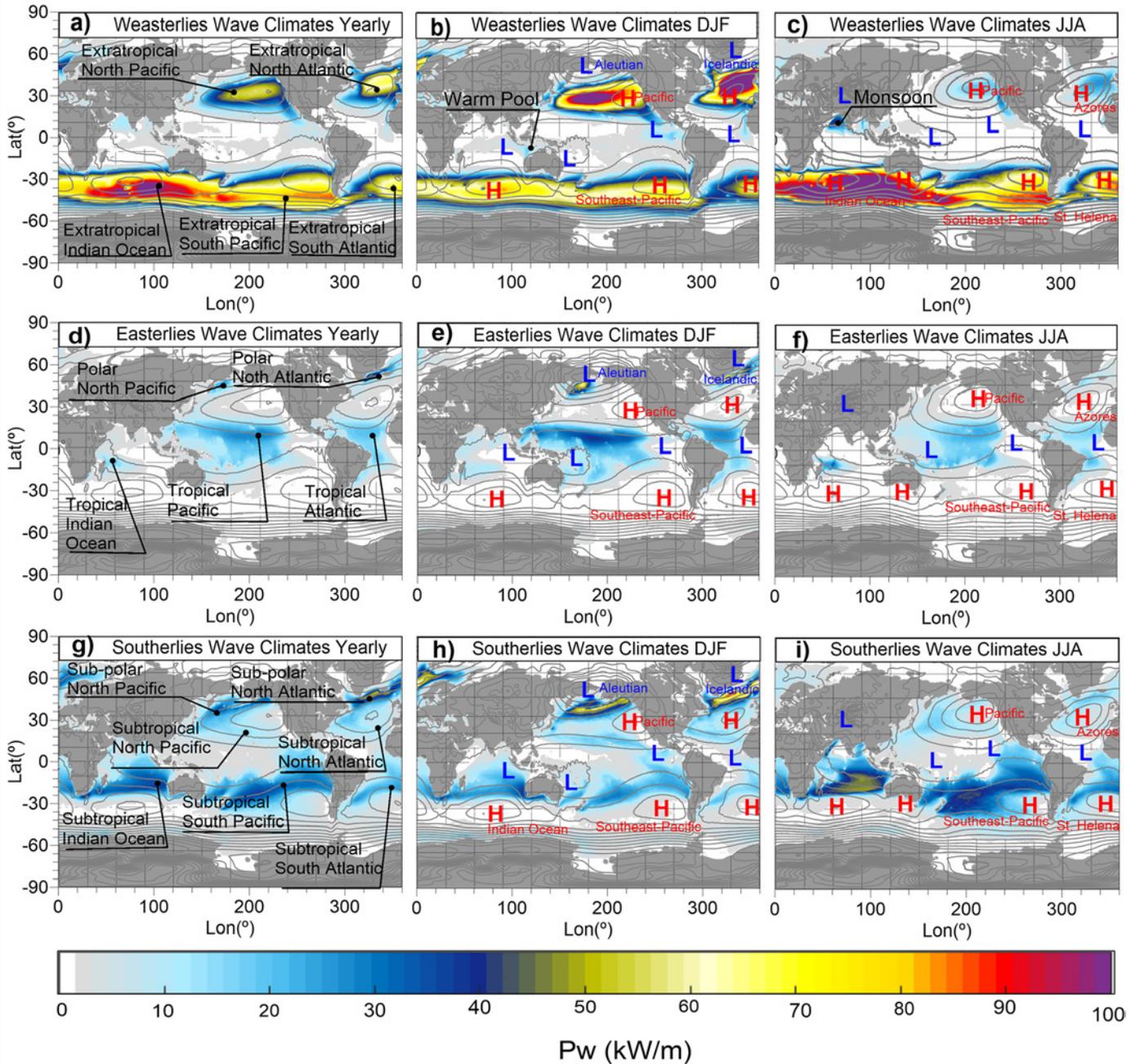
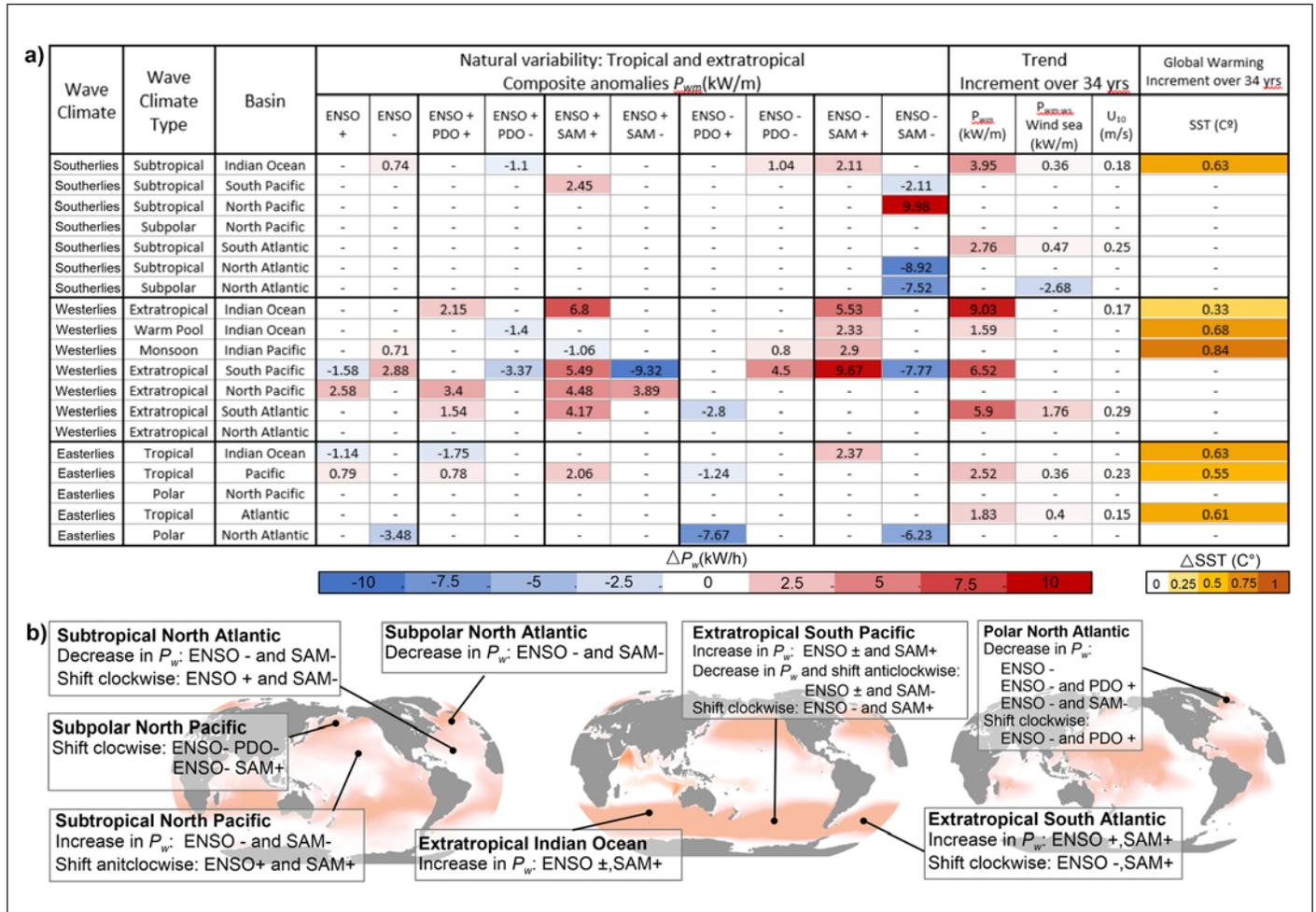


Figura 2. Tipos de clima de oleaje y sus variaciones estacionales obtenidos mediante agrupación dinámica (Odériz et al. 2021,4).

Tabla 1. Anomalías compuestas y tendencias de largo plazo vinculados con el calentamiento global para cada tipo de clima de oleaje. Solo se consideran valores estadísticamente significativos al nivel de confianza de 95% (Odériz *et al.*, 2021, 4).



oleaje local y de la velocidad de los vientos. De manera similar, la velocidad del viento y la potencia de las olas (tanto para el oleaje total y oleaje local) de los climas tropicales, en los océanos Pacífico y Atlántico, registraron un aumento. Las regiones tropicales de los océanos Índico, Pacífico y Atlántico han experimentado un calentamiento de aproximadamente 0,6 °C, en las últimas décadas. Igualmente, en la región del *warm pool* se ha identificado un calentamiento y un aumento en la potencia. La región donde se genera el clima de oleaje monzón, tiene la tasa más alta de calentamiento de las regiones analizadas, casi de 1 °C, en los últimos 34 años; sin embargo, no hay una tendencia significativa de la energía del oleaje. Por el contrario, la energía del oleaje del océano Atlántico se ha reducido (Morim *et al.*, 2019; Reguero *et al.*, 2019), lo que en este estudio se demuestra que está asociado al clima de oleaje subpolar. Cabe decir que en este trabajo no se analizó el *Arctic Oscillation* ni la *North Atlantic Oscillation*, que son los patrones climáticos

que más impactan esta región.

En general, el aumento de energía del oleaje se concentra en el hemisferio sur, coincidiendo con trabajos que estudiaron las tendencias de la altura de ola significativa (Young *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2016; Ribal, & Young, 2019). Los cambios inducidos por el calentamiento global se encuentran fuera de los límites superiores de la variabilidad natural, en la energía del oleaje para los climas de oleaje *warm pool*, subtropicales y extratropicales del océano Índico y los tropicales del Atlántico y el Pacífico. Los oleajes extratropicales en el Pacífico sur mostraron un aumento de la potencia de las olas mayor a las anomalías inducidas por ENSO, aunque no se encontró una relación causal con las señales de calentamiento global. Además, esta tendencia fue superada por las variaciones inducidas cuando ENSO y SAM ocurrieron simultáneamente. Un patrón similar se identificó en el Atlántico norte, donde la energía del oleaje se ha reducido en las últimas décadas, pero esa tendencia fue superada cuando las fases negativas

de ENSO y SAM ocurrieron de forma acoplada. Por último, los tipos de clima de oleaje subtropical del Pacífico sur, el monzón, el extratropical del Pacífico norte, el tropical del océano Índico y los polares, mostraron una tendencia a largo plazo, que se mantiene dentro de los límites de la variabilidad natural.

Principales conclusiones

Se realizó una clasificación del clima de oleaje en tipos de clima aplicando un nuevo método de “agrupamiento dinámico”, lo que permitió identificar la variación espaciotemporal de estos climas y cuantificar su respuesta a variaciones naturales y al calentamiento global. Los resultados sugieren que la variabilidad natural es el principal impulsor de las variaciones de los climas de oleaje subtropical del océano Pacífico sur, el monzón, los extratropicales del Pacífico, el tropical del océano Índico y los polares durante los últimos 34 años. Los oleajes afectados por el calentamiento global son el *warm pool*, extratropicales y subtropicales del océano Índico y los tropicales de los océanos Atlántico y Pacífico.

Este estudio puede disminuir la incertidumbre de los impactos en el clima de oleaje proyectado a futuro y proporcionar información relevante sobre la cuantificación de la variabilidad natural y el calentamiento global, para las evaluaciones de peligros costeros, ya que los climas de oleaje con gran variabilidad natural pueden enmascarar una señal de calentamiento global que está emergiendo, pero, debido a las grandes fluctuaciones internas, esta señal tarda más en detectarse que en regiones con menos variación. Además, los patrones climáticos, también, se espera que cambien en el siguiente siglo; por ejemplo, se proyecta que ENSO (Cai *et al.*, 2015) y SAM (Arblaster *et al.*, 2011) se intensifiquen.

Referencias

- Arblaster, J. M., Meehl, G. A., & Karoly, D. J. (2011). Future climate change in the Southern Hemisphere: Competing effects of ozone and greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(2), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2010GL045384>
- Bromirski, P. D., Cayan, D. R., Helly, J., & Wittmann, P. (2013). Wave power variability and trends across the North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12), 6329–6348. <https://doi.org/10.1002/2013JC009189>
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., Collins, M., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Takahashi, K., Timmermann, A., Vecchi, G., Watanabe, M., & Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9), 849–859. <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>
- Clem, K. R., Fogt, R. L., Turner, J., Lintner, B. R., Marshall, G. J., Miller, J. R., & Renwick, J. A. (2020). Record warming at the South Pole during the past three decades. *Nature Climate Change*, 10(8), 762–770. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0815-z>
- Deser, C., Knutti, R., Solomon, S., & Phillips, A. S. (2012). Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change*, 2(11), 775–779. <https://doi.org/10.1038/nclimate1562>
- Duarte, C. M., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G. L., Castilla, J. C., Gattuso, J.-P., Fulweiler, R. W., Hughes, T. P., Knowlton, N., Lovelock, C. E., Lotze, H. K., Predragovic, M., Poloczanska, E., Roberts, C., & Worm, B. (2020). Rebuilding marine life. *Nature*, 580(7801), 39–51. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7>
- Echevarria, E. R., Hemer, M. A., Holbrook, N. J., & Marshall, A. G. (2020). Influence of the Pacific-South American Modes on the Global Spectral Wind-Wave Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8), e2020JC016354. <https://doi.org/10.1029/2020JC016354>
- Hemer, M. A., Church, J. A., & Hunter, J. R. (2010). Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *International Journal of Climatology*, 30(4), 475–491. <https://doi.org/10.1002/joc.1900>
- Young, I. R., Zieger, S., & Babanin, A. V. (2011). Global Trends in Wind Speed and Wave Height. *Science*, 332(6028), 451–456. <https://doi.org/10.1126/science.1197219>
- Izaguirre, C., Méndez, F. J., Menéndez, M., & Losada, I. J. (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters*, 38(10), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2011GL047302>
- Liu, Q., Babanin, A. V., Zieger, S., Young, I. R., & Guan, C. (2016). Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters. *Journal of Climate*, 29(22), 7957–7975. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0219.1>
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X. L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., Young, I., Brichenno, L., Camus, P., Casas-Prat, M., Erikson, L., Mentaschi, L., Mori, N., Shimura, T., Timmermans, B., Aarnes, O., Breivik, Ø., Behrens, A., Dobrynin, M., ... Andutta, F. (2019). Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9(9), 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>
- Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22026 LP – 22031. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>
- Odériz, I., Silva, R., Mortlock, T. R., & Mendoza, E. (2020a). Climate drivers of directional wave power on the Mexican coast. *Ocean Dynamics*, 70(9), 1253–1265. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01387-z>
- Odériz, I., Silva, R., Mortlock, T. R., & Mori, N. (2020b). ENSO Impacts on Global Wave Climate and Potential Coastal Hazards. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, n/a(n/a), e2020JC016464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020JC016464>
- Odériz, I., Silva, R., Mortlock, T. R., Mori, N., Shimura, T., Webb, A., Padilla-Hernández, R., & Villers, S. (2021). Natural Variability and Warming Signals in Global Ocean Wave Climates. *Geophysical Research Letters*, 48(11), e2021GL093622. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL093622>

- [org/10.1029/2021GL093622](https://doi.org/10.1029/2021GL093622)
- Reguero, B. G., Losada, I. J., & Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Ribal, A., & Young, I. R. (2019). 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. *Scientific Data*, 6(1), 77. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9>
- Shimura, T., Mori, N., & Mase, H. (2013). Ocean waves and teleconnection patterns in the northern hemisphere. *Journal of Climate*, 26(21), 8654–8670. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00397.1>
- Stopa, J. E., & Cheung, K. F. (2014). Periodicity and patterns of ocean wind and wave climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 5563–5584. <https://doi.org/10.1002/2013JC009729>
- Tebaldi, C., Arblaster, J. M., & Knutti, R. (2011). Mapping model agreement on future climate projections. *Geophysical Research Letters*, 38(23). <https://doi.org/10.1029/2011GL049863>
- Wang, B., Wu, R., & Fu, X. (2000). Pacific–East Asian Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate? *Journal of Climate*, 13(9), 1517–1536. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2)
- Wang, H., Kumar, A., Wang, W., & Xue, Y. (2012). Influence of ENSO on Pacific Decadal Variability: An Analysis Based on the NCEP Climate Forecast System. *Journal of Climate*, 25(18), 6136–6151. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00573.1>
- Zhang, R., Sumi, A., & Kimoto, M. (1996). Impact of El Niño on the East Asian Monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 74(1), 49–62. <https://doi.org/10.2151/jmsj1965.74.1.49>

Reconstrucción de alta resolución del monzón de América del Sur durante el Holoceno¹

Juan Pablo Bernal Uruchurtu²

Resumen

Las estalagmitas son archivos valiosos de cambio climático pasado, ya que durante su crecimiento almacenan información geoquímica que está modulada por las condiciones climáticas y ambientales imperantes. De esta manera, el estudio cuidadoso de dichos indicadores geoquímicos permite entender cambio y variabilidad climática en el pasado. En este estudio se presenta una reconstrucción de la dinámica atmosférica durante el Holoceno en el sureste de Brasil, a partir del análisis de elementos traza e isótopos de oxígeno en una estalagmita procedente de la cueva Botuverá. Los indicadores geoquímicos indican un fortalecimiento del sistema monzónico de América del Sur (SAMS) durante los últimos 10 mil años, con un cambio gradual de un sistema con gran cantidad de lluvia extratropical, al sistema actual dominado por lluvia de origen amazónico. Dicho cambio fue acompañado de un incremento en la cantidad de humedad que llegó a la zona. Asimismo, debido a la naturaleza de alta resolución del registro, es posible hacer inferencias sobre los principales agentes moduladores de la intensidad del SAMS a lo largo del Holoceno.

Palabras clave: Estalagmitas, Brasil, Indicadores Geoquímicos, Holoceno, Dinámica atmosférica pasada.

Abstract

Stalagmites are valuable archives of past climate change because they can store geochemical information modulated by the current climatic and environmental conditions at the time of growth. Careful analysis of such geochemical proxies allows the understanding of past climatic and environmental change events. Here, the variability of geochemical proxies in a stalagmite from Botuverá Cave, Southeastern Brazil, allows for the paleohydroclimatic reconstruction for the Holocene. The geochemical proxies reveal a strengthening of the Southamerican Monsoon System during the last 10-thousand years, with a gradual shift from extra-tropical rainfall to tropical (amazoninc) rainfall. Such shift resulted in a increment in the amount of rainfall reaching the area. Moreover, due to the high-resolution nature of the record presented here, it is possible to infer about the main forcing agents of SAMS intensity during the Holocene.

Keywords: stalagmites, Brazil, geochemical proxies, Holocene, past atmospheric dynamics.

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Bernal, J. P., Cruz, F., Strikis, N., Wang, X., Deininger, M., Catunda, M., Ortega-Obregón, C., Cheng, H., Edwards, L., & Auler, A. (2016). High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.008>
Esta contribución está basada en el artículo presentado por Juan Pablo Bernal y que fue premiado dentro de la Categoría 1 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Campus UNAM – Juriquilla, Querétaro, México. Correo: jpbernal@unam.mx

Introducción

El sistema monzónico de América del Sur (SAMS, por sus siglas en inglés) se refiere a la actividad convectiva profunda y la circulación atmosférica a escala sinóptica que ocurre sobre América del Sur durante el verano austral, y del cual depende una de las zonas de mayor biodiversidad del mundo: la selva amazónica (Carnaval *et al.*, 2009). Además, es la fuente de agua para la zona con mayor densidad de población del subcontinente. Debido a su importancia, ha sido materia de diversos estudios para comprender su variabilidad, así como su relación con el clima del Atlántico norte (por ejemplo: Cruz *et al.*, 2005a). Sin embargo, a excepción de los trabajos recientes (Bernal *et al.*, 2016), la comprensión de los factores que modularon su variabilidad, durante todo el Holoceno, cuando el clima cambió sustancialmente de un modo de alta insolación o uno de baja insolación, no habían sido identificados.

Con la finalidad de poder realizar reconstrucciones robustas, es necesario contar con registros continuos, con fechamiento absoluto y de alta resolución temporal, de manera que sea posible identificar los procesos de alta frecuencia que modulan la variabilidad hidroclimática en escalas de tiempo decadales a centenarias. Tales registros tienen el potencial de proveer información sobre el posible acoplamiento o desacoplamiento del sistema monzónico con distintos modos climáticos, así como la posibilidad de identificar el papel de la insolación solar sobre algunos eventos climáticos abruptos.

Los registros paleoclimáticos, basados en la variabilidad de la composición isotópica de oxígeno (expresada como $\delta^{18}\text{O}$) del carbonato de estalagmitas, son sumamente robustos. Normalmente $\delta^{18}\text{O}$ puede interpretarse como un reflejo de la composición isotópica del agua de lluvia local, la cual es, a su vez, una función de la cantidad de lluvia, la intensidad de la actividad convectiva o el origen de las masas de aire húmedo (Lachniet, 2009). Debido a que en el sureste de Brasil hay dos fuentes de humedad isotópicamente distintas que modulan la composición isotópica del agua de lluvia (Cruz *et al.*, 2005b), los registros solo indican el origen preponderante de las masas de aire húmedo. Sin embargo, no es posible obtener información sobre los cambios en la intensidad del monzón a partir de la composición $\delta^{18}\text{O}$ de las estalagmitas, por lo que es necesario contar con otros indicadores geoquímicos que provean información sobre la cantidad de lluvia y, por tanto, la intensidad del monzón.

En los últimos 15 años se ha desarrollado conocimiento sistemático sobre algunos de los procesos que modulan la variabilidad de elementos traza en el epikarst y, por consiguiente, su incorporación a estalagmitas (Fairchild *et al.*, 2000; Fairchild, & Treble, 2009; Sinclair, 2011; Wassenburg *et al.*, 2020). Lo anterior, aunado a la posibilidad de obtener

información de composición elemental bajo un contexto microespacial utilizando un sistema de ablación laser acoplado a un espectrómetro de masas (LA-ICP-MS), permite la construcción de registros con la más alta resolución temporal (por ejemplo: Treble, Shelley, & Chappell, 2003).

En el presente trabajo se presenta un registro de alta resolución de la composición de elementos traza en una estalagmita del sur de Brasil. El registro fue obtenido utilizando LA-ICP-MS, y corresponde al registro más detallado del Holoceno para dicha zona. El trabajo realizado por Bernal *et al.* (2016) demostró que la variabilidad elemental está modulada por cambios en la humedad del Karst y, por esta razón, son buenos indicadores de la cantidad de lluvia. Lo anterior permite identificar diversos modos climáticos (como la variabilidad decadal del Atlántico) y agentes forzadores (variabilidad solar) que han modulado la intensidad del sistema monzónico de América del Sur, lo que permite determinar que la evolución del SAMS ha sido el resultado de la interacción compleja de diversos agentes forzadores.

Muestras y métodos

La cueva de Botuverá se encuentra en el estado de Santa Catarina, en el sureste de Brasil (Figura 1), está hospedada dentro de una secuencia de carbonatos y sedimentos pertenecientes al grupo Brusque (Auler, 2002). Las características climáticas de la zona han sido previamente descritas (Cruz *et al.*, 2007). La estalagmita BTV21a tiene 22.5 cm de largo y fue colectada en el 2022; no presenta evidencia de redisolución, hiatos, ni cambios en la dirección de crecimiento. Se extrajeron muestras para realizar 13 fechamientos U-Th en el Minnesota Isotope Laboratory, University of Minnesota y en el Earth Observatory of Singapore, utilizando los métodos descritos previamente (Shen *et al.*, 2002). Asimismo, se extrajeron 300 submuestras para realizar análisis de la composición isotópica de O y C en la Universidad de Minnesota. La composición de elementos traza se obtuvo utilizando LA-ICP-MS en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM. Los detalles analíticos pueden encontrarse en Bernal *et al.* (2016). El análisis por periodicidades se realizó a través de un análisis espectral con filtro de ruido rojo (Schulz, & Mudelsee, 2002) implementado en el programa PAST (Hammer, Harper, & Ryan, 2001); el análisis de onduletas se realizó utilizando las rutinas de Grinsted, Moore, & Jevrejeva (2004).

1. Resultados

El fechamiento de la estalagmita BTV21a indica que creció de manera continua desde 9118 \pm 17 años B.P. hasta 300 años B.P., con una tasa promedio de crecimiento de 28 \pm 4 mm por año. No obstante, entre 7000 y 8000 B.P. y 1300 y

300 B.P., la tasa de crecimiento decreció significativamente a 17 y 9.5 mm por año.

El análisis de la composición isotópica de oxígeno de la calcita de la estalagmita BTV21 registra una variación gradual desde -2.1‰ (VDPB) en el Holoceno temprano, hasta -4.4‰ (VPDB) en el Holoceno tardío. Dicha variación ha sido previamente observada en otras estalagmitas contemporáneas obtenidas también en la cueva de Botuverá (Cruz *et al.*, 2005a; Wang, & Fiedler, 2006; Wang *et al.*, 2004), lo cual indica que las estalagmitas crecieron en equilibrio isotópico con el agua de goteo, reflejando el incremento gradual en intensidad del monzón de América del Sur a lo largo del Holoceno.

El registro de elementos traza está compuesto de cerca de cincuenta mil puntos independientes, que constituyen una serie de tiempo continuo de resolución subanual. Se obtuvo un promedio móvil utilizando una ventana cuadrada de 200 puntos, la cual fue utilizada para el resto de las interpretaciones de este trabajo. La relación Mg/Ca y Sr/Ca de la estalagmita varía entre 200 y 350 mmol/mol y 35-60 mmol/mol, respectivamente; mientras que la relación Ba/Ca se encuentra en el rango entre 0.5 y 1.1 mmol/mol. En general, se observa que las relaciones elementales presentan una covarianza evidente a lo largo del registro y, en general, decrecen de manera gradual a partir de los 7300 años B.P; a excepción de los últimos 1000 años, cuando el registro Mg/Ca presenta dos excursiones abruptas hacia valores muy altos.

Son diversos los procesos geoquímicos que pueden modular la variabilidad de las relaciones Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en la estalagmita. Dichos procesos han sido estudiados con precisión en diversas investigaciones (Day, & Henderson, 2013; Fairchild *et al.*, 2000; Sinclair, 2011; Tremaine, & Froelich, 2013; Wassenburg *et al.*, 2020), y han permitido determinar que la variabilidad está modulada, principalmente, por precipitación previa de calcita en el epikarst (Bernal, *et al.*, 2016); un proceso en el que la escasez de agua en la zona no saturada del Karst modula la precipitación de calcita al interior de grietas y huecos, lo que conlleva el enriquecimiento de elementos no compatibles con la calcita, tales como Mg, Sr y Ba, en el agua de formación de la estalagmita. De manera contraria, cuando el Karst se encuentra saturado, la precipitación de calcita no se lleva a cabo, por lo que no habrá enriquecimiento de dichos elementos en el agua de formación de la estalagmita. De esta manera, los valores bajos de Sr/Ca y Ba/Ca reflejan a un epikarst saturado, resultado de un sistema monzónico con lluvia abundante; mientras que valores altos de Sr/Ca y Ba/Ca se interpretan como indicadores de un epikarst seco, resultado de escasas lluvias.

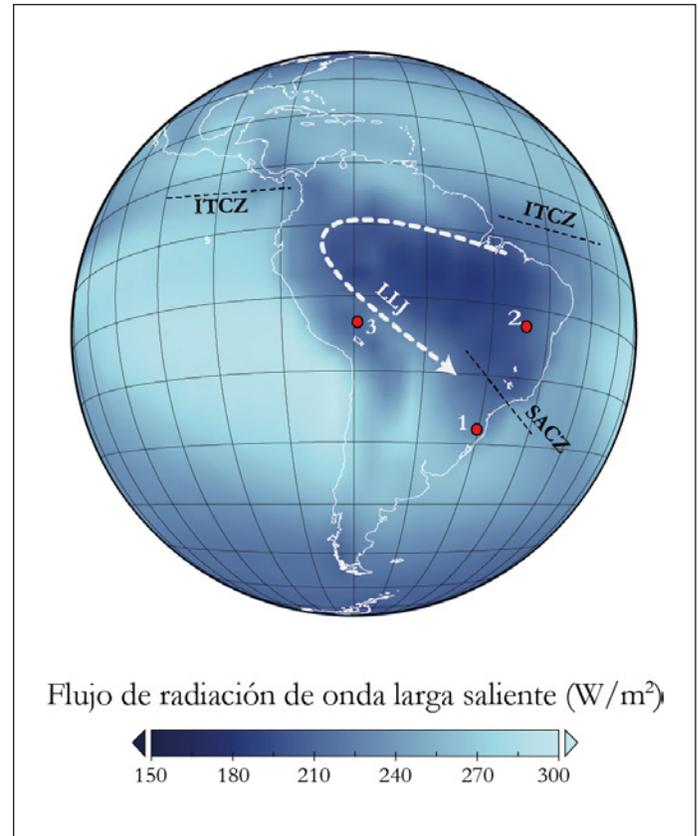


Figura 1. Mapa de flujo de radiación de onda larga saliente promedio (OLR) de octubre a marzo (verano austral), para el periodo 1980-2010. Zonas más oscuras muestran mayor actividad convectiva: 1) cueva de Botuverá, 2) cueva de Lapa Grande, 3) cueva Huacapo. ITCZ: Zona Intertropical de Convergencia, SACZ: Zona de Convergencia de América del Sur. La línea blanca punteada muestra la corriente de chorro de bajo nivel (LLJ) que hace llegar humedad del Amazonas al sureste de Brasil. (Modificada de Bernal *et al.*, 2016).

La relación Sr/Ca y Ba/Ca en la estalagmita está correlacionada con la composición isotópica de la calcita, con un coeficiente de correlación Sr/Ca vs $\delta^{18}\text{O} = 0.8794$, y 0.7726 para Ba/Ca vs $\delta^{18}\text{O}$. En conjunto, el registro de $\delta^{18}\text{O}$ y Sr/Ca de la estalagmita BTV21a permite realizar una poderosa reconstrucción paleohidrológica del monzón de América del Sur, en el que es posible determinar la dinámica atmosférica pasada, así como sus consecuencias sobre el sureste de Brasil. Dado que la composición isotópica de la calcita es un indicador de la circulación atmosférica en el sureste de Brasil, con valores muy bajos de $\delta^{18}\text{O}$ como indicadores de fuentes de humedad amazónicas, y valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ como indicador de fuente de humedad extra tropical del Atlántico sur (Cruz *et al.*, 2005b), la buena correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y Sr/Ca señala que el incremento, en el arribo de lluvia

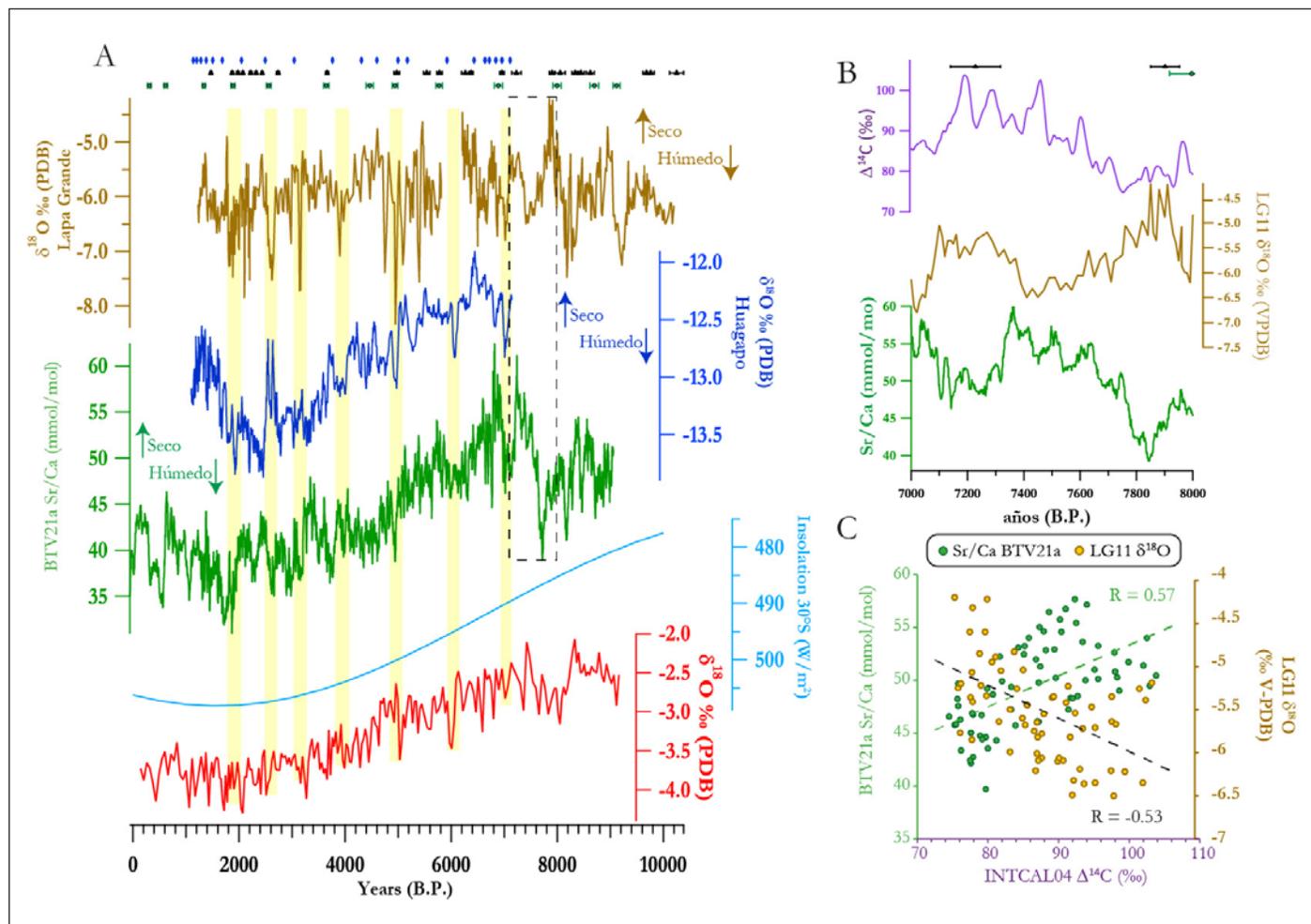


Figura 2. A) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ (rojo) y Sr/Ca (verde) de la estalagmita BTV21, comparado con Insolación de febrero a 30°S , azul claro (Berger y Loutre, 1991), registro de $\delta^{18}\text{O}$ de estalagmita cueva Huacapo, azul oscuro (Kanner *et al.*, 2013), y registro $\delta^{18}\text{O}$ de estalagmita de Lapa Grande, café (Strikis *et al.*, 2011). B) Comparación de registro Sr/Ca de BTV21a contra $\delta^{18}\text{O}$ de Lapa Grande para el periodo entre 7000 y 8000 años B.P., y el registro de exceso de ^{14}C en anillos de árbol y corales (Reimer *et al.*, 2004) C) Regresión Sr/Ca BTV21a vs ^{14}C y $\delta^{18}\text{O}$ Lapa Grande vs ^{14}C . (Modificada de Bernal *et al.*, 2016).

amazónica a lo largo del Holoceno, fue acompañado de una intensificación del monzón de América del Sur, y sugiere que el sistema monzónico ha sido el régimen preponderante a lo largo del Holoceno en el sureste de Brasil.

Variabilidad hidroclimática en el sureste de Brasil a escala milenaria y centenaria

Los valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ en el registro de Botuverá ($\delta^{18}\text{O}$ promedio -2.5 ± 0.1) indican que, durante el Holoceno temprano, el monzón de América del Sur estaba dominado por masas de aire extratropical provenientes del Atlántico sur, y que las fuentes de humedad amazónicas no eran tan preponderantes. Aunado con el registro de Sr/Ca, es posible establecer que lo anterior resultó en un sistema monzónico con intensidad altamente variable y en baja humedad total. Durante el Holoceno medio (5000-6000 años), se observa

una mayor contribución de humedad amazónica, pero la cantidad de precipitación reflejada en Sr/Ca se mantuvo similar al Holoceno temprano. Estas interpretaciones son congruentes con otros registros paleoclimáticos de la zona, por ejemplo, el Holoceno temprano está caracterizado por tasas de sedimentación bajas en la cuenca del Río de la Plata (Razik *et al.*, 2013), consistente con un sistema monzónico deprimido. El Holoceno tardío está caracterizado por un sistema monzónico más intenso de todo el registro, con mayor contribución de precipitación de origen amazónico y mayor cantidad de precipitación. De manera general, la intensificación gradual del SAMS a lo largo del Holoceno, con una mayor contribución de lluvia amazónica, responde al incremento gradual de insolación de verano austral, así como a la migración austral de la ITCZ durante este periodo (Haug *et al.*, 2001).

El registro Sr/Ca de la estalagmita muestra una serie de excursiones de escala decadal, hacia condiciones más húmedas, lo que sugiere exaltaciones del sistema monzónico. Excursiones similares han sido observadas en otros registros paleoclimáticos del Centro de Brasil (Stríkis *et al.*, 2011) y del Amazonas (Kanner *et al.*, 2013), y que han sido interpretados como una respuesta del sistema monzónico al enfriamiento abrupto en el Atlántico norte, debido al incremento periódico de glaciares marinos circulando en dicha zona (Bond *et al.*, 2001). Estas excursiones son más evidentes a partir del Holoceno medio (5000-6000 años), cuando la contribución de humedad procedente del Amazonas es más significativa, siendo la más visible la que ocurre ~5000 años B.P., la cual corresponde al cambio más importante de temperatura superficial en el Atlántico norte durante el Holoceno (Bond *et al.*, 2001).

La coincidencia de eventos húmedos a lo largo de América del Sur apunta a una intensificación del SAMS como resultado de bajos valores de SST en el Atlántico norte. La cobertura geográfica de estos eventos sugiere que la intensificación del SAMS consistió en una expansión de la zona de convergencia de América del Sur (SACZ), que exaltó la precipitación pluvial en la mayor parte del subcontinente. Dichas expansiones de SACZ durante periodos de baja SST

en el Atlántico han sido previamente documentadas durante periodos glaciales (Stríkis *et al.*, 2015 y 2018). El incremento en precipitación y el reforzamiento del sistema monzónico que se observa en estos registros, coincidentes con periodos de bajas temperaturas superficiales en el Atlántico norte, puede ser el resultado del ajuste hacia el sur de la latitud promedio de la ITCZ en el verano austral, incrementando la cantidad de humedad conducida hacia el Amazonas y, eventualmente, al sureste de Brasil.

A pesar de la correspondencia directa del registro de BTV21a con otros registros contemporáneos, existen también periodos en los que se encuentran anticorrelacionados, por ejemplo: durante el periodo entre 7 y 8 mil años, el registro Sr/Ca de Botuverá presenta dos eventos centrados en 7.8 y 7.2 ka, en los que la humedad alcanzó niveles cercanos a lo observado en el Holoceno tardío, los cuales van acompañados de un ligero descenso en el $\delta^{18}\text{O}$ de la calcita, indicando un incremento en el arribo de masas de aire húmedo del Amazonas. De manera contrastante, el registro de Lapa Grande, del centro de Brasil, muestra dos excursiones contemporáneas de ~1 por mil hacia valores menos negativos, señalando una supresión del sistema monzónico en dicha zona. Es probable que dicho comportamiento contrastante sea resultado de la migración norte-sur del SACZ, resultando en condiciones

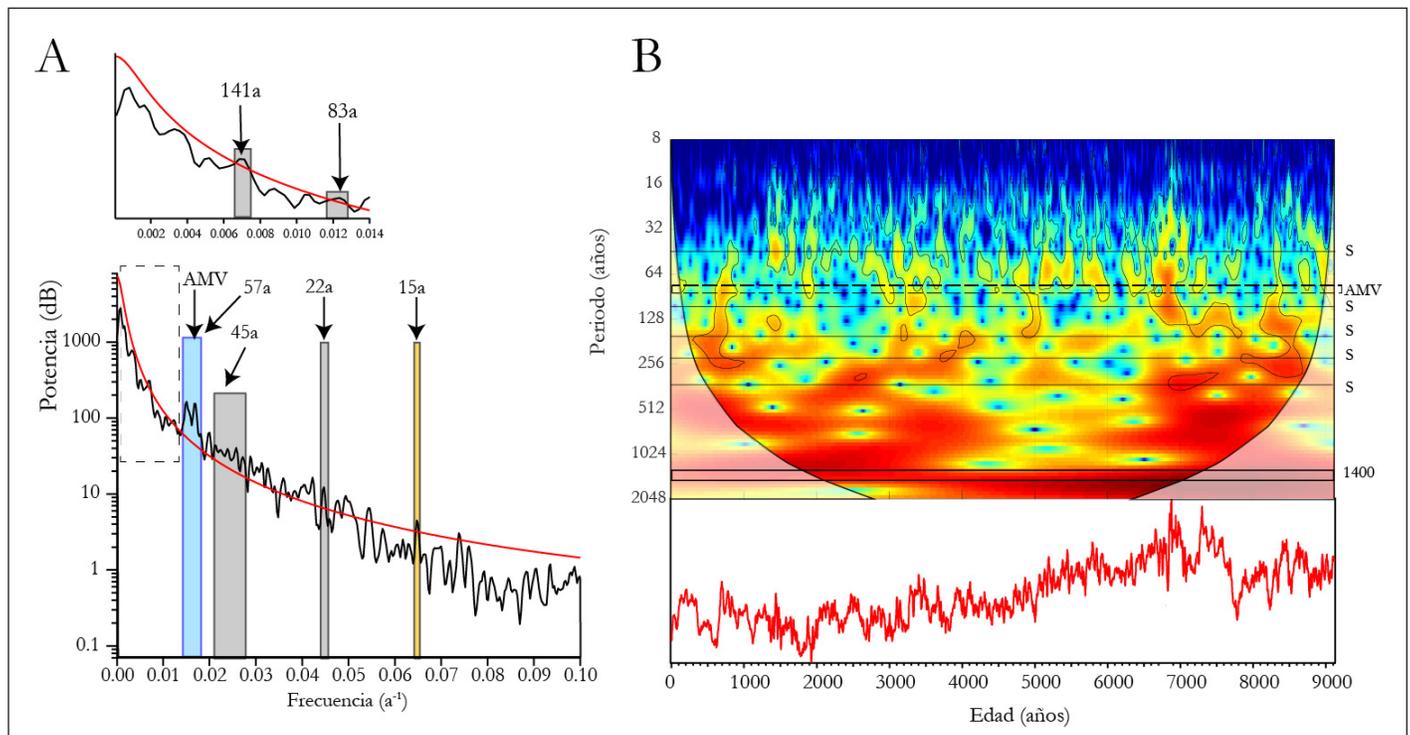


Figura 3. A) Análisis espectral de la serie de tiempo Sr/Ca de la estalagmita BTV21a, la línea roja establece el límite ($\chi^2 = 99\%$) de confiabilidad para la discriminación del ruido rojo. Se señalan las principales frecuencias que se interpretan. AMV: Atlantic Multi-decadal Variability. B) Análisis de onduletas de la misma serie de tiempo, S: periodicidad solar detectada, 1400: Periodicidad de 1400 años. (Modificada de Bernal *et al.*, 2016).

húmedas en el sureste de Brasil, en cambio, secas en el centro. Es de resaltar que cuando el registro de Sr/Ca de Botuverá se compara con el exceso de ^{14}C observado en corales y anillos de árbol, y que se interpreta como un indicador de radiación solar (Reimer *et al.*, 2004), se observa que los dos registros están íntimamente correlacionados ($R = 0.57$) lo que, en conjunto, indica que la posición de la SACZ, y por lo tanto, las condiciones hidroclimáticas en el centro y sureste de Brasil, durante el Holoceno temprano, estuvieron moduladas, principalmente, por la actividad solar.

Detección de señales periódicas y modos climáticos

El registro Sr/Ca de BTV21a fue analizado por la presencia de señales periódicas transientes que pudieran revelar el efecto de diversos agentes forzadores en escalas milenarias, centenarias y decadales. Con tal fin, la serie de tiempo fue remuestreada en escala anual, y analizada por la presencia de señales periódicas a través del análisis espectral y onduletas de la serie de tiempo utilizando un filtrado de ruido rojo (Schulz, & Mudelsee, 2002). El análisis espectral y de onduletas revela una serie de señales periódicas cuasipersistentes a lo largo del Holoceno, pero la mayoría de ellas no son constantes a lo largo del periodo de crecimiento de la estalagmita.

Las señales más importantes en el análisis espectral y de onduletas corresponden a periodos de oscilación de la SST en el Atlántico norte, reflejadas como una señal intensa entre 75-55 años, que es idéntica al patrón de la Variabilidad Multidecadal del Atlántico (Mann *et al.*, 2021), anteriormente conocida como AMO. Esta señal no es constante en el análisis de onduletas, lo que indica que la modulación del SAMS por la AMV ha sido intermitente a lo largo del periodo de crecimiento de la estalagmita. Dicha modulación esporádica ha sido observada en otros registros paleoclimáticos de América del Sur (Bird *et al.*, 2011; Chiessi *et al.*, 2009; Novello *et al.*, 2012; Vuille *et al.*, 2012); sin embargo, no es posible establecer una respuesta específica del SAMS a la AMV, ya que los periodos donde la señal de AMO parece ser significativa, no está asociada necesariamente con debilitamientos o reforzamientos del sistema monzónico. El análisis de onduletas revela también una señal persistente milenaria de 1400 años, la cual es asociada con los cambios en SST en el Atlántico norte, debido al incremento de icebergs en dicha zona (Bond *et al.*, 2001) y, como se demostró arriba, resulta en un incremento en la precipitación en el sureste de Brasil.

El análisis espectral revela la presencia de varias oscilaciones centradas en 141, 85, 67, 57 y 45 años, las cuales son idénticas a las periodicidades observadas de actividad solar,

basada en registros de ^{14}C en anillos de árboles (Stuiver, & Braziunas, 1989). De manera adicional, el análisis de onduletas evidencia dos señales persistentes a lo largo del registro correspondientes a 420 y 210 años, también asociadas a la actividad solar (Stuiver, & Braziunas, 1989). Esto implica que, de manera adicional a la modulación de SAMS por la insolación solar en escala orbital (Cruz *et al.*, 2005b; Wang *et al.*, 2006), la actividad solar modula la intensidad del SAMS en el sureste brasileño en escalas centenarias y decadales, y dicha modulación ha sido persistente a lo largo del Holoceno.

Además, el análisis espectral registra la presencia de varias señales periódicas de alta frecuencia (< 50 años) que son difíciles de interpretar. Por ejemplo, la señal correspondiente a los 22 años puede corresponder a los ciclos solares Hale (Attolini *et al.*, 1990); mientras que las de 14 y 18 años pueden corresponder a las señales decadales de ENSO (Mann, & Park, 1994). En cambio, la señal de 15 años puede corresponder a la variabilidad decadal de SACZ (Robertson, & Mechoso, 2000). Asimismo, dado que la precipitación extratropical es significativa en el sureste de Brasil, no puede descartarse que el arribo de esta tenga un grado de modulación por el modo anular del sur, tal y como se observa en el suroeste de Sudamérica (Mundo *et al.*, 2012). Cabe mencionar que ninguna de estas oscilaciones es persistente a lo largo de todo el registro, y la mayoría solo se observan durante los últimos 1500 años; no obstante, son indicadores de la gran cantidad de procesos atmosféricos y oceánicos que modulan la intensidad del SAMS en escala decadal y centenaria, y reflejan la complejidad de dichas interacciones.

Conclusiones

En el presente trabajo se ha expuesto, de manera resumida, una reconstrucción paleohidroclimática del monzón de América del Sur de alta resolución, la cual permite detectar los principales agentes moduladores de este a escalas milenarias, centenarias y decadales. En general, los dos principales factores que han modulado la intensidad del monzón es la radiación solar y las condiciones de temperatura superficial del océano en el Atlántico norte. La radiación solar afecta el SAMS *vía* a la cantidad de radiación solar de verano, posiblemente modulando evapotranspiración; así como la actividad solar, posiblemente modulando la formación de partículas de nucleación de las nubes. Por otra parte, la temperatura superficial del océano en el Atlántico norte modula la intensidad del monzón *vía* la ITCZ, ya que, al disminuir la temperatura del océano a latitudes altas, la ITCZ se desplaza al sur, incrementando la cantidad de humedad que arriba en el Amazonas y que, eventualmente, es trasladada al sureste de Brasil.

A pesar de que el registro de isótopos de oxígeno y elementos traza de la estalagmita BTV21a representa el registro de variabilidad de SAMS más detallado y de mayor resolución disponible, este revela, asimismo, que de manera adicional a la SST del Atlántico norte y la actividad solar, la intensidad de SAMS es también modulada por factores adicionales no discernibles en este registro, y que requieren el estudio a mayor resolución temporal (anual a subanual) que permita detectar con mayor claridad los posibles efectos de diversas oscilaciones atmósfera-océano, tales como ENSO, PDO, SAM, entre otras. Lo anterior es vital para poder refinar y validar modelos de circulación atmosférica global y disminuir la incertidumbre sobre las posibles consecuencias hidrológicas del cambio climático antropogénico.

Referencias

- Attolini, M. R., Cecchini, S., Galli, M., & Nanni, T. (1990). On the persistence of the 22 y solar cycle. *Solar Physics*, 125(2), 389-398. <https://doi.org/10.1007/BF00158414>
- Auler, A. (2002). Karst areas in Brazil and the potential for major caves—an overview. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, 36, 29-35.
- A. Berger y M. F. Loutre (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10, 397-317 [http://dx.doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90033-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0277-3791(91)90033-Q)
- Bernal, J. P., Cruz, F. W., Strikis, N. M., Wang, X., Deininger, M., Cantunda, M. C. A., Ortega-Obregón, C., Cheng, H., Edwards, R. L., & Auler, A. S. (2016). High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.008>
- Bird, B. W., Abbott, M. B., Vuille, M., Rodbell, D. T., Stansell, N. D., & Rosenmeier, M. F. (2011). A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(21), 8583-8588. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003719108>
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., & Bonani, G. (2001). Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science*, 294(5549), 2130-2136.
- Carnaval, A. C., Hickerson, M. J., Haddad, C. F. B., Rodrigues, M. T., & Moritz, C. (2009). Stability Predicts Genetic Diversity in the Brazilian Atlantic Forest Hotspot. *Science*, 323(5915), 785-789. <https://doi.org/10.1126/science.1166955>
- Cruz, F. W., Burns, S. J., Jercinovic, M., Karmann, I., Sharp, W. D., & Vuille, M. (2007). Evidence of rainfall variations in Southern Brazil from trace element ratios (Mg/Ca and Sr/Ca) in a Late Pleistocene stalagmite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(9), 2250-2263. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.02.005>
- Cruz, F. W., Burns, S. J., Karmann, I., Sharp, W. D., Vuille, M., Cardoso, A. O., Ferrari, J. A., Silva Dias, P. L., & Viana, O. (2005a). Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434(7029), 63-66. <https://doi.org/10.1038/nature03365>
- Cruz, F. W., Karmann, I., Viana, J., Oduvaldo, Burns, S. J., Ferrari, J. A., Vuille, M., Sial, A. N., & Moreira, M. Z. (2005b). Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: Implications for paleoclimate inferences from speleothems. *Chemical Geology*, 220(3-4), 245-262. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.001>
- Chiessi, C. M., Mulitza, S., Pätzold, J., Wefer, G., & Marengo, J. A. (2009). Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(21). <https://doi.org/10.1029/2009GL039914>
- Day, C. C., & Henderson, G. M. (2013). Controls on trace-element partitioning in cave-analogue calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 120, 612-627. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.05.044>
- Fairchild, I. J., Borsato, A., Tooth, A. F., Frisia, S., Hawkesworth, C. J., Huang, Y., McDermott, F., & Spiro, B. (2000). Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 166(3-4), 255-269. doi:10.1016/S0009-2541(99)00216-8
- Fairchild, I. J., & Treble, P. C. (2009). Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 449-468. doi:10.1016/j.quascirev.2008.11.007
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., & Rohl, U. (2001). Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene. *Science*, 293(5533), 1304-1308. <https://doi.org/10.1126/science.1059725>
- Kanner, L. C., Burns, S. J., Cheng, H., Edwards, R. L., & Vuille, M. (2013). High-resolution variability of the South American summer monsoon over the last seven millennia: insights from a speleothem record from the central Peruvian Andes. *Quaternary Science Reviews*, 75, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.05.008>
- Lachniet, M. S. (2009). Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 412-432. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.10.021>
- Mann, M. E., & Park, J. (1994). Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D12), 25819-25833. <https://doi.org/10.1029/94JD02396>

- Mann, M. E., Steinman, B. A., Brouillette, D. J., & Miller, S. K. (2021). Multidecadal climate oscillations during the past millennium driven by volcanic forcing. *Science*, 371(6533), 1014-1019. <https://doi.org/10.1126/science.abc5810>
- Mundo, I. A., Masiokas, M. H., Villalba, R., Morales, M. S., Neukom, R., Le Quesne, C., Urrutia, R. B., & Lara, A. (2012). Multi-century tree-ring based reconstruction of the Neuquén River streamflow, northern Patagonia, Argentina. *Climate of the Past*, 8(2), 815-829. <https://doi.org/10.5194/cp-8-815-2012>
- Novello, V. F., Cruz, F. W., Karmann, I., Burns, S. J., Strikis, N. M., Vuille, M., Cheng, H., Lawrence Edwards, R., Santos, R. V., Frigo, E., & Barreto, E. A. S. (2012). Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophysical Research Letters*, 39(23), L23706. <https://doi.org/10.1029/2012GL053936>
- Razik, S., Chiessi, C. M., Romero, O. E., & von Döbenek, T. (2013). Interaction of the South American Monsoon System and the Southern Westerly Wind Belt during the last 14,000 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 374(0), 28-40. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.12.022>
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Lawrence Edwards, R., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J., & Weyhenmeyer, C. E., (2004). IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46(3), 1029-1058.
- Robertson, A. W., & Mechoso, C. R. (2000). Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone. *Monthly Weather Review*, 128(8), 2947-2957. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2947:IAIVOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2947:IAIVOT>2.0.CO;2)
- Schulz, M., & Mudelsee, M. (2002). REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 28(3), 421-426.
- Shen, C.-C., Lawrence Edwards, R., Cheng, H., Dorale, J. A., Thomas, R. B., Bradley Moran, S., Weinstein, S. E., & Edmonds, H. N. (2002). Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemical Geology*, 185(3-4), 165-178. doi:10.1016/s0009-2541(01)00404-1
- Sinclair, D. J. (2011). Two mathematical models of Mg and Sr partitioning into solution during incongruent calcite dissolution: Implications for dripwater and speleothem studies. *Chemical Geology*, 283(3-4), 119-133. [doi:10.1016/j.chemgeo.2010.05.022](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.05.022)
- Strikis, N. M., Cruz, F. W., Barreto, E. A. S., Naughton, F., Vuille, M., Cheng, H., Voelker, A. H. L., Zhang, H., Karmann, I., Lawrence Edwards, R., Auler, A. S., Ventura Santos, R., & Sales, H. R. (2018). South American monsoon response to iceberg discharge in the North Atlantic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(15), 3788-3793. [doi:10.1073/pnas.1717784115](https://doi.org/10.1073/pnas.1717784115)
- Strikis, N. M., Cruz, F. W., Cheng, H., Karmann, I., Lawrence Edwards, L., Vuille, M., Wang, X., de Paula, M. S., Novello, V. F., & Auler, A. S. (2011). Abrupt variations in South American monsoon rainfall during the Holocene based on a speleothem record from central-eastern Brazil. *Geology*, 39(11), 1075-1078. [doi:10.1130/G32098.1](https://doi.org/10.1130/G32098.1)
- Strikis, N. M., Chiessi, C. M., Cruz, F. W., Vuille, M., Cheng, H., de Souza Barreto, E. A., Mollenhauer, G., Kasten, S., Karmann, I., Lawrence Edwards, R., Bernal, J. P., & Sales, H. d. R. (2015). Timing and structure of Mega-SACZ events during Heinrich Stadial 1. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5477. [doi:10.1002/2015GL064048](https://doi.org/10.1002/2015GL064048)
- Stuiver, M., & Braziunas, T. F. (1989). Atmospheric ¹⁴C and century-scale solar oscillations. *Nature*, 338(6214), 405-408.
- Treble, P., Shelley, J. M. G., & Chappell, J. (2003). Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(1-2), 141-153. [DOI: 10.1016/S0012-821X\(03\)00504-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00504-1)
- Tremaine, D. M., & Froelich, P. N. (2013). Speleothem trace element signatures: A hydrologic geochemical study of modern cave dripwaters and farmed calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121(0), 522-545. [doi:10.1016/j.gca.2013.07.026](https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.07.026)
- Vuille, M., Burns, S. J., Taylor, B. L., Cruz, F. W., Bird, B. W., Abbott, M. B., . . . Novello, V. F. (2012). A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past*, 8(4), 1309-1321. [doi:10.5194/cp-8-1309-2012](https://doi.org/10.5194/cp-8-1309-2012)
- Wang, C., & Fiedler, P. C. (2006). ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress In Oceanography*, 69(2-4), 239-266.
- Wang, X., Auler, A. S., Edwards, R. L., Cheng, H., Cristalli, P. S., Smart, P. L., . . . Shen, C.-C. (2004). Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*, 432(7018), 740-743.
- Wang, X., Auler, A. S., Edwards, R. L., Cheng, H., Ito, E., & Solheid, M. (2006). Interhemispheric anti-phasing of rainfall during the last glacial period. *Quaternary Science Reviews*, 25(23-24), 3391-3403.
- Wassenburg, J. A., Riechelmann, S., Schröder-Ritzrau, A., Riechelmann, D. F. C., Richter, D. K., Immenhauser, A., Terente, M., Constantin, S., Hachenberg, A., Hansen, M., & Scholz, D. (2020). Calcite Mg and Sr partition coefficients in cave environments: Implications for interpreting prior calcite precipitation in speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269, 581-596. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.11.011>

Cambios futuros en los ciclones tropicales y las ondas del este sobre América del Norte¹

Christian Domínguez², James Done³, Cindy Bruyère⁴

Resumen

Los ciclones tropicales (CT) y las ondas del este (OE) son los fenómenos más importantes en América del Norte. Examinar sus cambios futuros es crucial para las estrategias de adaptación y mitigación. Las salidas del modelo CESM (*Community Earth System Model*) sirvieron para crear un conjunto multifísico de tres miembros, usando un modelo regional y el escenario de emisiones RCP 8.5, durante cuatro escenarios futuros (2020-2030, 2030-2040, 2050-2060, 2080-2090). Estos escenarios climáticos futuros se analizaron para determinar los cambios en las características de las OE y CT: lluvia y densidad de trayectorias. Este estudio revela que se proyecta un aumento promedio de al menos un 40 % en la precipitación media anual de CT en el norte de México y en el suroeste de USA. Sobre el oeste del océano Pacífico oriental, se proyecta un incremento medio en la actividad de las OE en las próximas décadas. Además, se prevé para las próximas décadas una reducción de hasta un 60 % en la lluvia de las OE, principalmente sobre la región del Caribe, el golfo de México y el centro-sur de México. Concluimos que estas variaciones podrían tener impactos significativos en la precipitación regional.

Palabras clave: Ciclones tropicales; ondas del este; cambios futuros en lluvia

Abstract

Tropical Cyclones (TCs) and Easterly Waves (EWs) are the most important phenomena in Tropical North America. Examining their future changes is crucial for adaptation and mitigation strategies. The Community Earth System Model drove a three-member regional model multi-physics ensemble under the Representative Concentration Pathways 8.5 emission scenario for creating four future scenarios (2020–2030, 2030–2040, 2050–2060, 2080–2090). These future climate runs were analyzed to determine changes in EW and TC features: rainfall and track density. Our study reveals that a mean increase of at least 40 % in the mean annual TC precipitation is projected over northern Mexico and southwestern USA. Over the Eastern Pacific Ocean, a mean increment in the EW activity is projected westwards across the future decades. Furthermore, a mean reduction by up to 60 % of EW rainfall, mainly over the Caribbean region, Gulf of Mexico, and central-southern Mexico, is projected for the future decades. We concluded that these variations could have significant impacts on regional precipitation.

Key words: Tropical cyclones; easterly waves; future changes in rainfall

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Domínguez, C., Done, J. M., & Bruyère, C. L. (2021). Future Changes in Tropical Cyclone and Easterly Wave Characteristics over Tropical North America. *Oceans*, 2(2), 429–447. <http://dx.doi.org/10.3390/oceans2020024>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Christian Domínguez y que fue premiado dentro de la Categoría 1 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: dosach@atmosfera.unam.mx

³ National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA. Correo: done@ucar.edu

⁴ National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA. Environmental Sciences and Management, North-West University, South Africa. Correo: bruyerec@ucar.edu

Introducción

Los ciclones tropicales (CT) son famosos por sus efectos destructivos y las cuantiosas pérdidas económicas asociadas a su paso (Hsiang, & Camargo, 2016). Por ejemplo, el 86.5 % de los desastres que ocurren en México están asociados al paso de los CT. Su principal peligrosidad son las lluvias intensas que producen (CENAPRED, 2019). Dominguez *et al.* (2021b) demostraron que el costo anual de los desastres en México depende altamente de oscilaciones naturales, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), debido a que la vulnerabilidad social es muy alta. Los CT que no son tan intensos, como las tormentas o las depresiones tropicales, pueden producir precipitaciones extremas por lo que un solo evento puede aumentar las probabilidades de que ocurra un desastre. Sin embargo, los CT también transportan grandes cantidades de agua que representan hasta el 30 % de la lluvia estacional de verano (acumulación de lluvia desde mayo hasta noviembre) y pueden ayudar a amortiguar las condiciones de sequía en las regiones áridas y semiáridas (Dominguez, & Magaña, 2018). En este sentido, es necesario explorar los cambios regionales futuros en las características de los CT, ya que esta información es importante para el manejo de agua a nivel nacional y para los encargados de tomar decisiones en el área de la gestión integral de riesgos.

Los escenarios futuros de la actividad de los CT varían en sus proyecciones. Lo anterior es debido a la cuenca oceánica de estudio, la configuración del modelo, la parametrización de la interacción océano-atmósfera, las décadas analizadas y los escenarios de emisiones que se consideraron, entre otros (Bruyère *et al.*, 2017; Murakami *et al.*, 2014; Torres-Alavez *et al.*, 2021; Zhao, & Held, 2012). Por ejemplo, Bacmeister *et al.* (2014) y Wehner *et al.* (2014) exploraron las proyecciones futuras usando el modelo global de la comunidad del sistema terrestre (CESM, por sus siglas en inglés) a una alta resolución espacial. Estos estudios mostraron que, aunque los modelos globales de alta resolución espacial no mejoran el clima simulado en gran medida, la variabilidad interanual de los CT es simulada con mayor habilidad, en comparación con los modelos de baja resolución espacial. Recientemente, Bacmeister *et al.* (2018) utilizaron el CESM a una resolución espacial de 28 km y usando los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. Este estudio determinó que la actividad de los CT disminuye a nivel global.

Por su parte, Roberts *et al.* (2020) exploraron la actividad futura de los CT en un conjunto de modelos globales que se corrieron a una alta resolución espacial (~8-25 km). Sus resultados muestran que la actividad de los CT sobre el océano Atlántico disminuirá y la actividad sobre el océano Pacífico oriental experimentará un cambio hacia los polos para el periodo de 2020-2050. Hasta el momento, se ha dis-

cutido únicamente el uso de modelos globales. Sin embargo, los modelos regionales han sido usados también para hacer proyecciones futuras de la actividad de los CT. Por ejemplo, Knutson *et al.* (2013) encontraron resultados similares a los de Roberts *et al.* (2020) sobre el océano Atlántico, usando únicamente un modelo climático regional, forzado por las salidas de los modelos globales pertenecientes al Proyecto de Intercomparación de la fase 3 y 5 (CMIP3 y CMIP5, por sus siglas en inglés). No obstante, sus resultados para la actividad ciclónica futura sobre el Pacífico oriental son inconsistentes. En términos de lluvia, Knutson *et al.* (2019) y Knutson *et al.* (2020) determinaron que la lluvia producida por los CT aumentará ~5-25 % tanto en el océano Atlántico, como en el océano Pacífico oriental para fines de siglo. Este aumento se debe a que en el futuro la atmósfera tendrá mayor contenido de vapor de agua a gran escala y el calentamiento troposférico y oceánico también será mayor.

Las ondas del este (OE) son perturbaciones en los vientos alisios y pueden dar origen a los CT (Serra *et al.*, 2014). Estas ondas se propagan del este hacia el oeste y duran hasta 6 días sobre el océano Atlántico (Thorncroft, & Hodges, 2001) y hasta 8 días sobre el Océano Pacífico oriental (Serra *et al.*, 2008). En general, el ~50% y ~70% de los CT del océano del Atlántico y del océano Pacífico oriental provienen de las OE, respectivamente (Agudelo *et al.*, 2011; Dominguez *et al.*, 2020; Schreck *et al.*, 2012). Aparte del papel que juegan en la ciclogénesis tropical, las OE además pueden contribuir hasta el 60 % de la precipitación estacional en la parte tropical de América del Norte (Dominguez *et al.*, 2020). Empero a lo anterior, la comunidad científica no ha explorado los cambios futuros en la precipitación producida por las OE. Contar con esta información es crucial para los agricultores de las regiones tropicales, quienes sufrirán los efectos del cambio climático, y para la gestión integral del riesgo.

El objetivo principal de Dominguez *et al.* (2021a) es explorar los cambios futuros en la precipitación producida por los CT y las OE sobre la parte tropical de América del Norte. Con la finalidad de explorar estos cambios, se utilizó un modelo regional y se creó un conjunto de tres miembros, utilizando diferentes parametrizaciones físicas del Modelo Regional para la Investigación del Tiempo y del Pronóstico (WRF, por sus siglas en inglés), usando el escenario de emisiones RCP8.5. Dominguez *et al.* (2021a) analizaron cómo las diferentes representaciones del forzamiento a gran escala (cada uno de los miembros representa diferentes comportamientos de la circulación regional) modulan las características de los fenómenos tropicales. En este estudio se investigan los cambios futuros que podrían ocurrir en la actividad de los CT y las OE, así como su lluvia asociada. Se compara el clima histórico simulado, usando datos obser-

vados de la década 1990–2000, con el clima simulado de la década futura cercana (2020–2030, 2030–2040) y el clima de dos décadas futuras lejanas (2050–2060, 2080–2090). La importancia de este estudio radica en su posible aplicación en las estrategias regionales de adaptación al cambio climático de los países de América Latina.

Datos y métodos

Los datos del reanálisis de ERAInterim fueron utilizados para forzar el modelo WRFv3.4 (Powers *et al.*, 2017) y producir las simulaciones del clima histórico de la década 1990–2000. De este experimento, se obtuvieron 24 combinaciones diferentes de las parametrizaciones de radiación, convección, microfísica y capa límite planetaria del WRFv3.4. El esquema Noah (Chen, & Dudhia, 2001) fue la única parametrización de uso de suelo utilizada en todas las combinaciones. Pero solamente se eligieron tres combinaciones porque fueron los únicos miembros que simularon de manera adecuada la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico durante la década de 1990-2000 (Bruyère *et al.*, 2017). Estos tres miembros tienen diferentes esquemas de parametrización física que se presentan en la Tabla 1. Las cuatro letras asignadas a los tres miembros representan cada una de sus parametrizaciones. Por ejemplo, el miembro rnty significa que la parametrización de radiación usada es RRTMG, la parametrización de convección es Tiedtke, Thompson es el esquema de microfísica y el esquema de la capa límite planetaria es Mellor-Yamada-Janjić.

Resultados

Ciclones tropicales: densidad de trayectorias y su precipitación asociada

De manera general, Dominguez *et al.* (2021a) encontraron una disminución en la actividad ciclónica tropical del golfo de México y el mar Caribe en los tres miembros y su promedio, estadísticamente significativa al 95 % de confianza, durante las próximas décadas (2020-2030, 2030-2040, 2050-2060, 2080-2090), aunque existen pequeñas diferencias espaciales sobre el golfo de México (Figura 1). También, este estudio proyecta una disminución de la actividad ciclónica sobre el Pacífico oriental en las mismas décadas. Es interesante mencionar que la disminución más drástica se presenta en la región 105°–120° W y en las costas centroamericanas del Pacífico durante la década de 2080-2090 (Figura 1). Estos resultados coinciden con otros estudios (i.e. Torres-Alavez *et al.*, 2021) que muestran una reducción en la actividad ciclónica del Pacífico oriental, usando otro modelo regional y diferentes escenarios de emisiones (RCP2.6 y RCP8.5).

Por otro lado, Dominguez *et al.* (2021a) muestran que todos los miembros del conjunto y su promedio proyectan que la lluvia producida por los CT disminuirá hasta un 80 % en la región del Caribe, el sur de México y Centroamérica, durante la mayoría de las décadas futuras, aunque estos resultados no son significativos (Figura 2). Es interesante mencionar que los miembros rnty y rtty y el promedio de los tres miembros proyectan un incremento estadísticamente significativo (a un nivel de confianza del 95 %) de, al menos, 40 % en la precipitación promedio asociada con los CT en las regiones semiáridas de México, principalmente durante las décadas 2020–2030 y 2050–2060 (Figura 2). Estos resultados coinciden con los encontrados por Dominguez *et al.* (2021b), quienes muestran una tendencia positiva en la lluvia producida por los CT sobre el noroeste de México, usando la base de datos CHIRPS, durante el periodo de estudio 1981-2017.

Ondas del este: densidad de trayectorias y su precipitación asociada

El estudio de Dominguez *et al.* (2021a) muestra que los miembros rktm y rnty proyectados disminuirá la actividad de las OE alrededor de los 15° N en el océano Atlántico, durante las décadas 2020-2030 y 2030-2040, particularmente sobre la región principal de desarrollo (MDR, por sus siglas en inglés), que es donde se forman la mayoría de los CT del océano Atlántico. Sin embargo, durante la última década, esta actividad podría aumentar sobre la MDR (Figura 3). Es apropiado mencionar que este estudio muestra que los tres miembros proyectan ligeramente lo opuesto para la actividad de las OE sobre esta región, pero en la latitud de 10° N.

Tabla 1. Combinaciones físicas de los tres miembros utilizados en los escenarios regionales futuros. Estos miembros utilizan la parametrización de radiación RRTMG y la parametrización de microfísica Thompson. Todas las simulaciones tienen una resolución espacial de 36 km. Tabla tomada de Dominguez *et al.* (2021a).

Parametrización de convección	Parametrización de Capa Límite Planetaria	
	Mellor–Yamada–Janjić (M)	Yonsei University (Y)
Kain Fritsch (K)	rktm	
New Simplified Arakawa–Schubert (N)		rnty
Tiedtke (T)		rtty

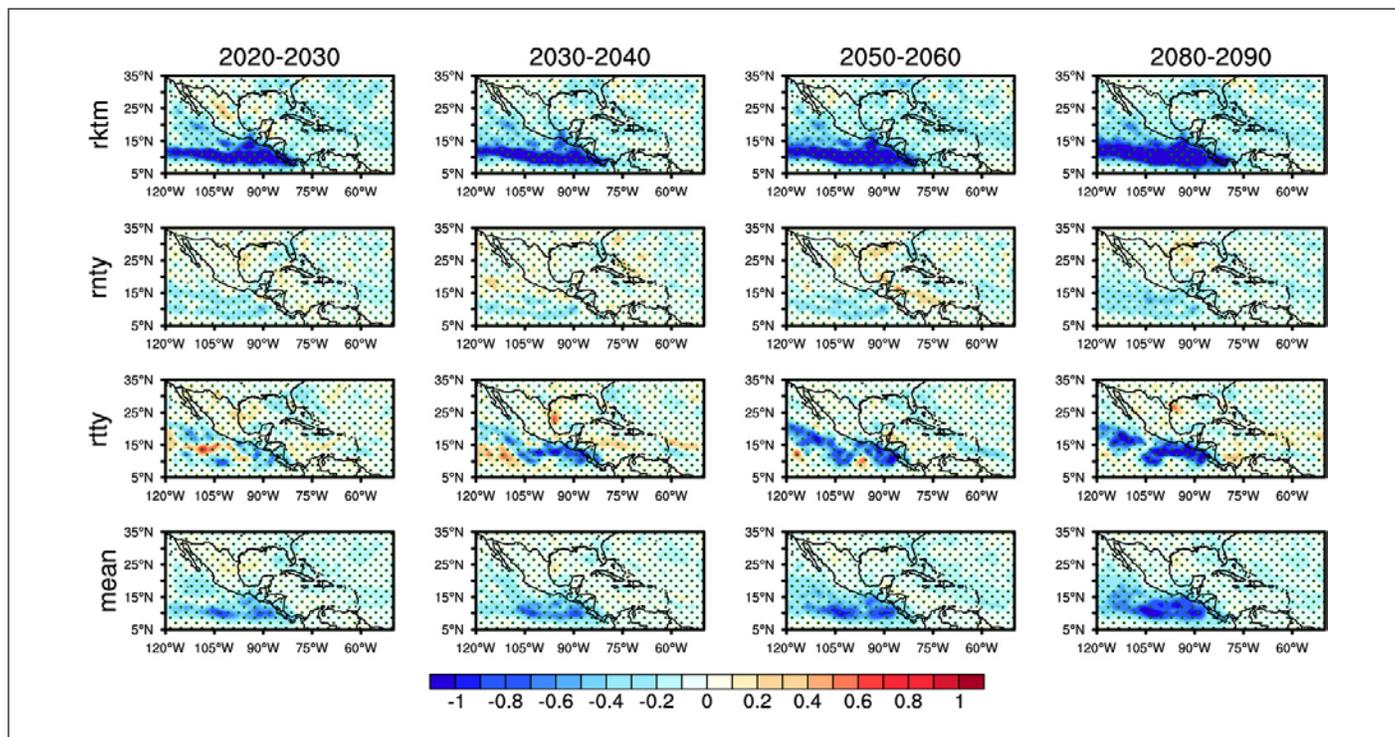


Figura 1. Anomalías promedio anuales de la densidad de ciclones tropicales en los miembros y en su promedio sobre América del Norte, en comparación con la década histórica (1990–2000). Las regiones punteadas indican un nivel de significancia del 95% aplicando la prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras. Imagen tomada de Dominguez *et al.* (2021a)

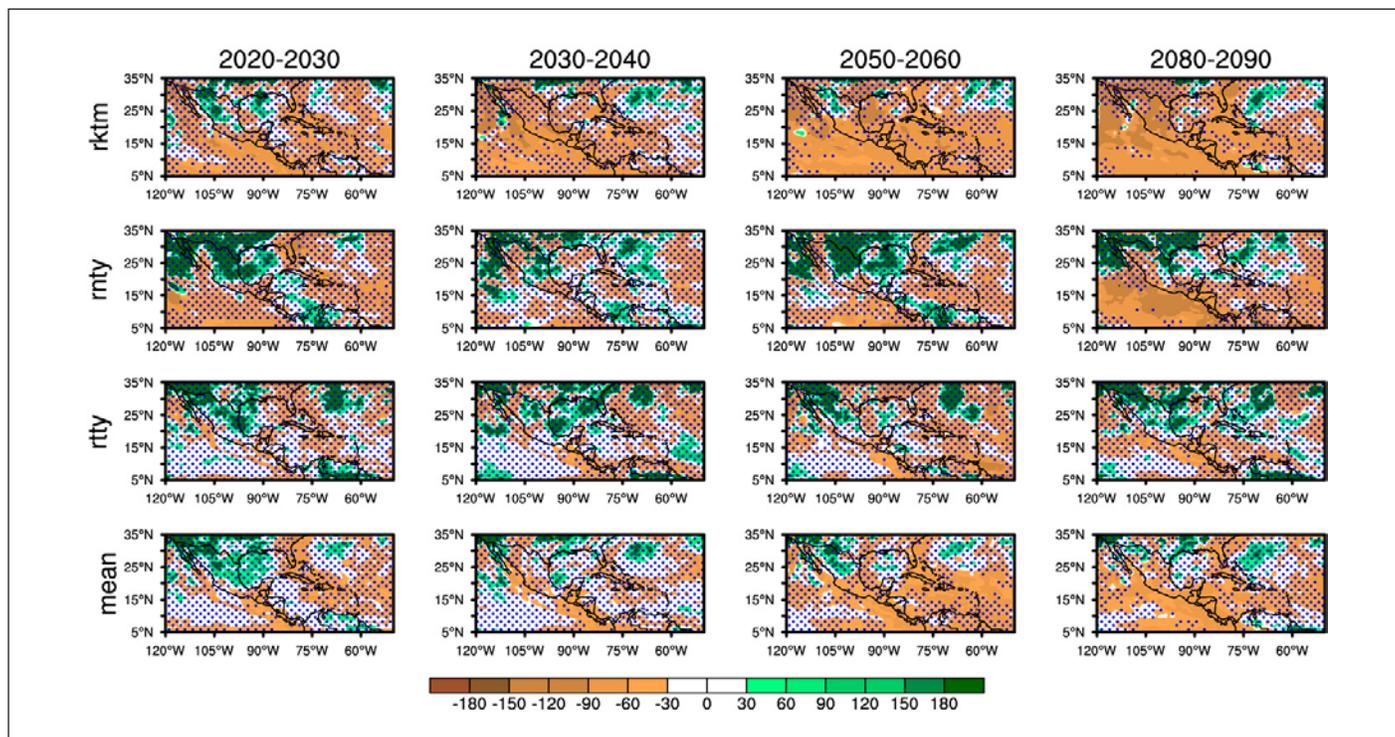


Figura 2. Cambio porcentual anual promedio (%) en la precipitación asociada con los ciclones tropicales en los miembros y en su promedio sobre América del Norte, en comparación con la década histórica (1990–2000). Las regiones punteadas indican un nivel de significancia del 95% aplicando la prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras. Tomada de Dominguez *et al.* (2021a)

Por otra parte, el promedio de los tres miembros proyecta un pequeño aumento en la actividad de las OE sobre la MDR hacia el sur de 10° N durante las décadas 2050-2060 y 2080-2090 (Figura 3). En el océano Pacífico oriental, los miembros rktm y rnty proyectan que la actividad de las OE se moverá hacia el oeste (región 120° - 105° W y 5° - 15° N) durante todas las décadas futuras. Dominguez *et al.* (2021a) mencionan que el promedio de los tres miembros proyectan una disminución de la actividad de las OE en Centroamérica, región donde producen hasta el 60 % de la lluvia estacional

(precipitación que ocurre desde mayo hasta noviembre) en las próximas décadas (Figura 3). Estos resultados podrían tener implicaciones para la formación de los CT en el océano Pacífico oriental que tienen una trayectoria alejada de México (Dominguez, & Magaña, 2018).

Por último, Dominguez *et al.* (2021a) muestran que las proyecciones señalan una disminución de hasta 40 % en la lluvia producida por las OE en las próximas décadas, principalmente en la región del Caribe, el golfo de México, el centro-sur de México y Centroamérica, aunque estos

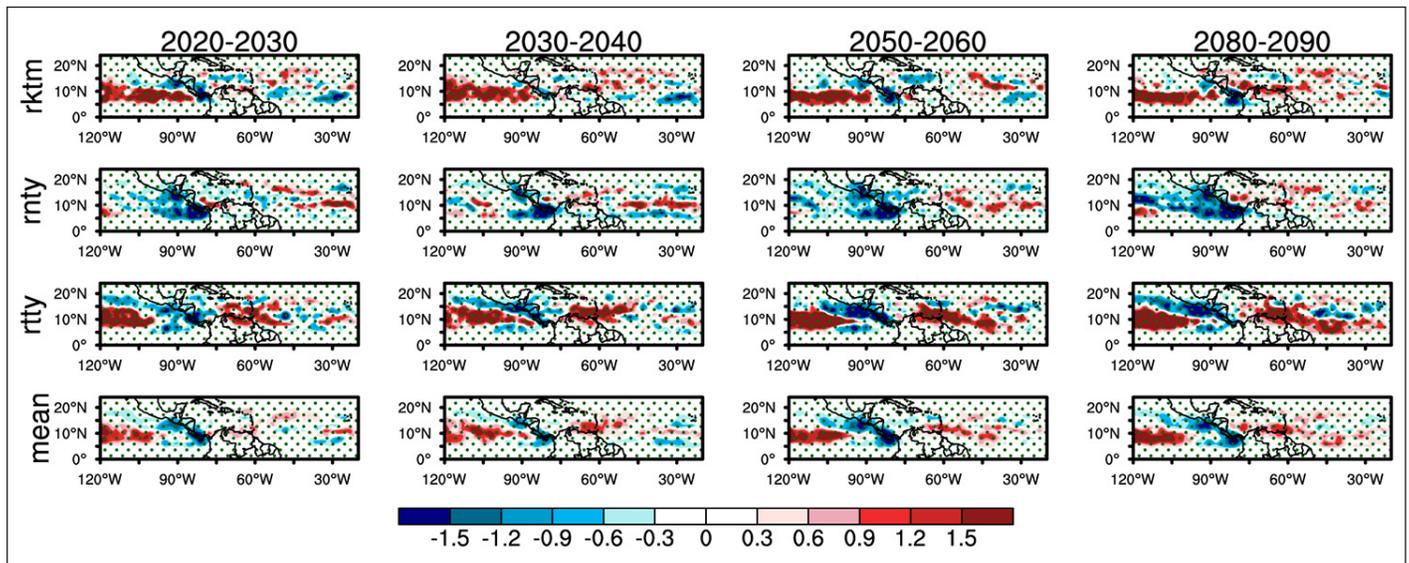


Figura 3. Anomalías anuales promedio de la densidad de trayectorias de las ondas del este en los miembros y en su promedio sobre América del Norte, en comparación con la década histórica (1990–2000). Las regiones punteadas indican un nivel de significancia del 95% aplicando la prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras. Tomada de Dominguez *et al.* (2021a)

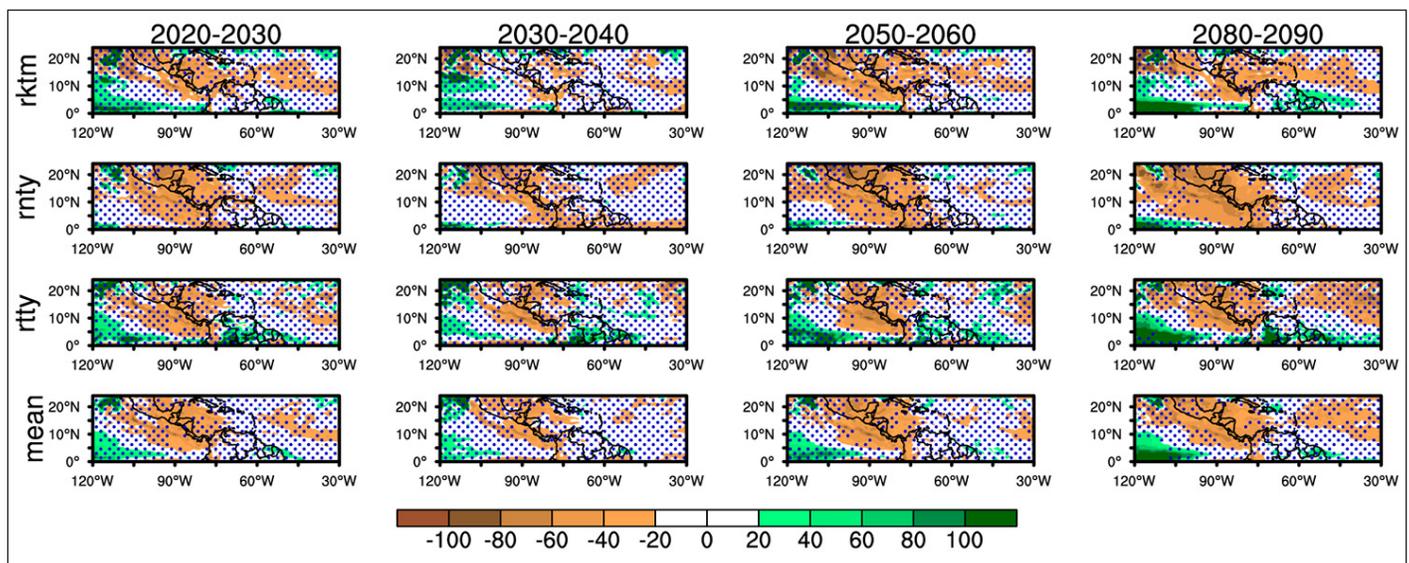


Figura 4. Cambio porcentual anual promedio (%) en la precipitación asociada con las ondas del este en los miembros y en su promedio sobre América del Norte, en comparación con la década histórica (1990–2000). Las regiones punteadas indican un nivel de significancia del 95 % aplicando la prueba Kolmogorov-Smirnov para dos muestras. Tomada de Dominguez *et al.* (2021a)

resultados no son estadísticamente significativos. Además, es interesante mencionar que este estudio registra que, en promedio, la lluvia producida por las OE se va a desplazar hacia el oeste del océano Pacífico oriental, como consecuencia de un aumento en su actividad sobre esta región (120°-105° W y 5°-15° N).

Resumen y conclusiones

Los CT y las OE son fenómenos tropicales esenciales en América del Norte. Por ello, los tomadores de decisiones, ya sea en el sector hídrico o incluso en la gestión integral de riesgos, necesitan información sobre los cambios futuros que podrían ocurrir en la región, con la finalidad de planificar estrategias de adaptación y mitigación.

Los experimentos mostrados en Dominguez *et al.* (2021a) parten de un conjunto de tres miembros que usan diferentes parametrizaciones físicas de los procesos atmosféricos. Se simuló el clima histórico durante la década de 1990-2000, que sirvió para comparar las simulaciones del clima futuro realizadas por el modelo regional WRF, forzado con salidas del modelo global CESM y utilizando el escenario más dramático en términos de emisiones futuras (RCP8.5). Así, se crearon cuatro escenarios futuros (2020-2030, 2030-2040, 2050-2060, 2080-2090). Este estudio es un primer acercamiento para analizar los cambios que podrían ocurrir en el comportamiento de los fenómenos tropicales, lo que a su vez podría inducir cambios importantes en la precipitación regional de América del Norte.

Dominguez *et al.* (2021a) demuestran que los tres miembros proyectan una disminución de la actividad ciclónica tropical tanto en la cuenca del océano Atlántico, como en el océano Pacífico oriental. Estos resultados son parcialmente consistentes con estudios previos (Roberts *et al.*, 2020; Torres-Alavez *et al.*, 2021). Sin embargo, existen pequeñas diferencias en el comportamiento de los CT sobre el golfo de México durante todas las décadas futuras. En términos de lluvia, el promedio de los miembros indica un aumento de, al menos, 40 % en la precipitación promedio de los CT sobre las regiones semiáridas de México.

Con respecto a las OE su actividad podría aumentar ligeramente hacia el sur de la latitud de 10° N, que es donde se forman la mayoría de los CT en el océano Atlántico, hacia finales del siglo. No obstante, la lluvia asociada a las OE podría disminuir hasta un 60 % sobre el centro-sur de México, golfo de México y mar Caribe durante todas las décadas futuras. Por otra parte, en el océano Pacífico oriental, su actividad se podría desplazar hacia la longitud 105° W, lo que traería como consecuencia que disminuya la precipitación

producida por las OE en las costas de Centroamérica, aunque estos resultados no son estadísticamente significativos.

Referencias

- Agudelo, P. A., Hoyos, C. D., Curry, J. A., & Webster, P. J. (2011). Probabilistic Discrimination between Large-Scale Environments of Intensifying and Decaying African Easterly Waves. *Climate Dynamics*, 36, 1379–1401. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0851-x>
- Bacmeister, J. T., Reed, K. A., Hannay, C., Lawrence, P., Bates, S., Truesdale, J. E., Rosenbloom, N., & Levy, M. (2018). Projected Changes in Tropical Cyclone Activity under Future Warming Scenarios Using a High-Resolution Climate Model. *Climate Change*, 146, 547–560. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1750-x>
- Bacmeister, J. T., Wehner, M. F., Neale, R. B., Gettelman, A., Hannay, C., Lauritzen, P. H., Caron, J. M., & Truesdale, J. E. (2014). Exploratory High-Resolution Climate Simulations Using the Community Atmosphere Model (CAM). *Journal of Climate*, 27(9), 3073–3099. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00387.1>
- Bruyère, C. L., Rasmussen, R., Gutmann, E., Done, J., Tye, M., Jaye, A., Prein, A., Mooney, P., Ge, M., Fredrick, S., Friis-Hansen, P., Garre, L., Veldore, V., & Niesel, J. (2017). *Impact of Climate Change on Gulf of Mexico Hurricanes*; NCAR Technical Notes; National Center for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D6RN36J3>
- Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED). Desastres en México. 2019. <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADESASTRESENMXICO-IMPACTO-SOCIALYECONMICO.PDF>
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Dominguez, C., Done, J. M., & Bruyère, C. L. (2021a). Future Changes in Tropical Cyclone and Easterly Wave Characteristics over Tropical North America. *Oceans*, 2(2), 429–447. <http://dx.doi.org/10.3390/oceans2020024>
- Dominguez, C., Jaramillo, A., & 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(1), E3307–E332. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>
- Dominguez, C., Done, J. M., & Bruyère, C. L. (2020). Easterly Wave Contributions to Seasonal Rainfall over the Tropical Americas in Observations and a Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, 54, 191–209. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04996-7>
- Dominguez, C., & Magaña, V. (2018). 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>
- Hsiang, S., & Camargo, S. (2016). Tropical Cyclones: From the Influence of Climate to Their Socioeconomic Impacts. In Wiley, J &

- Inc, S. (eds.), *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*; Geophysical Monograph 214, 303–342. <https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch18>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., Emanuel, K., Ho, C-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303–E322. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L.; Emanuel, K., Ho, C-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2019). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part I: Detection and Attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 1987–2007. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0189.1>
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Vecchi, G. A., Garner, S., Zhao, M., Kim, H-S., Bender, M., Tuleya, R. E., Held, I. M., & Villarini, G. (2013) Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios. *Journal of Climate*, 26(17), 6591–6617. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00539.1>
- Murakami, H., Hsu, P-C., Arakawa, O., & Li, T. (2014). Influence of Model Biases on Projected Future Changes in Tropical Cyclone Frequency of Occurrence. *Journal of Climate*, 27, 2159–2181. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00436.1>
- Powers, J.G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romire, G. S., ... & Duna, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Roberts, M. J., Camp, J., Seddon, J., Vidale, P. L., Hodges, K., Vanniere, B., Mecking, J., Haarsma, R., Bellucci, A., Scoccimarro, E., Caron, L-P., Chauvin, F., Terray, L., Valcke, S., Moine, M-P., Putrasahan, D., Roberts, C., Senan, R., Zarzycki, C., & Ullrich, P. (2020). Impact of Model Resolution on Tropical Cyclone Simulation Using the HighResMIP–PRIMAVERA Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 33, 2557–2583. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0639.1>
- Serra, Y. L., Jiang, X., Tian, B., Amador-Astua, J., Maloney, E. D., & Kiladis, G. N. (2014). Tropical Intraseasonal Modes of the Atmosphere. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 189–215. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020413-134219>
- Serra, Y. L., Kiladis, G. N., & Cronin, M. F. (2008). Horizontal and Vertical Structure of Easterly Waves in the Pacific ITCZ. *Journal of the Atmospheric Science*, 65(4), 1266–1284. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2341.1>
- Schreck, C. J., Molinari, J., & Aiyyer, A. (2012) A Global View of Equatorial Waves and Tropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 140(3), 774–788. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00110.1>
- Thorncroft, C., & Hodges, K. (2001). African Easterly Wave Variability and Its Relationship to Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, 14, 1166–1179. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2)
- Torres-Alavez, J. A., Glazer, R., Giorgi, F., Coppola, E., Gao, X., Hodges, K. I., Das, S.; Ashfaq, M., Reale, M., & Sines, T. (2021). Future Projections in Tropical Cyclone Activity Over Multiple CORDEX Domains from RegCM4 CORDEX-CORE Simulations. *Climate Dynamics*, 57, 1507–1531. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05728-6>
- Wehner, M. F., Reed, K. A., Li, F., Prabhat, Bacmeister, J., Chen, C-T., Paciorek, C., Gleckler, P. J., Sperber, K. R., Collins, W. D., Gettelman, A., & Jablonowski, C. (2014). The Effect of Horizontal Resolution on Simulation Quality in the Community Atmospheric Model, CAM5.1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(4), 980–997. <https://doi.org/10.1002/2013MS000276>
- Zhao, M., & Held, I. M. (2012). TC-Permitting GCM Simulations of Hurricane Frequency Response to Sea Surface Temperature Anomalies Projected for the Late-Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 25, 2995–3009. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00313.1>

Estimaciones cuantitativas de la variabilidad climática en el centro de México en escalas orbitales y milenarias durante los últimos 40,000 años¹

Margarita Caballero Miranda², María del Socorro Lozano García³, Beatriz Ortega Guerrero⁴, Alexander Correa Metrio⁵

Resumen

Se desarrollaron funciones de transferencia basadas en diatomeas de 40 sitios en el centro de México, con el objetivo de aplicarlas en el registro de diatomeas del lago de Chalco para reconstruir de forma cuantitativa la salinidad, precipitación y temperatura, durante los últimos 40,000 años (40 ka). Se identificaron los eventos milenarios conocidos como los estadales Heinrich (EH) como fríos y secos, el EH-2 fue el más frío y el EH-1 mostró un patrón de enfriamiento bimodal. En escala orbital, el final del estadio isotópico 3 (EI-3) (~34 to 29 ka) demostró salinidad elevada y variable durante un máximo de insolación de verano. El EI-2 fue frío, con baja evaporación y baja salinidad, se estima un enfriamiento máximo de 4 a 5 °C durante el EH-2 (24-23 ka) y a los ~20 ka, que coinciden con mínimos de insolación en primavera (~25.5 ka) y verano (~20 ka). El glacial tardío (19.5-11.5 ka) presenta un incremento en la precipitación con tres picos que siguen de cerca los avances glaciares locales. El Holoceno temprano (EI-1) registra anomalías positivas de temperatura (+3.5 °C) con alta evaporación y salinidad, en el lago, durante un máximo de insolación de verano; mientras que en escala orbital Chalco registra tendencias opuestas al registro de Peten Itzá (Guatemala), ambos marcan los EH como fríos y secos.

Palabras clave: Pleistoceno tardío; paleolimnología; paleoclimatología; diatomeas; funciones de transferencia

Abstract

Diatom-based transfer functions for salinity, precipitation and temperature were developed using data from 40 lakes in central Mexico. They were applied to the diatom record from Lake Chalco, southern Basin of Mexico, to quantify climatic variability during the last 40,000 years (40 ka). Millennial scale Heinrich stadials (HS-3 to HS-0) were cold and dry, with HS-2 representing the coldest, while HS-1 showed a bimodal cooling pattern. At orbital scale, lake salinities were high and variable during late MIS3 (~34 to 29 ka), at a time of maximum summer insolation. MIS-2 was cold, with low evaporation and low lake salinity; maximum cooling was of -4 to -5 °C during HS-2 (24-23 ka) and at ~20 ka, during spring (~25.5 ka) and summer (~20 ka) insolation minima. The deglacial (19.5-11.5 ka) showed higher precipitation with 3 peaks that closely followed local glacier advances. The early Holocene (MIS1) showed positive temperature anomalies (+3.5 °C), with high evaporation and high lake salinity during a peak in summer insolation. While at orbital scale Chalco showed nearly opposite trends to the record from Lake Peten-Itza (Guatemala), at millennial scale both identified HSs as cold and dry events.

Key words: Late Pleistocene; paleolimnology; paleoclimatology; diatoms; transfer functions

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Caballero, M., Lozano-García, S., Ortega-Guerrero, B., & Correa-Metrio, A. (2019). Quantitative estimates of orbital and millennial scale climatic variability in central Mexico during the last ~40,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 205, 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.002>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Margarita Caballero y que recibió la Mención Honorífica dentro de la Categoría 1 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: maga@igeofisica.unam.mx

³ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: mslozano@unam.mx

⁴ Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: borgtega@igeofisica.unam.mx

⁵ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: acorrea@geologia.unam.mx

Introducción

Diversos registros paleoambientales, para el centro de México, demuestran que existió un importante cambio en las características del clima durante la transición entre las condiciones frías del último máximo glacial (UMG), ocurridas hace 27 a 19 mil años antes del presente (ka AP), y las condiciones más cálidas del Holoceno (últimos 11.7 ka AP) (Lozano-García *et al.*, 2015; Metcalfe, & Davies, 2007; Sedov *et al.*, 2001; Vázquez-Selem, & Heine, 2011). Sin embargo, existen escasas estimaciones cuantitativas que permitan entender la magnitud que tuvo este cambio entre los dos últimos estadios isotópicos (EI-2 a EI-1) del registro paleoclimático (Lisiecki, & Raymo, 2005). En particular, se ha debatido si el máximo glacial en esta zona fue más seco o húmedo. Por otra parte, los estimados que existen en relación al cambio de temperatura se han basado, principalmente, en cambios de altitud de los glaciares de montaña que reconstruyen enfriamientos de 7.6 a 6.2 °C hacia el final del UMG (Lachniet, & Vazquez-Selem, 2005; Vázquez-Selem, & Heine, 2011). Estos estimados contrastan con los derivados de funciones de transferencia basadas en estudios de polen, los cuales sugieren descensos de temperatura de solo 4.5 °C (Correa-Metrio *et al.*, 2013). Lo anterior destaca la importancia de aportar nuevos métodos de reconstrucción paleoambiental cuantitativa para el EI-2 (27 a 11.5 ka AP) y su transición hacia el Holoceno (EI-1, últimos 11.5 ka AP). Estos métodos también aportarían información valiosa para identificar y constreñir cambios climáticos ocurridos durante eventos milenarios conocidos como estadiales Heinrich (EH) y que se han asociado con re-estructuraciones en el sistema océano-atmósfera durante la última glaciación (por ejemplo: Asmerom *et al.*, 2010; Correa-Metrio *et al.*, 2012; Peterson *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2001).

Los análisis de diatomeas representan un método efectivo, a fin de lograr reconstrucciones paleoclimáticas cuantitativas a través de funciones de transferencia (por ejemplo: Birks *et al.*, 1990; Battarbee *et al.*, 2001; Gasse *et al.*, 1997). En el centro de México se desarrollaron funciones de transferencia con diatomeas para reconstruir conductividad eléctrica y alcalinidad, que desgraciadamente no se aplicaron a ningún registro paleoambiental (Davies *et al.*, 2002), aunque sí demostraron la validez del método en esta región geográfica. El registro sedimentario del lago de Chalco, al sur de la cuenca de México, es uno de los pocos, en el centro de México, que abarcan la totalidad del UMG (Caballero *et al.*, 2010; Lozano-García *et al.*, 2015; Ortega-Guerrero *et al.* 2015 y 2017). Los análisis de diatomeas, en Chalco, han permitido identificar condiciones predominantemente salobres hacia el final del EI-3 y durante el Holoceno temprano; mientras que se registraron ambientes de baja salinidad durante el

EI-2 y hacia el Holoceno medio. Los datos de diatomeas de Chalco representan una excelente oportunidad, para realizar reconstrucciones cuantitativas mediante el uso de funciones de transferencia (Caballero *et al.* 2019). En este trabajo se presenta un resumen de cómo se desarrollaron la base de datos de calibración y las funciones de transferencia para salinidad, precipitación y temperatura, que fueron aplicadas al registro de Chalco de los últimos 40 ka AP.

Área de estudio

La Faja Volcánica Mexicana (FVM, Figura 1A) tiene una topografía intrincada que define una serie de cuencas lacustres con diferentes niveles de precipitación, en un gradiente altitudinal reflejado en un gradiente de temperatura. Los climas de la región van desde cálidos hasta fríos y de húmedos a secos, pero todos comparten una temporada de lluvia en verano asociada con la migración estacional de la zona de convergencia intertropical y el inicio del monzón mexicano. La cuenca de México (19°30'N, 99°O) es una de estas cuencas, en la que actualmente se ubica la ciudad de México, pero que en el pasado tuvo un extenso sistema lacustre (Figura 1B). El registro sedimentario del lago de Chalco, al sur de la cuenca de México, tiene alrededor de 250 m de profundidad (Lozano-García *et al.*, 2017) y conserva evidencias de las oscilaciones climáticas de las decenas a centenas de miles de años durante las que se acumularon. Chalco tiene, actualmente, un clima templado (16.8 °C media anual) y subhúmedo con precipitación en verano (537 mm/año). El remanente del lago que persiste en la actualidad, es alcalino (pH = 9.2) y subsalino (SDT = 1,890 mg/L).

Métodos

Base de datos modernos

La base de datos de calibración incluyó 40 sitios en el centro de México (Figura 1C, Caballero *et al.* 2019). Los detalles de muestreo y procesamiento de muestras se pueden consultar en Sigala *et al.* (2017), Vázquez y Caballero (2013) y Caballero *et al.* (2019). Los datos de diatomeas incluyeron abundancias relativas de 150 especies, provenientes del análisis de muestras de sedimento superficial recuperadas de la zona central de cada lago. Los datos ambientales incluyeron variables hidroquímicas (pH y salinidad expresada como sólidos disueltos totales [SDT]) y climáticas (temperatura, precipitación y evaporación medias anuales).

Análisis de datos

Las variables ambientales, salvo por el pH, fueron transformadas a logaritmo base 10 y utilizadas para un análisis de correspondencia canónica (ACC), que permite identificar aquellas que definen la distribución de las especies

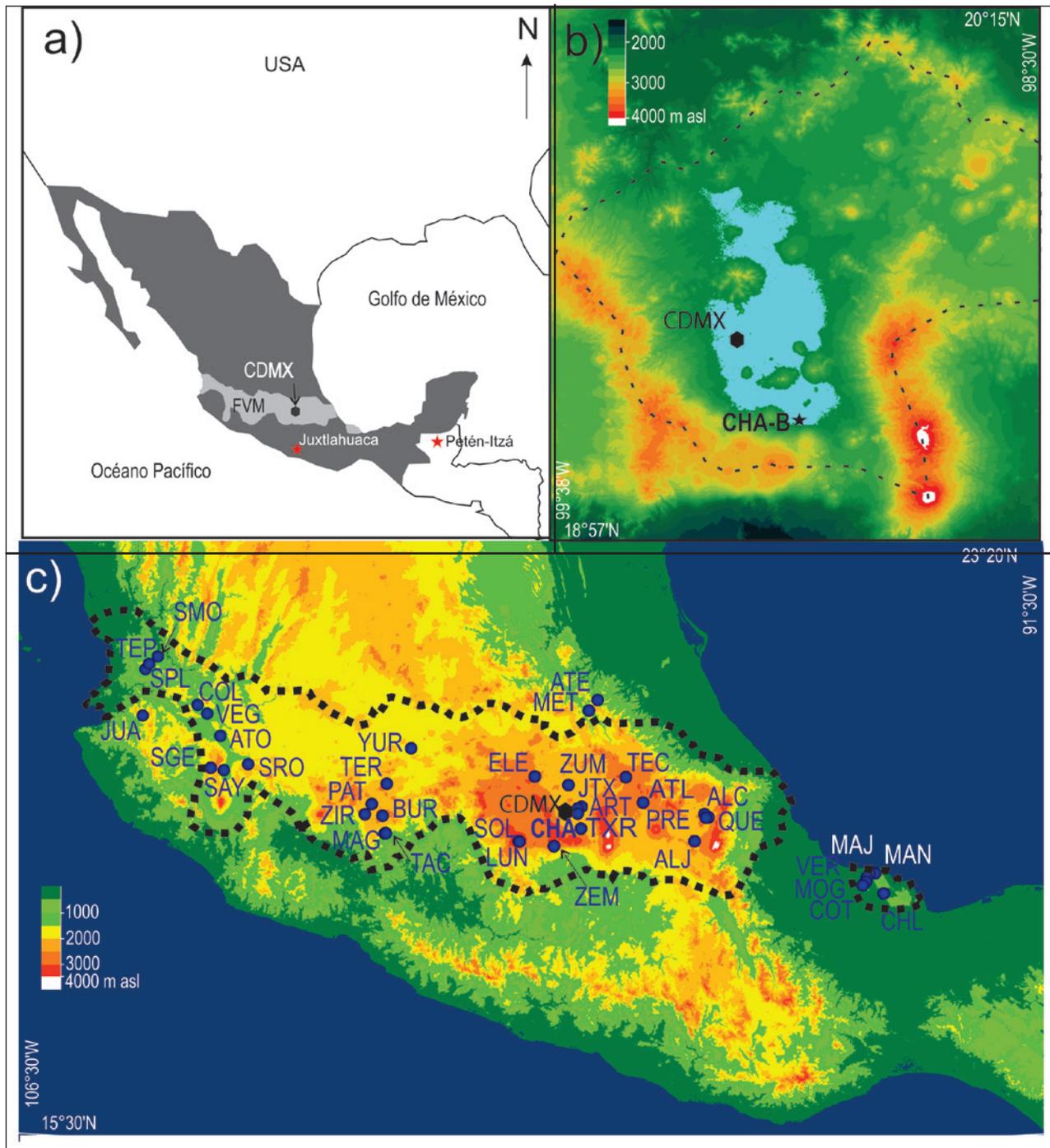


Figura 1. Mapa de localización: a) Faja Volcánica Mexicana (FVM) con la localización de la ciudad de México (CDMX); b) ubicación de la secuencia Chalco B (estrella) en la cuenca de México. La zona en azul define los antiguos lagos; c) ubicación de los 40 sitios que forman la base de datos de calibración. Abreviaciones: CDMX = Ciudad de México, FVM = Faja Volcánica Mexicana, ALC = Alchichica, ALJ = Aljojuca, ART = Texcoco Artemia, ATE = Atezca, ATL = Atlangatepec, ATO = Atotonilco, BUR = Burro, CHA = Chalco, CHL = Chalchoapan, COL = Colorada Jal., COT = Colorada Ver., ELE = Santa Elena, JTX = Texcoco Jalapango, JUA = Juanacatlán, LUN = La Luna, MAG = La Magdalena, MAJ = Majahual, MAN = Manantiales, MET = Metztitlán, MOG = Mogo, PAT = Pátzcuaro, PRE = La Preciosa, QUE = Quechulac, SAY = Sayula, SGE = Santa Gertrudis, SMO = Santa María del Oro, SOL = El Sol, SPL = San Pedro Lagunillas, SRO = Santa Rosa, TAC = Alberca de Tacambaro, TEC = Tecocomulco, TEP = Tepetitlic, TER = Teremendo, TXR = Texcoco Recreativo, VEG = La Vega, VER = Verde, ZUM YUR = Yuriria, ZEM = Zempoala, ZIR = Zirahuén = Zumpango.

de diatomeas. Una vez definidas las principales variables de importancia ecológica, se desarrollaron funciones de transferencia usando el método de promedios ponderados (Birks *et al.*, 1990; Gasse *et al.*, 1995) para salinidad (SDT), temperatura media anual, y precipitación anual. La eficacia de las funciones se evaluó mediante una regresión lineal (r^2), entre los valores predichos por el modelo y los valores reales. Las reconstrucciones obtenidas se presentan como anomalías con respecto a los valores modernos en Chalco. Los modelos se realizaron usando la plataforma R usando los paquetes “vegan” y “rioja” (R Development Core Team, 2009; Oksanen *et al.*, 2015; Juggins, 2016).

Resultados

Análisis de correspondencia canónica y funciones de transferencia

Los resultados del ACC fueron altamente significativos ($p \leq 0.001$) y permitieron explicar 10.7% de la variabilidad de los datos. En el diagrama de los ejes ACC1 y ACC2, la salinidad (SDT) se identifica como la variable más relevante,

seguida de la precipitación y la temperatura media anuales (Figura 2). Los sitios de mayor salinidad se ubican hacia la izquierda del eje ACC1 y los de menor salinidad hacia la derecha. Los sitios de mayor temperatura se localizaron en el cuadrante superior derecho; mientras que los de menor temperatura se ubicaron, preferencialmente, en los valores negativos del ACC2. La distribución de las especies, en el diagrama (Figura 2), siguió estos mismos gradientes de salinidad y temperatura. Las funciones de transferencia desarrolladas para estas tres variables tuvieron una buena correlación entre los valores predichos y los valores reales ($r^2 \geq 0.8$, Figura 3), por lo que se continuó con su aplicación en los datos del registro de Chalco B.

Funciones de transferencia en la secuencia Chalco B

Las funciones de transferencia permitieron identificar que el lago de Chalco tuvo condiciones subsalinas a hipersalinas durante el EI-3 y el EI-1 temprano, y en contraste, mantuvo aguas dulces durante la mayor parte del EI-2, salvo por al-

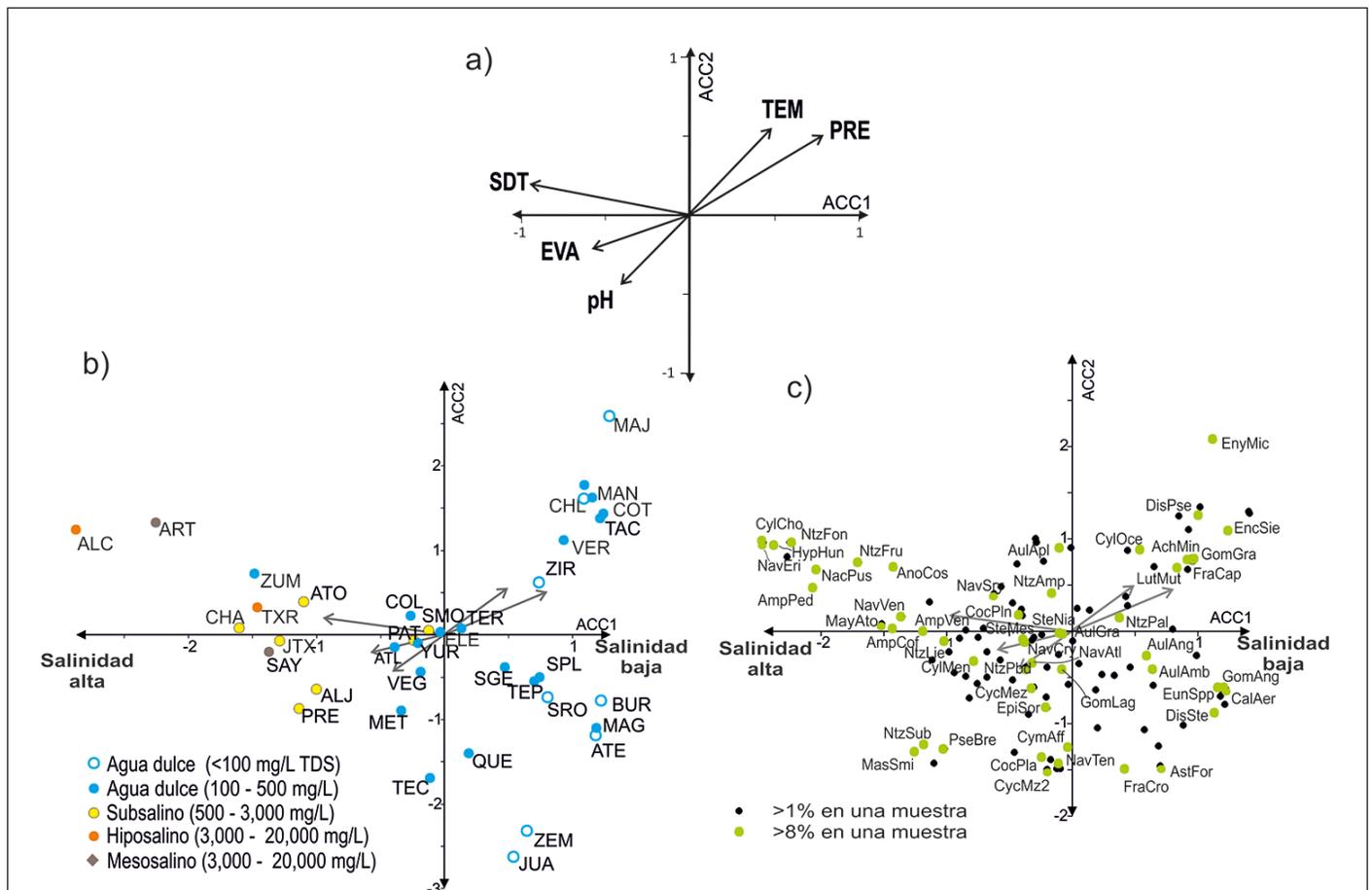


Figura 2. Análisis de correspondencia canónica (ACC1 vs. ACC2) de la base de datos de diatomeas del centro de México (38 sitios y 5 variables): a) variables ambientales (EVA = evaporación, PRE = precipitación media anual, TEM = temperatura media anual, SDT = sólidos disueltos totales); b) sitios identificados por su salinidad (abreviaciones de los sitios en Figura 1); c) especies

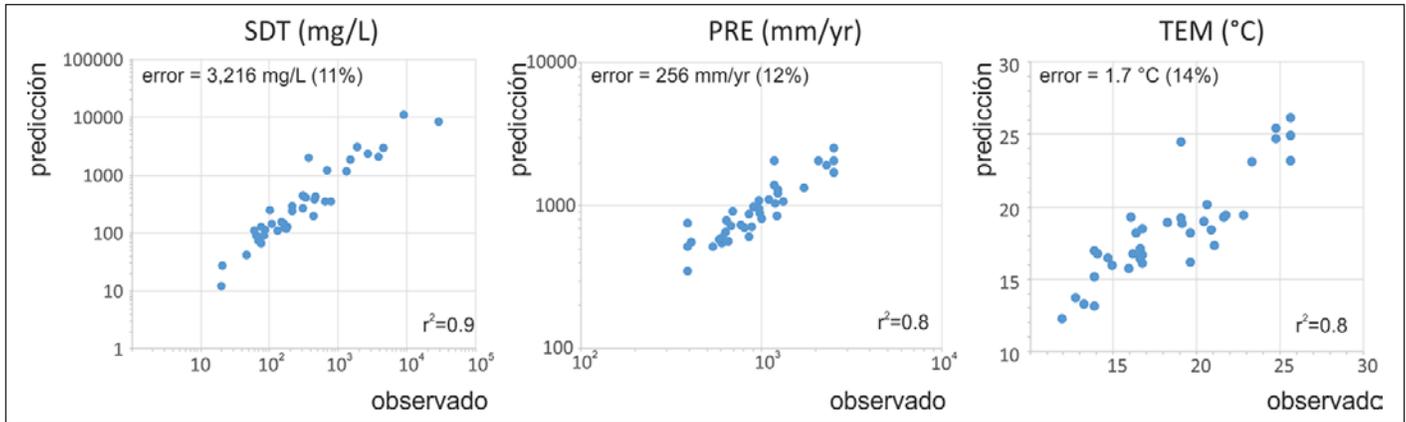


Figura 3. Correlación entre predicciones y valores observados de las funciones de transferencia para salinidad (SDT), precipitación (PRE) y temperatura (TEM) medias anuales

gunos eventos cortos asociados con la variabilidad climática milenaria. La precipitación fue muy variable, pero el periodo con los valores más elevados fue el glacial tardío (15 a 11.5 ka AP); mientras que durante el UMG hubo dos eventos muy secos y fríos (EH-2, 24-23 ka AP y ~20 ka AP). Los enfriamientos máximos durante el UMG fueron de -4.8 y -4.5 °C; por el contrario, durante el Holoceno temprano se registran anomalías positivas de $+3$ °C. Las oscilaciones asociadas con la variabilidad climática milenaria se marcan como enfriamientos asociados a condiciones secas, durante los EH-3 a EH-0; el EH-2 (24 -23 ka AP, -4.8 °C) fue el más frío; mientras que el EH-1 consistió en dos eventos consecutivos (Figura 4).

Discusión

Las funciones de transferencia para salinidad con base en diatomeas han sido utilizadas ampliamente con anterioridad en otras regiones geográficas, pero en muy pocos trabajos se han usado para la reconstrucción de la temperatura (p. ej. Canadá: Pienitz *et al.*, 1995; Joynt, & Wolfe, 2001). Por otro lado, hasta el momento, ningún otro estudio ha generado una reconstrucción de precipitación por este método. De manera que este trabajo es pionero por haber desarrollado estas funciones de transferencia para un sitio tropical, y haberlas aplicado en un registro que se extiende por casi 40 ka AP.

Las reconstrucciones realizadas para Chalco muestran un patrón de cambio que claramente sigue el forzamiento de la insolación (evaporación), con condiciones de mayor salinidad durante los EI-3 y EI-1, que representan los máximos en la insolación de verano. El EI-3 tardío, en Chalco (35 a 27 ka AP), registra condiciones muy variables de salinidad, pero en general con anomalías positivas, una precipitación variable, no obstante, relativamente baja, con oscilaciones de ± 1 °C en la temperatura. Las condiciones relativamente secas son consistentes con datos previos, que indican fuegos

frecuentes y una alta evaporación asociada con un máximo en la insolación de verano a los 31 ka AP (Correa-Metrio *et al.*, 2012; Torres-Rodríguez *et al.*, 2015). El momento más frío, durante el EI-3 tardío, corresponde con el EH-3 (-1.5 °C, ~ 31.5 ka BP).

En el inicio del EI-2 (27 – 24.5 ka AP) se registra una reducción marcada en la salinidad, un incremento breve en la precipitación y una reducción rápida de más de 5 °C en la temperatura. Durante el resto del EI-2 Chalco permanece como un lago de agua dulce con niveles de precipitación variables y anomalías de temperatura negativas asociadas con una baja evaporación. De acuerdo con nuestros datos, el intervalo más frío en Chalco (24.5 a 19.5 ka AP) coincide con el UMG global (Clark *et al.*, 2009), y se divide en dos eventos fríos y secos: el primero durante el EH-2 (24 – 23 ka AP, -4.8 °C) y el segundo a los 21 - 20 ka AP (-4.5 °C), durante un mínimo en la insolación de verano. El final del EI-2 (19.5- 11.5 ka AP o deglaciación) es menos frío (-2.5 a -0.3 °C), y representa el momento más húmedo, una señal que también se identifica en el registro de Ti (Lozano-García *et al.*, 2015), pero que es opuesta a las tendencias reportadas para el registro de Petén-Itza (Guatemala, Hodell *et al.* 2008). En Chalco el EH-1 (-3.5 °C, 17.5 a 16 ka AP) es nuevamente más frío y seco, y con un patrón de enfriamiento doble. El enfriamiento del EH-0 o Dryas Reciente (-1.5 °C, 13-12.5 ka ACP) también se identifica en el registro. Los EH, además de ser fríos, tienen un claro patrón de sequía, similar a lo identificado en el registro de Peten-Itza. Esto sugiere que durante los EH hubo condiciones climatológicas que favorecieron una posición más sureña de la zona de convergencia intertropical y a una ralentización de la circulación profunda en la cuenca del Atlántico del Norte (Hodell *et al.* 2008).

El EI-1 temprano (11.5 a 6.5 ka AP) muestra las anomalías más altas de salinidad y de temperatura ($+2.6$ a $+3.2$ °C), con valores de precipitación que van a la baja. Estas con-

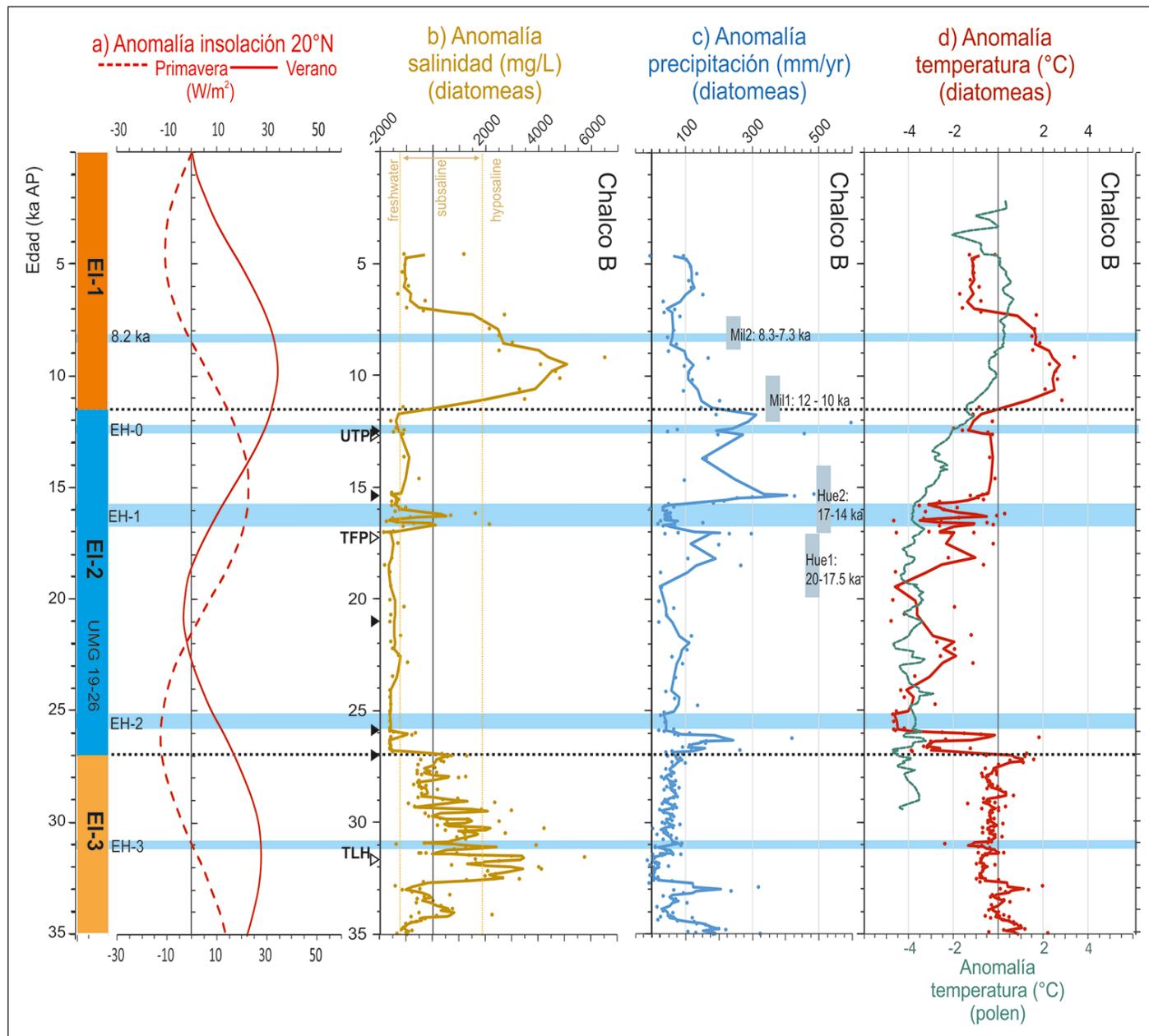


Figura 4. Funciones de transferencia para la secuencia Chalco B, lago de Chalco, cuenca de México: a) anomalía de la insolución de primavera y verano a los 20°N (Berger, 1992); b) función de transferencia (diatomeas) para salinidad (SDT), c) función de transferencia (diatomeas) para precipitación contrastada con las edades de los avances glaciares, para el centro de México (Vázquez-Selem, & Heine, 2011) d) funciones de transferencia (polen y diatomeas) para temperatura. Los triángulos negros representan las dataciones por radiocarbono, los triángulos vacíos son horizontes marcadores UTP = Pómez Toluca Superior, TFP = tefra *Tutti-Frutti*, TLH = tefra Tlahuac. Hue1 = Avance glaciar Hueyatenco 1, Hue2= Avance glaciar Hueyatenco 2, Mil1= Avance glaciar Milpulco 1, Mil2= Avance glaciar Milpulco 2, EH= estadias Heinrich, EI = Estadios isotópicos marinos, UMG= Último Máximo Glaciar.

diciones están asociadas con la presencia de abundantes carbonatos en los sedimentos de Chalco (Lozano-García *et al.*, 2015), todo asociado con una elevada evaporación durante el máximo de insolución de verano a los ~10 ka AP. Después de 6.5 ka AP, en Chalco la salinidad disminuye y la anomalía de temperatura es ligeramente negativa (-1.5 °C).

Agradecimientos

A la Dra. Ma. Aurora Armienta y el personal del Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica, UNAM; a la Dra. Gabriela Vázquez y Ariadna Martínez del Instituto de Ecología A.C., por apoyo con los análisis de muestras de agua. A la Dra. Susana Sosa, Dra. Ana María Soler y Dra.

Cecilia Caballero por su apoyo en el trabajo de campo y laboratorio. Estas investigaciones tuvieron el apoyo económico de los proyectos DGAPA-PAPIIT-IV100215, CONACyT C0005-190519 y CONACyT 167621.

Referencias

- Asmerom, Y., Polyak, V. J., & Burns, S. J., (2010). Variable winter moisture in the southwestern United States linked to rapid glacial climate shifts. *Nature Geoscience*, 3(2), 114-117. <https://doi.org/10.1038/ngeo754>
- Battarbee, R. W., Jones, V. J., Flower, R. J., Cameron, N.G., Bennion, H., Carvalho, L., & Juggins, S., (2001). Diatoms, in Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators*. Kluwer, Dordrecht, 155-202.
- Berger, A. (1992) Orbital variations and insolation database. *IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series# 92-007*. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Birks, H. J. B., Line, J. M., Juggins, S., Stevenson, A. C., & Terbraak, C. J. F., (1990). Diatoms and Ph Reconstruction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 327(1240), 263-278. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0062>
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., y Ortega, B., (2010). Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 359-377.
- Caballero M., Lozano-García S., Ortega-Guerrero D., & Correa-Metrio A. (2019) Quantitative estimates of orbital and millennial scale climatic variability in central Mexico during the last 40,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 205, 62-75. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.002>
- Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W., & McCabe, A. M. (2009). The last glacial maximum. *Science*, 325(5941), 710-714. <https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- Correa-Metrio, A., Bush, M., Lozano-García, S., & Sosa-Nájera, S. (2013). Millennial-Scale Temperature Change Velocity in the Continental Northern Neotropics. *PLoS One* 8(12), e81958. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081958>
- Correa-Metrio, A., Bush, M. B., Cabrera, K. R., Sully, S., Brenner, M., Hodell, D. A., Escobar, J., & Guilderson, T. (2012). Rapid climate change and no-analog vegetation in lowland Central America during the last 86,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 38, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.01.025>
- Davies, S. J., Metcalfe, S., Caballero, M., & Juggins, S. (2002). Developing diatom-based transfer functions for Central Mexican lakes, *Hydrobiologia*, 467(1), 199-213. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1014971016298>
- Gasse, F., Barker, P., Gell, P.A., Fritz, S.C., & Chalifé, F. (1997). Diatom-inferred salinity in palaeolakes: an indirect tracer of climate change. *Quaternary Science Reviews*, 16(6), 547-563. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(96\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(96)00081-9)
- Gasse, F., Juggins, S., & Khelifa, L. B. (1995). Diatom-based transfer functions for inferring past hydrochemical characteristics of African lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 117(1-2), 31-54. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)00122-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)00122-0)
- Hodell, D. A., Anselmetti, F. S., Ariztegui, D., Brenner, M., Curtis, J. H., Gilli, A., Grzesik, D. A., Guilderson, T. J., Müller, A. D., Bush, M. B., Correa-Metrio, A., Escobar, J., & Kutterolf, S. (2008). An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quaternary Science Reviews*, 27(11-12), 1152-1165. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.02.008>
- Joynt, E. H., & Wolfe, A. P., (2001). Paleoenvironmental inference models from sediment diatom assemblages in Baffin Island lakes (Nunavut, Canada) and reconstruction of summer water temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(6), 1222-1243. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfas-58-6-1222>
- Juggins, S., (2016). rioja: Analysis of Quaternary Science Data. *The R Project for Statistical Computing*. <http://CRAN.R>.
- Lachniet, M. S., & Vázquez-Selem, L., (2005). Last glacial maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quaternary International*, 138-139, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.02.010>
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20(1), PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Lozano-García, S., Brown, E. T., Ortega, B., Caballero, M., Werne, J., Fawcett, P. J., Schwab, A., Valero-Garcés, B. L., Schnurrenberger, D., O'Grady, R., Stockhecke, M., Steinman, B., Cabral-Cano, E., Caballero, C., Sosa-Nájera, S., Soler, A. M., Pérez, L., Noren, A., Myrbo, A., ... Vergara-Huerta, F. (2017). Perforación profunda en el lago de Chalco: reporte técnico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 69(2), 299-311. <https://doi.org/10.18268/BSGM2017v69n2a2>
- Lozano-García, S., Ortega, B., Roy, P.D., Beramendi-Orosco, L., & Caballero, M. (2015). Climatic variability in the northern sector of the American tropics since the latest MIS 3. *Quaternary Research*, 84(2), 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.07.002>
- Metcalfe, S., & Davies, S., (2007). Deciphering recent climate change in central Mexican lake records. *Climatic Change*, 83(1), 169-186. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9152-0>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M., & Wagner, H. (2015). vegan: Community Ecology Package. *The R Project for Statistical Computing*. <http://CRAN.R>.
- Ortega-Guerrero, B., Lozano-García, M., Caballero, M., y Herrera-Hernández, D. A. (2015). Historia de la evolución deposicional del lago de Chalco, México, desde el MIS 3. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 185-201.
- Ortega-Guerrero, B., Lozano-García, M. S., Herrera-Hernández, D., Caballero, M., Beramendi Orosco, L.E., Bernal, J.P., Torres-Rodríguez, E., & Avendaño-Villeda, D., (2017). Lithostratigraphy and physical properties of lacustrine sediments of the last ca. 150 kyr from Chalco

- basin, central México. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 507-524. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.003>
- Peterson, L.C., Haug, G.H., Hughen, K.A., & Röhl, U. (2000). Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 290(5498), 1947-1951. <https://doi.org/10.1126/science.290.5498.1947>
- Pienitz, R., Smol, J. P., & Birks, H. J. B. (1995). Assessment of freshwater diatoms as quantitative indicators of past climatic change in the Yukon and Northwest Territories, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 13(1), 21-49. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00678109>
- R Development Core Team, (2009). *R: A language and environment for statistical computing*, 3.1. <http://www.R-project.org>
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J. E., Vallejo-Gomez, E., & Gonzalez-Velazquez, A. (2001). Buried palaeosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in central Mexico. *Journal of Quaternary Science*, 16(4), 375-389. <https://doi.org/10.1002/jqs.615>
- Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Vázquez, G., Pérez, L., & Zawisza, E. (2017). Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 313-370. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n2a3>
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Roy, P., Ortega, B., Beramendi-Orosco, L., Correa-Metrio, A., & Caballero, M. (2015). Last Glacial droughts and fire regimes in the central Mexican highlands. *Journal of Quaternary Science* 30(1), 88-99. <https://doi.org/10.1002/jqs.2761>
- Vázquez-Selem, L., & Heine, K., (2011). Late Quaternary Glaciation in Mexico, in Ehlers, J., Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D. (Eds.), *Quaternary glaciations-extent and chronology: a closer look*. Elsevier, Amsterdam, 849-861.
- Vázquez, G., & Caballero, M., (2013). The structure and species composition of the diatom communities in tropical volcanic lakes of eastern Mexico. *Diatom Research*, 28, 77-91. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2012.739974>
- Wang, Y.-J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z., Wu, J., Shen, C.-C., & Dorale, J.A. (2001). A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*. 294(5550), 2345-2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>

Respuestas de la precipitación y la vegetación en la Sierra Madre Oriental al cambio climático de los últimos 32,500 años¹

Priyadarsi D. Roy²

Resumen

Desentrañar condiciones ambientales del pasado, en ecosistemas áridos propensos a la sequía, siempre ha sido una tarea desafiante. El registro sedimentario de la cuenca Sandia, pobre en materia orgánica, develó las tendencias de cambio en precipitación y tipo de vegetación en una porción de la Sierra Madre Oriental, en el nororiente de México, durante los últimos 32,500 años. La evaluación con respecto a la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA) reveló condiciones de mayor humedad con variaciones casi cíclicas de precipitación y mayor abundancia de plantas C3, durante el estadio frío de la OMA en escalas milenarias a orbitales, con una temperatura superficial (TSM) del norte del golfo de México por debajo de los 26 °C. Sin embargo, las precipitaciones disminuyeron durante los estadiales de Heinrich. Las condiciones secas con tormentas intensas se volvieron más frecuentes cuando la OMA cambió a un estadio cálido con TSM > 26 °C, después del interstadial Bølling-Allerød, y las plantas C4 dominaron desde hace 5000 años. El presente estudio sugiere que los procesos superficiales y la vegetación han respondido de manera diferente a las variaciones climáticas globales.

Palabras clave: Cambio climático global; último glacial; Holoceno; Oscilación Multidecadal del Atlántico; registro geológico

Abstract

Unravelling the past environmental conditions of drought-prone arid ecosystems has always been a challenging task. An organic poor but gypsum-rich sedimentary archive from drought-prone Sandia Basin near to the Sierra Madre Oriental Mountains disentangled the general tendencies of precipitation and vegetation in data scarce northeast Mexico over the last 32,500 years that might experience more frequent droughts in the coming century. It helped to evaluate the hydroclimate with respect to the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) states in millennial-to-orbital scales. Generally wetter conditions with almost cyclic variations in precipitation and more C3 plants in the watershed occurred during the cool AMO state with northern Gulf of Mexico SST remaining < 26 °C. Precipitation, however, decreased during the Heinrich Stadials. Drier hydroclimate and high intensity short-lived storms became more frequent as the AMO changed to warm mode with SST > 26 °C after the Bølling-Allerød interstadial. The drought tolerant C4 plants expanded in last 5,000 years. This study suggested that the near-surface processes and watershed vegetation have responded differently to the events of global climate change.

Key words: Global climate change; Last Glacial; Holocene; Atlantic Multidecadal Oscillation; Geological register

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Roy, P., Vera-Vera, G., Sánchez-Zavala, J. L., Shanahan, T. M., Quiroz-Jiménez, J. D., Curtis, J. H., Girón-García, P., Lemus-Neri, V. H., & Muthusankar, G. (2020). Depositional histories of vegetation and rainfall intensity in Sierra Madre Oriental Mountains (northeast Mexico) since the late Last Glacial. *Global and Planetary Change*, 187, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103136>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Priyadarsi Roy y que recibió la Mención Honorífica dentro de la Categoría 1 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: roy@geologia.unam.mx

Introducción

Los modelos climáticos prevén un aumento de la temperatura media anual y una disminución de la precipitación anual durante el próximo siglo, en la región semiárida del nororiente de México, en respuesta al aumento de los gases de efecto invernadero. La combinación de ambos escenarios estresaría los recursos acuáticos superficiales en una región, donde estos son de por sí ya escasos, y los suministros de agua subterránea se han reducido significativamente. Estos modelos también predicen que el calentamiento futuro incrementará la frecuencia de eventos de lluvia con alta intensidad, lo que resultará en inundaciones repentinas potencialmente catastróficas y en erosión de los suelos (Routschek *et al.*, 2014). Un escenario de sequías frecuentes y sostenidas, ocasionadas por emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, podría generar grandes desafíos socioeconómicos. Los recursos hídricos limitados podrían desencadenar una mayor migración de población dedicada al sector agrícola. Feng *et al.* (2010) proyectaron que una reducción de hasta 48 % en la productividad agrícola produciría una migración de 2-10 %, lo que supone que entre 1.4 y 6.7 millones de adultos mexicanos de la actual población, migraran hacia los Estados Unidos a finales del presente siglo.

Los registros de anillos de árboles sobre sequías pasadas están limitados a los últimos siglos (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Stahle *et al.*, 2016). Estos datos (aunque cualitativos) sobre las respuestas de este ecosistema con escasez de agua durante varios miles de años, en el pasado geológico, que abarquen eventos glaciales, interglaciales, estadales e interestadales del cambio climático global, podrían mejorar tanto la predictibilidad de los modelos climáticos, como la preparación de nuestra sociedad para mitigar sus diversos efectos. A pesar de que el polen fósil, generalmente, está mal conservado en la mayoría de los archivos sedimentarios paleolacustres de esta región seca (e.g. Metcalfe *et al.*, 2002), los registros de paleosalinidad y paleoerosión/descarga obtenidos a partir de variación en composición química, se han interpretado en términos de estacionalidad y de distribución geográfica de precipitación (Barron *et al.*, 2012; Roy *et al.*, 2012, 2015). Algunos de ellos aportaron información importante sobre el régimen de tormentas invernales y la frecuencia de los ciclones tropicales durante el intervalo frío del último glacial y el monzón norteamericano (MNA), en el periodo más cálido de desglaciación y el Holoceno.

Sin embargo, la Sierra Madre Oriental sigue siendo una de las regiones de México con poca información, y los datos se limitan al periodo de desglaciación y al Holoceno (Roy *et al.*, 2016). Este trabajo es una síntesis de Roy *et al.* (2020), quienes reconstruyen las respuestas de la vegetación y de los procesos superficiales (p. ej. erosión) en las estribacio-

nes occidentales de la Sierra Madre Oriental, a través de la reconstrucción de condiciones húmedas y secas en respuesta al cambio climático global, en escalas orbitales-milenarias, desde finales de la última glaciación, la cual evalúa la frecuencia de tormentas con respecto a los estadios cálidos y fríos de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA).

Desarrollo

Ubicación y clima actual

La cuenca endorreica de Sandía (24° N, 100° W) se localiza en las estribaciones occidentales de la Sierra Madre Oriental, a ~ 240 km del golfo de México, en la región nororiental de México (Figura 1A). Una estación meteorológica cercana (Santa Rosa; ~17 km al oeste de la cuenca) registra una precipitación media anual de ~350 mm en menos de 40 días húmedos al año, durante las estaciones cálidas (verano-otoño). Esta cuenca y su región circundante con escasez hídrica reciben la mayor parte de la precipitación anual con humedad proveniente del golfo de México y el mar Caribe (Wang *et al.*, 2011). Las lluvias de principios de verano (en mayo) están asociadas con el *Low Level Jet*; mientras que las lluvias, entre los finales del verano y el otoño (agosto-octubre), están asociadas con tormentas tropicales (Wang *et al.*, 2011). Las variaciones de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), ocasionadas por la temperatura superficial del mar (TSM), fuerzan la dinámica de la actividad de los huracanes (Poore *et al.*, 2009). La precipitación anual total de esta región se incrementa durante la fase fría de la OMA (p. ej. 1964-1989AD), debido a una mayor precipitación veraniega, por lo que la condición cambia de seca a subhúmeda (Sánchez-Santillán *et al.*, 2012). Las condiciones más cálidas, con una temperatura media superior a 30 °C durante mayo-julio, y una temperatura máxima que alcanza los 47 °C en junio, aumentan la evapotranspiración.

Registro paleoclimático

Este registro se obtuvo a partir de los componentes orgánicos e inorgánicos de un depósito lacustre enriquecido de yeso (SO₄: 0.39-22.13 %, promedio: 17.10 %) de 300 cm de profundidad, con un contenido promedio de carbono orgánico total (TOC) de 1.07 % (Figura 1B). Un modelo de edad vs. profundidad con edades ¹⁴C AMS calibradas en OxCal (P sequence, k=1.0; Bronk Ramsey, 2008, 2009; Reimer *et al.*, 2013) permitió estimar tasas de sedimentación entre 3.1 y 20.2 cm/mil años y ~32.5 cal ka a.P o 32,500 años antes del presente (a.P), para la base del archivo sedimentario, así como una pobre preservación de sedimentos o un hiato deposicional entre ~12.7-6.2 cal ka a.P o entre 12,700 y 6,200 años a.P. Los análisis de DRX indicaron la presencia de calcita y yeso. Los cristales prismáticos aciculares de

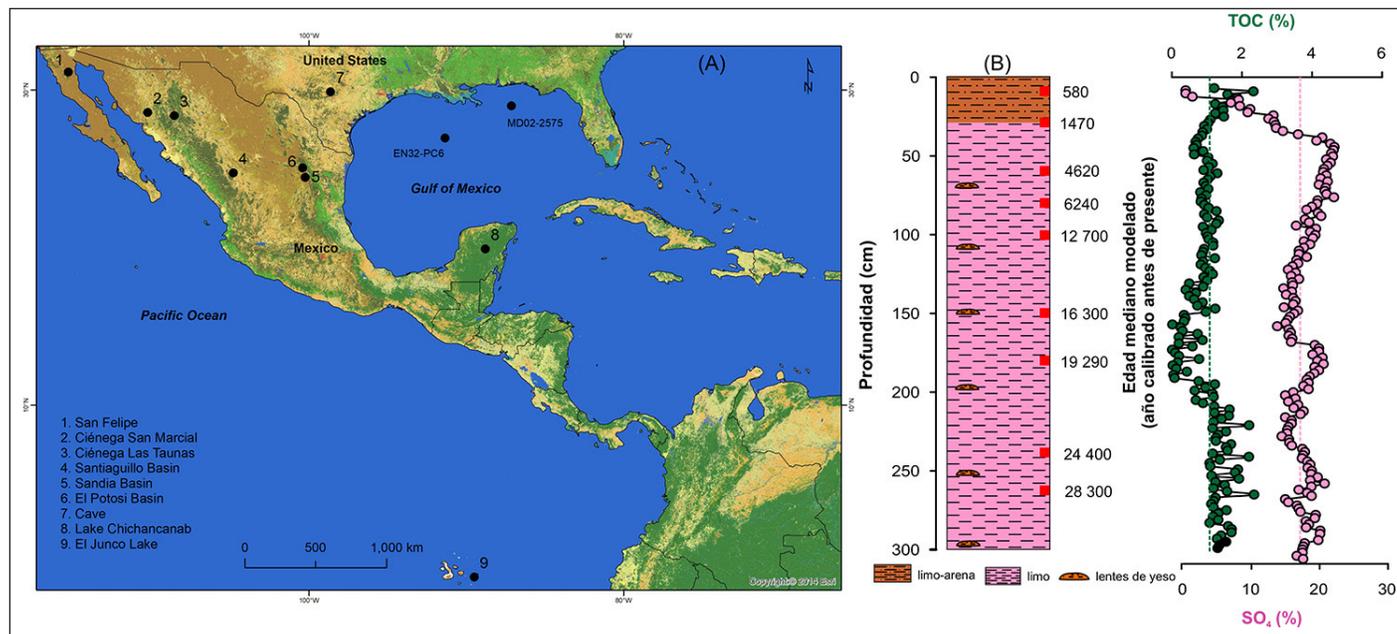


Figura 1. (A) Mapa que muestra las ubicaciones de la cuenca Sandia (nororiente de México) y otros registros paleoclimáticos. (B) La litología del registro geológico, la información cronológica y las concentraciones de carbono orgánico total (TOC) y sulfatos (SO₄) fueron utilizadas para algunas interpretaciones (modificada de Roy *et al.*, 2020).

yeso, tanto como los de inclusiones en la matriz como los de matriz libre, indican un crecimiento desplazado dentro de los sedimentos (filtración subsuperficial), así como subacuático (cuerpo de agua estancada) entre ~32.5-4.7 cal ka a.P o 32,500-4,700 años a.P (p. ej. Rosen y Warren, 1990). La mínima presencia de yeso y la abundante presencia de calcita representan condiciones efímeras entre ~4.7-1.4 cal ka a.P o 4,700-1,400 años a.P.

Historia de la vegetación

La vegetación moderna de la cuenca se compone de bosques de pino y encino (*Pinus moctezumae*, *P. teocote*, *Quercus greggii*, *Q. mexicana*) y arbustos de encino (*Quercus clavicola*, *Q. canbyi*, *Q. porphyrogenita*, *Q. fusiformis*) en las colinas orientales de más de 2000 msnm (e.g. Starker-Leopold, 1950). Los pastizales de mezquite (*Yuca treculeana*, *Acacia amentacea*) y los matorrales desérticos son más abundantes en elevaciones más bajas (~1580-1900 msnm), tanto en lados del este como en las del norte (Starker-Leopold, 1950). En ausencia de polen fósil y de perturbaciones causadas a la relación C/N, las composiciones isotópicas de carbono preservadas en la biomasa ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) se relacionaron cuidadosamente con las plantas terrestres de diferentes tipos de fotosíntesis, desde finales del último glacial (p. ej. Crayn *et al.*, 2015). Las especies con fotosíntesis de tipo C3 crecen en ambientes húmedos con valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-37‰ a -20‰ V-PDB; promedio: -27‰ VPDB; Kohn, 2010), menor comparadas con las plantas de fotosíntesis tipo C4, las cuales

crecen en regiones con escasez de agua ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$: -17‰ a -9‰ VPDB; promedio: -13‰ VPDB; Cerling *et al.*, 1997). La composición de la vegetación fue interpretada, solamente, en términos de contribuciones relativas de plantas C3 y C4. El carbono orgánico, en los sedimentos entre 32,500 y 12,700 años a.P ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$: -24.32‰ y -18.84‰ VPDB), se obtuvo más de las plantas C3, y no cambió significativamente durante los estadales más fríos (Heinrich o H) e interestadales más cálidos (p. ej. Bolling-Allerod o B/A) (Figura 2). Dado que el bosque de coníferas, en el norte de Baja California, se expandió a elevaciones más bajas, durante la última glaciación y desglaciación (Lozano-García *et al.*, 2002), y el $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ de la biomasa generalmente se reduce en 1-2‰ por km de paisaje disminuido (Marshall y Zhang, 1994), las variaciones menores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ podrían deberse a la expansión y retraimiento de la vegetación C3 a diferentes altitudes, durante los eventos de cambio en la temperatura global. Los bosques de pino-encino y los arbustos de encino que hoy crecen en elevaciones mayores a los 2000 msnm, probablemente, se expandieron a niveles de menor elevación durante los estadales de Heinrich (p. ej. H3 y H1, en Figura 2).

La ausencia de sedimentos, depositados entre ~12,700-6,200 años a.P, no permitió la reconstrucción de la vegetación durante la transición Pleistoceno-Holoceno (incluyendo el estadal del Younger Dryas), como entre el Holoceno temprano y medio. Sin embargo, los valores $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-17.14‰ y -15.29‰ VPDB) en sedimentos de ~5,000-1,400 años

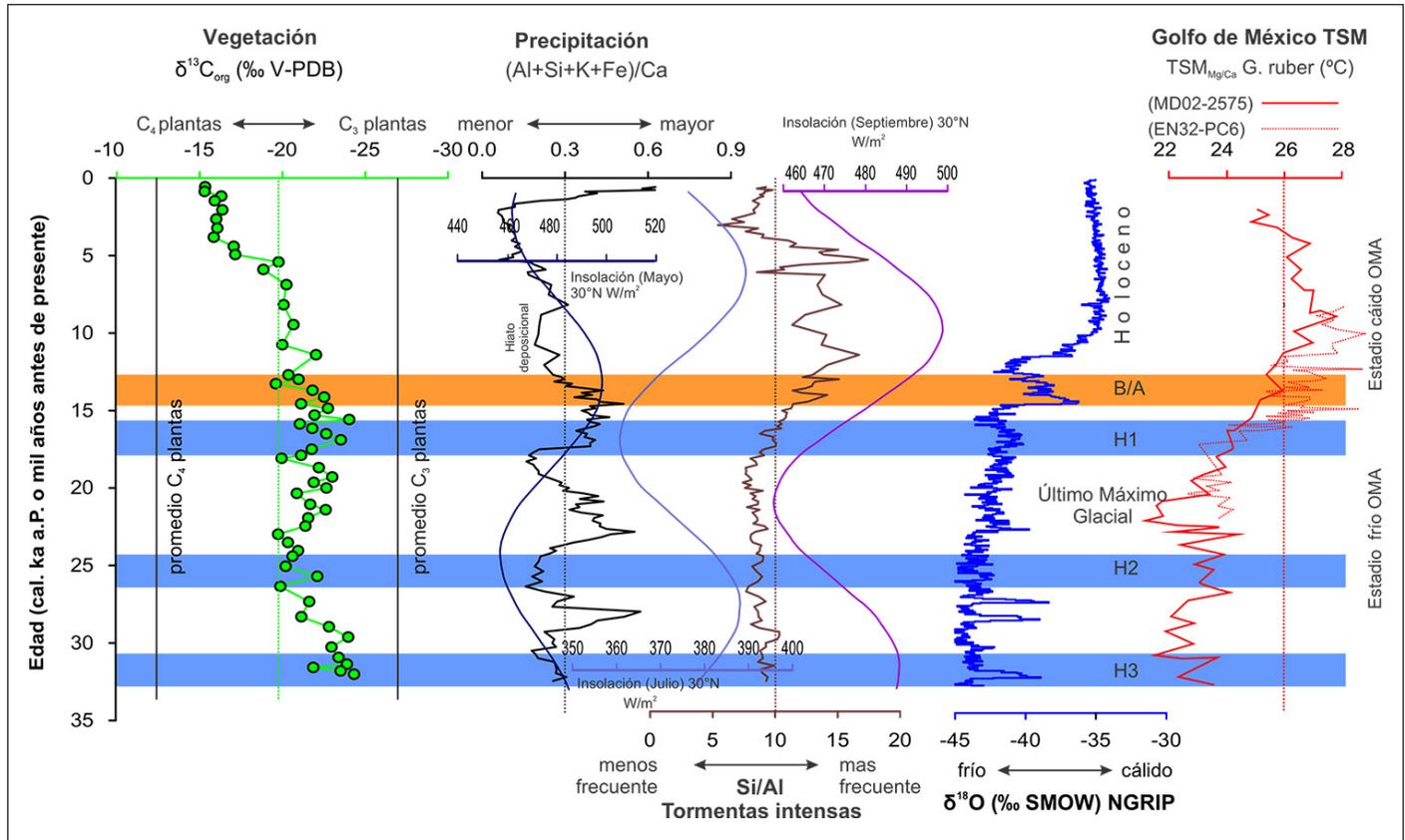


Figura 2. Registros proxy que indican el posible tipo de fotosíntesis de la vegetación ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$), la precipitación ($(\text{Al}+\text{Si}+\text{K}+\text{Fe})/\text{Ca}$) y la frecuencia de tormentas (Si/Al) durante los últimos 32,500 años. Los registros proxy son evaluados con respecto a la insulación estacional, la temperatura global y la TSM del golfo de México en escalas milenarias a orbitales (modificada de Roy *et al.*, 2020).

a.P. sugieren la presencia de más plantas tipo C4 durante el Holoceno tardío. Este periodo es contemporáneo al intervalo de más pastizales de tipo C4 en la cuenca cercana de El Potosí (Chávez-Lara *et al.*, 2019). La expansión sustancial de plantas C4 con valores homogéneos de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ podría haber ocurrido bajo una relativa estabilidad ambiental de los últimos 5,000 años (Hattersley, 1982). Es posible que los componentes desérticos de la vegetación moderna, representados por los pastizales de mesquite y los matorrales desérticos, hayan continuado desde entonces. La escorrentía inferior al promedio, en Las Cruces, también refleja la aridez regional durante el Holoceno tardío, específicamente en la edad Megalayense (Roy *et al.*, 2013).

Historia de las precipitaciones y las tormentas

Con la relación $(\text{Al}+\text{Si}+\text{K}+\text{Fe})/\text{Ca}$ se estimó la abundancia de minerales arcillosos de capas mezcladas, y la relación Si/Al reflejó la abundancia del cuarzo en el archivo sedimentario (Figura 2). La correlación negativa entre $(\text{Al}+\text{Si}+\text{K}+\text{Fe})/\text{Ca}$ y la abundancia del yeso (mineral evaporítico) ($r=-0.8$, $p<0.05$) sugirió que el transporte de más minerales arcillosos

de capas mezcladas desde las litologías de los alrededores hacia la cuenca lacustre ocurrió durante los periodos húmedos de $\sim 29,000$ - $28,000$, $\sim 23,500$ - $20,500$ y $\sim 17,500$ - $13,500$ años a.P. Todos estos eventos de más precipitaciones y baja salinidad fueron contemporáneos al último glacial tardío y a la desglaciación (p. ej. miembros del proyecto NGRIP, 2004; Figura 2). Dichos eventos fueron casi cíclicos, separados entre sí por $\sim 5,500$ o $6,000$ años, ocurridos dentro de un régimen dominado por tormentas invernales, en el norte de la península de Baja California (cuenca San Felipe, Roy *et al.*, 2012). La condición húmeda de Baja California estuvo representada por depósitos aluviales hacia la zona sur de la península (Murillo-Nava *et al.*, 1999) y una mayor descarga fluvial hacia el océano Pacífico (Blanchet *et al.*, 2007).

La correlación entre Si/Al y el yeso ($r=0.3$, $p<0.05$) indicó que varios intervalos de sedimentos ricos en cuarzo fueron depositados en periodos secos. La abundancia de estos sedimentos se incrementó entre la parte tardía del interestadial B/A y $\sim 12,700$ años a.P., y entre $\sim 6,200$ - $4,000$ años a.P., después de un hiato deposicional. Ambos periodos estuvieron dentro de un régimen dominado por precipitacio-

nes veraniegas, asociado al MNA y a ciclones tropicales al norte de Baja California (Roy *et al.*, 2012). El intenso MNA y los ciclones tropicales formados en el océano Pacífico con franjas de lluvias expandidas, extendieron las precipitaciones de temporadas cálidas hacia la región fronteriza, que se extiende desde el centro-norte de México hasta los interiores continentales del suroeste de EE. UU. (Roy *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta que las litologías que contienen cuarzo en los alrededores de la cuenca Sandia se localizan a una distancia mayor, el transporte de más cuarzo durante el cálido B/A y el Holoceno medio, reflejaba un mayor poder erosivo de las escorrentías causado por la precipitación. En condición generalmente seca, los eventos de precipitaciones intensas y de corta duración incrementan el poder erosivo de la escorrentía significativamente (p. ej. Nearing *et al.*, 2004). Actualmente, un mayor número de huracanes de categoría 4 y 5 se forman en el norte del golfo de México durante una fase cálida de la OMA (Poore *et al.*, 2009). Sin embargo, Sánchez-Santillán *et al.* (2012) observaron que el nororiente de México recibió más precipitaciones en una fase fría de la OMA. La influencia de la OMA fue evaluada mediante la comparación con TSM del norte del golfo de México, obtenidas mediante las relaciones Mg/Ca en *Globigerinoides* de los núcleos MD02-2575 y EN32-PC6 (Figura 2; Flower *et al.*, 2004; Ziegler *et al.*, 2008). TSM menores o iguales a los 26 °C indican un estadio cálido de la OMA desde el B/A, en escalas milenarias a orbitales. Estos resultados plantearon la hipótesis de que la frecuencia de eventos de lluvia, a través de tormentas de corta duración y la tendencia de aridez, aumentaron durante un periodo de mayor insolación otoñal y en el estadio cálido de la OMA cálida. La humedad proveniente del golfo de México alcanzó al centro de Texas durante el B/A (Feng *et al.*, 2014).

Durante la parte tardía de la última glaciación y desglaciación, la baja TSM (<26 °C), posiblemente, favoreció un estadio frío de la OMA y una menor frecuencia de huracanes en escalas milenarias a orbitales. Los eventos húmedos, casi cíclicos, se pudieron haber causado, en ocasiones, por mayores precipitaciones en diferentes meses del verano (ver tendencias de precipitación y la insolación de mayo y julio, en Figura 2). Este y otros registros regionales indican abundancia de vegetación de tipo C3. Una mayor biomasa, posiblemente, resistió la erosión en la cuenca. No obstante, las precipitaciones disminuyeron y se mantuvieron por debajo del promedio durante los estadiales de Heinrich H3 y H2, contrario al H1 donde sí variaron, al igual que la TSM del golfo de México que incrementó hasta ~3 °C, durante este periodo (Flower *et al.*, 2004). Mayores precipitaciones, pero con menor poder erosivo, transportaron sedimentos

desde litologías cercanas durante la primera parte del B/A; mientras que las precipitaciones con mayor poder erosivo, ocasionadas por una mayor frecuencia de tormentas de corta duración, transportaron sedimentos desde litologías de mayores distancias durante la fase final del B/A.

Conclusiones

En la región semiárida del nororiente de México y en las estribaciones occidentales de la Sierra Madre Oriental, los registros geológicos de vegetación y precipitación, durante diferentes eventos de cambio climático global en escalas milenarias a orbitales, sugirieron:

- i. Mayor abundancia de plantas C3 durante el último glacial tardío y la desglaciación, y su expansión a elevaciones más bajas durante los estadiales de Heinrich H3 y H1. La expansión sustancial de más plantas C4 ocurrió solamente durante los últimos 5,000 años, en condiciones estables, pero áridas.
- ii. Los eventos de lluvia causados por tormentas fueron menos frecuentes durante el último glacial tardío y la desglaciación; mientras que los eventos más húmedos fueron casi cíclicos durante esta fase de Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA) fría. Hubo reducción en la precipitación durante los estadiales de Heinrich.
- iii. El incremento en la frecuencia de tormentas, desde el interstadial Bølling-Allerød (B/A), ocurrió durante una fase de OMA cálida, pero en un periodo de precipitación anual total reducida.

Referencias

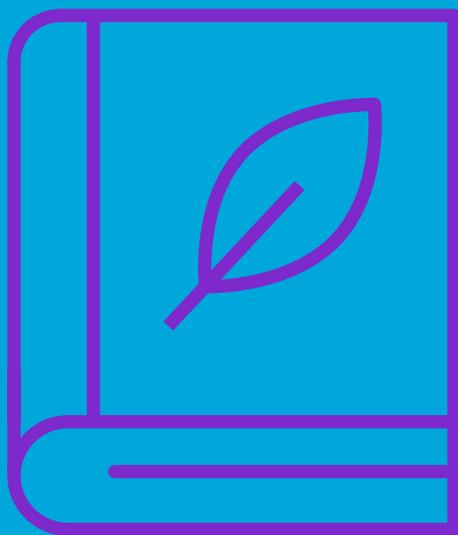
- Blanchet, C. L., Thouveny, N., Vidal, L., Leduc, G., Tachikawa, K., Bard, E., & Beaufort, L. (2007). Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic variations over southern Baja California: a rock magnetic approach. *Quaternary Science Reviews*, 26(25-28), 3118-3133. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.07.008>
- Barron, J. A., Metcalfe, S. E., & Addison, J. A. (2012). Response of the North American monsoon to regional changes in ocean surface temperature. *Paleoceanography*, 27(3). <https://doi.org/10.1029/2011PA002235>
- Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337-360. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Bronk Ramsey, C. (2008). Deposition models for chronological records. *Quaternary Science Reviews*, 27(1-2), 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.01.019>
- Cerling, T. E., Harris, J. M., MacFadden, B. J., Leakey, M. G., Quade, J., Eisenmann, V., & Ehleringer, J.R. (1997). Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 389, 153-158.

- <https://doi.org/10.1038/38229>
- Chávez-Lara, C. M., Holtvoeth, J., Roy, P. D., & Pancost, R. D. (2019). Lipid biomarkers in lacustrine sediments of subtropical northeastern Mexico and inferred ecosystem changes during the late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 535, 109343. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109343>
- Crayn, D. M., Winter, K., Schulte, K., & Smith, J. A. C. (2015). Photosynthetic pathways in Bromeliaceae: the phylogenetic and ecological significance of CAM and C³ based on carbon isotope ratios for 1893 species. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 178(2), 169–221. <https://doi.org/10.1111/boj.12275>
- Feng, W., Hardt, B. F., Banner, J. L., Meyer, K. J., James, E. W., Musgrove, M., Lawrence Edwards, R., Cheng, H., & Min, A. (2014). Changing amounts and sources of moisture in the U.S. southwest since the Last Glacial Maximum in response to global climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.046>
- Feng, S. H., Krueger, A. B., & Oppenheimer M. (2010). Linkages among climate change, crop yields and Mexico-US cross-border migration. *PNAS*, 107(32), 14257–14262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1002632107>
- Flower, B. P., Hastings, D. W., Hill, H. W., & Quinn, T. M. (2004). Phasing of deglacial warming and Laurentide ice sheet meltwater in the Gulf of Mexico. *Geology*, 32(7), 597–600. <https://doi.org/10.1130/G20604.1>
- Hattersley, P. W. (1982). $\delta^{13}\text{C}$ values of C₄ types in grasses. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 139–154. <https://doi.org/10.1071/PP9820139>
- Kohn, M. J. (2010). Carbon isotope compositions of terrestrial C₃ plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo)climate. *PNAS*, 107(46), 19691–19695. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004933107>
- Lozano-García, M. S., Ortega-Guerrero, B., & Sosa-Nájera, S. (2002). Mid to Late Wisconsin pollen record of San Felipe Basin, Baja California. *Quaternary Research*, 58(1), 84–92. <https://doi.org/10.1006/qres.2002.2361>
- Marshall, J. D., & Zhang, J. (1994). Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in native plants of the north-south rockies. *Ecology*, 75(7), 1887–1895. <https://doi.org/10.2307/1941593>
- Metcalfé, S., Say, A., Black, S., McCulloch, R., & O'Hara, S. (2002). Wet conditions during the Last Glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora Basin, Mexico. *Quaternary Research*, 57(1), 91–101. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2292>
- Murillo de Nava, J. M., Gorsline, D. S., Goodfriend, G. A., Vlasov, V. K., & Cruz-Orozco, R. (1999). Evidence of Holocene climatic changes from aeolian deposits in Baja California Sur, Mexico. *Quaternary International*, 56(1), 141–154. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)00035-4)
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., & O'Neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50.
- NGRIP project members. (2004). High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431, 147–151. <https://doi.org/10.1038/nature02805>
- Poore, R. Z., Delong, K. L., Richey, J. N., & Quinn, T. M. (2009). Evidence of multidecadal climate variability and the Atlantic Multidecadal Oscillation from a Gulf of Mexico sea-surface temperature-proxy record. *Geo-Marine Letters*, 29, 477–484. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0154-6>
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Lawrence Edwards, R., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hafflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., ... van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869–1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Rosen, M. R., & Warren, J. K. (1990). The origin and significance of groundwater-seepage gypsum from Bristol Dry Lake, California, USA. *Sedimentology*, 37(6), 983–996. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.1990.tb01840.x>
- Routschek, A., Schmidt, J., & Kreienkamp, F. (2014). Impact of climate change on soil erosion – A high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany. *Catena*, 121, 99–109. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_26
- Roy, P. D., Caballero, M., Lozano, S., Morton, O., Lozano, R., Jonathan, M. P., Sánchez, J. L., & Macías, M. C. (2012). Provenance of sediments deposited at paleolake San Felipe, western Sonora Desert: Implications to regimes of summer and winter precipitation during last 50 cal kyr BP. *Journal of Arid Environments*, 81, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.01.008>
- Roy, P. D., Chávez-Lara, C. M., Beramendi-Orosco, L. E., Sánchez-Zavala, J. L., Muthu-Sankar, G., Lozano-Santacruz, Quiroz-Jimenez, R., & López-Balbiaux, N. (2015). Paleohydrology of the Santiaguillo Basin (Mexico) since late last glacial and climate variation in southern part of western subtropical North America. *Quaternary Research*, 84, 335–347. <https://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2015.10.002>
- Roy, P. D., Rivero-Navarrete, A., Lopez-Balbiaux, L., Pérez-Cruz, L. L., Metcalfe, S. E., Muthu Sankar, G., & Sánchez-Zavala, J. L. (2013). A record of Holocene summer-season palaeohydrological changes from the southern margin of Chihuahua Desert (Mexico) and possible forcings. *The Holocene*, 23, 1105–1114. <https://doi.org/10.1177/0959683613483619>
- Roy, P. D., Rivero-Navarrete, A., Sánchez-Zavala, J. L., Beramendi-Orosco, L. E., Muthu-Sankar, G., & Lozano-Santacruz, R. (2016). Atlantic Ocean modulated hydroclimate of the subtropical northeastern Mexico since the last glacial maximum and comparison with the southern US. *Earth and Planetary Science Letters*, 434, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.048>
- Roy, P. D., Vera-Vera, G., Sánchez-Zavala, J. L., Shanahan, T., Quiroz Jiménez, J. D., Curtis, J. H., Girón-García, P., Lemus-Neri, V. H.,

- Muthusankar, G. (2020). Depositional histories of vegetation and rainfall intensity in Sierra Madre Oriental Mountains (northeast Mexico) since the late Last Glacial. *Global and Planetary Change*, 187, 103136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103136>
- Sánchez-Santillán, N., Garduño-López, R., Vidal-Zepeda, R., & Sánchez-Trejo, R. (2012). Climate change in NE Mexico: influence of the North Atlantic Oscillation. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 78, 7-18. <http://dx.doi.org/10.14350/rig.32465>
- Stahle, D.W., Cook, E. R., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P., & Howard, I. M. (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>
- Starker-Leopold, A. (1950). Vegetation zones of Mexico. *Ecology*, 31(4), 507-518. <https://doi.org/10.2307/1931569>
- Villanueva-Diaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1-2), 117-131. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Wang, C., Liu, H., Lee, S.-K., & Atlas, R. (2011). Impact of the Atlantic warm pool on United States landfalling hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 38, L19702. <https://doi.org/10.1029/2011GL049265>
- Ziegler, N. D., Karas, C., Tiedemann, R., & Lourens, L. J. (2008). Persistent summer expansion of the Atlantic Warm Pool during glacial abrupt cold events. *Nature Geoscience*, 1, 601-605. <https://doi.org/10.1038/ngeo277>

GANADORES

Categoría 2



• Primer compendio sobre las mejores investigaciones en cambio climático de la UNAM 2021 •

Evaluando el riesgo y las posibles adaptaciones al cambio climático bajo un enfoque de sistema socioecológico¹

Gemma Abisay Ortiz Haro², Alma Mendoza Ponce³, Óscar Calderón Bustamante⁴, Julián A. Velasco Vinasco⁵, Francisco Estrada Porrúa⁶

Resumen

La evidencia sugiere que el cambio climático podría reducir drásticamente la productividad agrícola de México, teniendo consecuencias socioecológicas graves. El crecimiento poblacional y la creciente demanda de recursos exacerbarán estos impactos. Centrándonos en la producción de maíz de temporal, evaluamos el riesgo socioecológico que enfrentan los municipios en la actualidad y cómo el cambio climático podría modificar tal producción. Los municipios se clasificaron en función de sus características biofísicas y socioeconómicas, como temperatura, precipitación, población, producto interno bruto, marginación, y subsidios agrícolas. El estudio identifica los municipios que enfrentarían un mayor riesgo en condiciones de cambio climático, y evalúa si los aumentos en los subsidios agrícolas podrían ser efectivos para reducir el riesgo futuro de los campesinos. Nuestros resultados muestran que, durante la década de 2010, el 36.8% de los municipios y el 15% de la población se encontraban en un muy alto y alto riesgo, respectivamente. Para 2070, bajo un escenario de alto calentamiento, estas cifras aumentan a 56.5% y 18.5%. Encontramos que un acrecentamiento generalizado de los subsidios agrícolas no es suficiente para compensar los efectos del cambio climático sobre el riesgo socioecológico de los productores de maíz de temporal. Sugerimos que se requiere una adaptación transformadora para gestionar el riesgo agrícola, que experimentan los sistemas socioecológicos en condiciones de cambio climático. Tales estrategias deben incluir el alivio de la pobreza, la promoción de variedades de cultivos resistentes y nativas, el desarrollo de capacidades para mejorar la gestión y el uso del agua, la tecnificación sostenible y la restauración.

Palabras clave: Sistema socioecológico; maíz; evaluación de riesgos; México; cambio climático.

Abstract

Evidence suggests that climate change could drastically reduce Mexico's agricultural productivity with severe socio-ecological consequences. Population growth and the increasing demand of resources will exacerbate these impacts. Focusing on rainfed maize production, we evaluate the socio-ecological risk that municipalities currently face and how climate change could modify it. Municipalities were classified based on their biophysical and socioeconomic traits like temperature, precipitation, population, gross domestic product, marginalization, and agricultural subsidies. The study identifies municipalities that would face higher risk under climate change conditions, and it evaluates whether increases in agricultural subsidies could be effective for reducing the farmers' future risk. Our results show that during the 2010's, 36.8% of the municipalities and 15% of the population were at very high and high risk, respectively. By 2070, under a high-warming scenario these figures increase to 56.5 and 18.5%. We find that a generalized augment in agricultural subsidies is not enough to compensate for the effects of climate change on the socio-ecological risk of rainfed maize producers. We suggest that transformative adaptation is required for managing the agricultural risk that socio-ecological systems experience under climate change conditions. Such adaptation strategies should include poverty alleviation, promotion of resistant and native varieties of crops, capacity building to improve management and water use, sustainable technification, and soil restoration.

Key words: Socio-ecological system; maize; risk assessment; Mexico; climate change.

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Haro, A., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., Velasco, J., & Estrada, F. (2021). Evaluating Risk and Possible Adaptations to Climate Change Under a Socio-Ecological System Approach. *Frontiers in Climate*, 3, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.674693>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Abisay Haro y que fue premiado dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático.

² Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS), Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: abisay@gmail.com

³ Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: amendoza@pincc.unam.mx

⁴ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: calderon@atmosfera.unam.mx

⁵ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: javelasco@atmosfera.unam.mx

⁶ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: feporrúa@atmosfera.unam.mx

Introducción

La agricultura es el principal medio de vida y una de las principales fuentes de autoconsumo e ingresos de los hogares, en las áreas rurales y periurbanas de los países de ingresos bajos y medios (Stevens, & Madani, 2016). Sin embargo, esta actividad es altamente sensible a cambios en los regímenes de temperatura y precipitación (IPCC, 2014). Debido a los cambios observados en el clima, casi todos los aspectos de la seguridad alimentaria, —es decir, producción, acceso, estabilidad en precios—, se han visto afectados, especialmente en sociedades pobres y vulnerables. Tal situación pone en riesgo y en un estado de inseguridad medios de vida agrícolas, amenaza la producción de alimentos a nivel local, y puede llevar a generar impactos en cascada en la población regional y global (Cohn *et al.*, 2016; Donatti *et al.*, 2019; Ray *et al.*, 2019).

El riesgo al cambio climático surge de la interacción entre una amenaza, la vulnerabilidad y la exposición (IPCC, 2014). Varios procesos sociales y económicos influyen en estos últimos atributos del riesgo. Esto significa que el riesgo no es una entidad aislada construida únicamente por los posibles impactos de los componentes biofísicos, sino que está vinculado a características y proceso socioeconómicos, ecológicos, culturales y políticos, que modifican la resistencia y resiliencia de un sistema (Kotzee, & Reyers, 2016). Los cambios en la exposición a elementos climáticos adversos como las altas temperaturas, cambios en los patrones de precipitación u olas de calor, podrían afectar negativamente a las personas y comunidades desfavorecidas cuyos medios de subsistencia dependen de las condiciones climáticas.

La agricultura es un sistema socioecológico dinámico (SSE) que resulta de las múltiples interacciones humano-ambiente en un proceso moldeado por incertidumbre, errores, aprendizaje y adaptación (Rivera-Ferre *et al.*, 2013; Maass, 2017). Aunque la agricultura es un sistema que los humanos manejan ampliamente, no podría existir sin los componentes biofísicos de los que depende. Además, el desarrollo agrícola también depende de los beneficios de la naturaleza a las personas (Díaz *et al.*, 2018), como son los servicios de regulación (p. ej., clima, polinización) y de provisión (p. ej., alimento). Sin embargo, también depende del manejo que los individuos dan a sus sistemas de cultivo. Por otra parte, la agricultura responde a otros procesos que acontecen a gran escala, como el clima y la macroeconomía, así como también a los contextos sociales y políticos. La agricultura es una coevolución de las relaciones entre elementos biofísicos, las prácticas socioeconómicas y culturales de los agricultores, y en aprendizaje empírico que han llevado a diferentes tipos de gestión que los individuos realizan en sus áreas de cultivo (Fuller *et al.*, 2015). El enfoque de SSE

identifica patrones complejos y dinámicas no lineales que surgen del vínculo social-natural, con diferentes niveles de organización y jerarquía (Liu *et al.*, 2007). De esta manera, bajo este enfoque, podemos analizar los subsistemas biofísico y social, su complejidad y sus sinergias en diferentes escalas espaciotemporales.

En el presente estudio aplicamos un enfoque SSE a la agricultura del maíz en México. En este país el maíz es el cultivo más importante en términos de superficie y producción, además de ser el componente básico de la dieta mexicana (Bellon *et al.*, 2018). La producción de maíz es esencial no solo en términos culturales, sino también en la seguridad alimentaria y en los medios de vida de las personas (Eakin, 2000). Los pequeños agricultores (≤ 5 ha sin tecnificación) —conocidos coloquialmente como “campesinos”—, producen cerca del 60 % de la producción nacional de maíz. Los productores de este cultivo dependen en gran medida de la agricultura de temporal, y las nuevas condiciones climáticas están imponiendo nuevos desafíos a la continuidad de este sustento (p. ej., reducción del rendimiento, satisfacción del autoconsumo y de la demanda local, disminución de los ingresos) (Monterroso *et al.*, 2011).

Existe una gran cantidad de estudios que han explorado el riesgo agrícola ante el cambio climático centrándose en los impactos productivos y económicos que utilizan estimaciones brutas de los rendimientos cambiantes (De Salvo *et al.*, 2013; Rosenzweig *et al.*, 2014). Otros estudios han evaluado los impactos del cambio climático sobre el maíz de temporal (Murray-Tortarolo *et al.*, 2018); mientras que otros han explorado el vínculo entre instituciones, riesgo climático y vulnerabilidad de la producción del maíz (Eakin *et al.*, 2018).

Si bien estos estudios son útiles para identificar tendencias generales e impactos del cambio climático en la producción de maíz, no han considerado la diversidad de contextos socioecológicos que pueden afectar su riesgo ni los desafíos socioecológicos que las personas pueden enfrentar para lidiar con los efectos de las nuevas condiciones climáticas para la producción del maíz.

Es por esto que combinamos datos climáticos y socioeconómicos en un marco de modelado integrador, para desarrollar un índice de riesgo multivariable. Identificamos cuáles municipios estarían en mayor riesgo ante el cambio climático, prestando especial atención al maíz de temporal. En México, la estrategia gubernamental establecida, desde hace décadas, para apoyar al sector agropecuario han sido los subsidios agrícolas, los cuales están dirigidos, principalmente, a los productores de cereales. Estos subsidios tienen como objetivo aumentar los rendimientos a través del uso de fertilizantes (Galeana-Pizaña *et al.*, 2021), lo que no necesariamente se traduce en una mejora de las capacidades para disminuir el

riesgo de las amenazas del clima cambiante. De modo que en el índice de riesgo incluimos aumentos en los subsidios para evaluar la eficacia, con la que esta estrategia determina el riesgo futuro del cambio climático para los productores de maíz. Finalmente, con base en el contexto de riesgo regional, propusimos posibles estrategias de adaptación para aliviar futuras amenazas climáticas para los productores de maíz.

Datos y métodos

Utilizamos un conjunto de datos socioeconómicos y biofísicos para representar los rasgos del sistema socioecológico de la agricultura del maíz de temporal. La información de las variables socioeconómicas se tomó de diversas fuentes de información, tales como INEGI para el caso de los datos de población y PIB; la CONAPO⁷ para el índice de marginación; la SADER⁸ para los subsidios agrícolas y la CONABIO⁹ para el porcentaje de población dedicada al sector primario. Los datos de rendimiento de maíz de temporal (2003-2018) se obtuvieron del SIAP¹⁰. Promediamos el rendimiento de los dos períodos de cultivo (primavera-verano y otoño-invierno) para obtener los rendimientos anuales. Las variables bioclimáticas se obtuvieron de la base de datos WorldClim¹¹

(Hijmans *et al.*, 2005). Estas capas son superficies interpoladas globalmente obtenidas de los registros de las estaciones climáticas y representan las tendencias anuales, estacionales y extremas de temperatura y precipitación para un período entre 1960 y 1990. Promediamos cada variable socioeconómica y climática para cada municipio de México.

Análisis de Componentes Principales (PCA)

El PCA (por sus siglas en inglés) se realizó para identificar factores que podrían usarse como un indicador del riesgo de cambio climático a nivel municipal, para los rendimientos de maíz y sus agricultores. Interpretamos los componentes principales (PC) o factores resultantes como índices de riesgo, que combinan elementos biofísicos y socioeconómicos, y que apuntan a representar los desafíos climáticos y no climáticos que afectan la producción de maíz de temporal (Tabla 1). En total, 2,457 municipios fueron clasificados de acuerdo a estos índices de riesgo.

Índice multivariado de riesgo

Nuestro análisis se enfocó en caracterizar las condiciones socioecológicas históricas (i.e., variables bioclimáticas y

Tabla 1. Descripción de variables

Variable	Descripción	Referencia
Temperatura media anual, (bio1), rango de temperatura (bio2, bio7), estacionalidad de la temperatura (bio4), y temperaturas extremas (bio5, bio6)	Se esperan aumentos en las temperaturas medias, cambios en la estacionalidad y condiciones climáticas extremas en el futuro para México. Como el cultivo de maíz está directamente relacionado con las condiciones de temperatura, esperamos que los aumentos de esta variable afecten los rendimientos (ton/ha). Ciertas etapas de desarrollo fenológico del maíz son altamente susceptibles a las altas temperaturas.	Feng <i>et al.</i> , (2015) NeSmith y Ritchie (1992) Porter <i>et al.</i> , (2014)
Precipitación anual y estacionalidad (bio12, bio15)	Ciertas etapas del desarrollo fenológico del maíz son muy susceptibles a cambios en los regímenes de precipitación anual.	Murray-Tortarolo <i>et al.</i> , (2018) Ureta <i>et al.</i> , (2020)
Marginación	La alta marginación es una expresión de la vulnerabilidad social de los agricultores y limita su capacidad para hacer frente al cambio o a los factores de estrés.	Olson <i>et al.</i> , (2014) Adger (2006)
% personas trabajando en el sector primario	La gente depende de la producción de maíz para el autoconsumo y los ingresos. Más gente en el sector significa más zonas rurales.	Bellon <i>et al.</i> , (2018)
Rendimientos	La disminución de rendimientos afecta la seguridad alimentaria de municipios que dependen en gran medida de la producción agrícola.	Myers <i>et al.</i> , (2017)
PIB y PIB per cápita	Un proxy del desarrollo municipal que puede ayudar a los agricultores a hacer frente a las crisis a través de la diversificación de los medios de vida.	Reardon <i>et al.</i> , (2007)

⁷ <http://www.conapo.gob.mx/>

⁸ <https://www.suri.agricultura.gob.mx:8017/buscadorBeneficiario>

⁹ <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

¹⁰ <https://www.gob.mx/siap>

¹¹ <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#>

socioeconómicas) a nivel municipal y en cómo los niveles de riesgo cambiarían bajo las condiciones climáticas futuras y los correspondientes rendimientos de maíz de temporal. Propusimos un índice de riesgo compuesto para resumir la información contenida en los PC rotados, a fin de ayudar a clasificar los municipios de acuerdo a su riesgo implícito en diferentes dimensiones. De esta forma, integramos de manera acoplada y aditiva no solo las condiciones climáticas que afectan la fenología del maíz (por ejemplo, temperaturas más altas), sino también aspectos socioeconómicos contextuales que podrían reforzar los posibles impactos negativos. El índice propuesto se basa en los cuadrantes de uso, para analizar y clasificar las puntuaciones de PCA (Chakraborty *et al.*, 2019; Estrada *et al.*, 2020). Esto se ilustra en un espacio bidimensional y luego se generaliza a un espacio n-dimensional.

Índice multivariado de riesgo para escenarios futuros

Utilizamos el algoritmo de Random Forest (RF) de aprendizaje automático supervisado para predecir los rendimientos actuales de maíz en los municipios, bajo un conjunto de predictores socioeconómicos y climáticos. RF es una técnica basada en la agregación bootstrap, que reduce la varianza en las predicciones. Esta técnica es altamente flexible, lo que le permite incorporar diferentes tipos de variables y exhibe un alto poder predictivo. El algoritmo se alimentó de cinco variables bioclimáticas (temperatura, rangos de temperatura, temperaturas extremas, precipitación) y cuatro variables socioeconómicas (población, GDP, marginación y subsidios agrícolas). Los escenarios para el riesgo futuro fueron dos: i) un escenario de calentamiento RCP 8.5 en el horizonte 2070 y ii) un escenario de calentamiento RCP 8.5 en el horizonte 2070, agregando un aumento del 25 % en los subsidios agrícolas.

Resultados

PCA

Seleccionamos los primeros cinco componentes del PCA, que representan el 84 % de la varianza total del conjunto de datos. Las PC rotadas resultantes (denominadas factores) se pueden separar en dos grupos: el primer grupo son los elementos biofísicos como temperaturas mínima, media y máxima, precipitación y variabilidad de temperatura; el segundo grupo corresponde a la combinación de características socioeconómicas, como el tamaño del municipio en términos de población y PIB, marginación, proporción de personas que trabajan en el sector primario y PIB per cápita. Usando estas relaciones, se construyó un índice de riesgo compuesto. Cada uno de los factores calculados se

convirtió a una variable booleana de acuerdo al signo del valor del factor para cada municipio. Se asignó un valor de 1 para representar un riesgo alto; mientras que cero significa un riesgo bajo (Figura 1).

Índice de riesgo histórico

Para el 2010, 36 % de los municipios de México se ubicaron en las categorías de riesgo muy alto a riesgo alto, lo cual corresponde al 45 % del territorio y 11 % de la población nacional. De los municipios en la categoría de riesgo muy alto, se muestran rendimientos menores a 3 ton/ha (Figura 2). En el caso del riesgo futuro, bajo un escenario del alto calentamiento (RCP 8.5) para el 2070, 16 % y 40.5 % de los municipios de México podrían estar en riesgo muy alto y riesgo alto, respectivamente (Figura 2). Identificamos que, bajo este escenario de calentamiento, 30 % de los municipios en riesgo muy alto se encuentran en los estados de Chihuahua, Durango y Chiapas.

En términos de riesgo relacionado con el clima, para el año 2070, cerca del 79 % de los municipios tendrían incrementos superiores a 3.5 °C, de estos, 28 municipios mostraron disminuciones en la precipitación anual ≥ 50 mm.

A nivel nacional el 89.3 % de los municipios podrían reducir sus rendimientos de maíz de temporal, y 370 de ellos (16.1 %) en más de un 70 % con respecto a su media histórica (Figura 3). Por citar un ejemplo, los municipios de Chiapas en riesgo muy alto tienen un rendimiento medio histórico de 2.4 ton/ha; en 2070, este rendimiento podría disminuir a 1 ton/ha. En el caso del escenario donde se conservó el nivel actual de los subsidios agrícolas, 87 % de los municipios en riesgo muy alto y 24.7 % en riesgo alto, se proyectan con rendimientos < 3 ton/ha. Por otra parte, en el escenario en el cual se agregó un incremento del 25 % en los subsidios agrícolas, pudimos observar que no se producían diferencias en el riesgo futuro, en comparación con el escenario que no contemplaba el incremento en subsidios (Figura 3). Sugerimos que esto se debe a una relación no lineal entre subsidios y las categorías de riesgo. Sin embargo, este escenario muestra una reducción mucho menor del rendimiento medio del maíz de temporal (14 %), lo que sugiere que el riesgo socioecológico general de la producción de este cultivo no disminuiría al aumentar los subsidios agrícolas para mitigar la disminución del rendimiento.

También hicimos un acercamiento a los cambios que la población de campesinos podría experimentar bajo diferentes categorías de riesgo. Identificamos que actualmente 1,259 campesinos se encuentran en riesgo muy alto; mientras que 4,254 están en riesgo alto. Bajo el escenario RCP 8.5 (2070), cerca de 2,085 y 4,323 campesinos podrían esperarse en riesgo muy alto y riesgo alto, respectivamente.

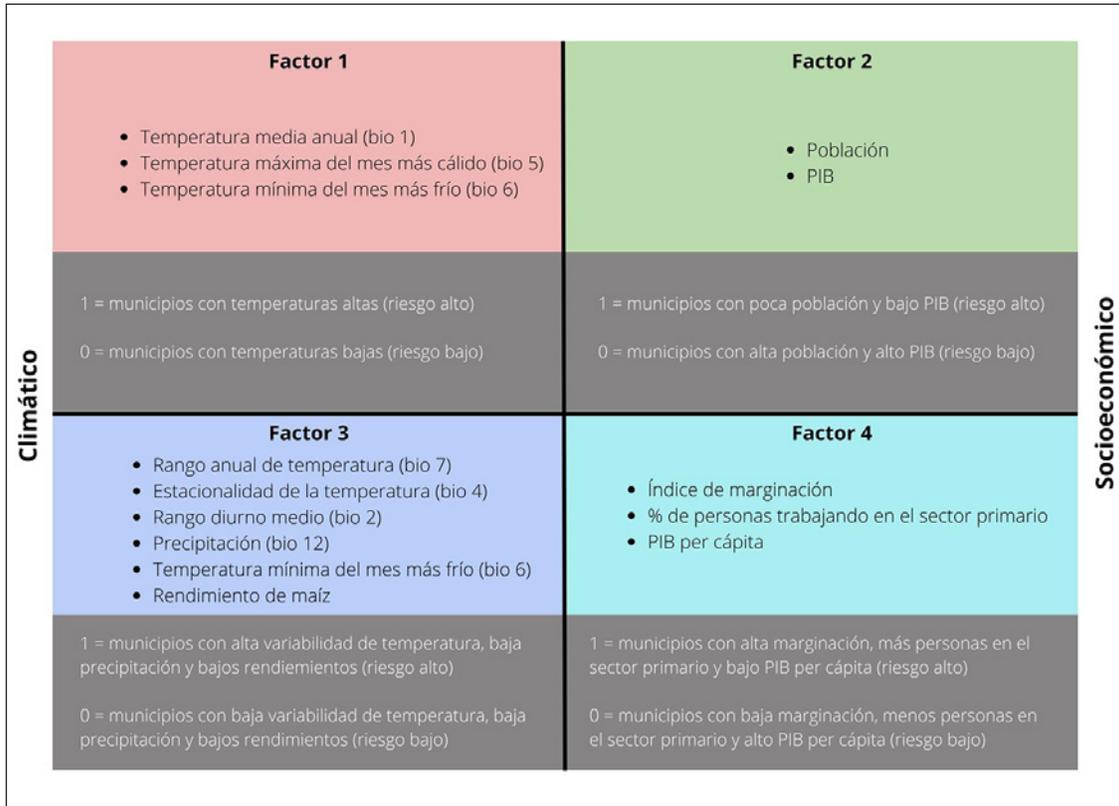


Figura 1. Variables explicativas utilizadas en el PCA y los factores resultantes. Los rectángulos grises explican el valor dado al índice de riesgo.

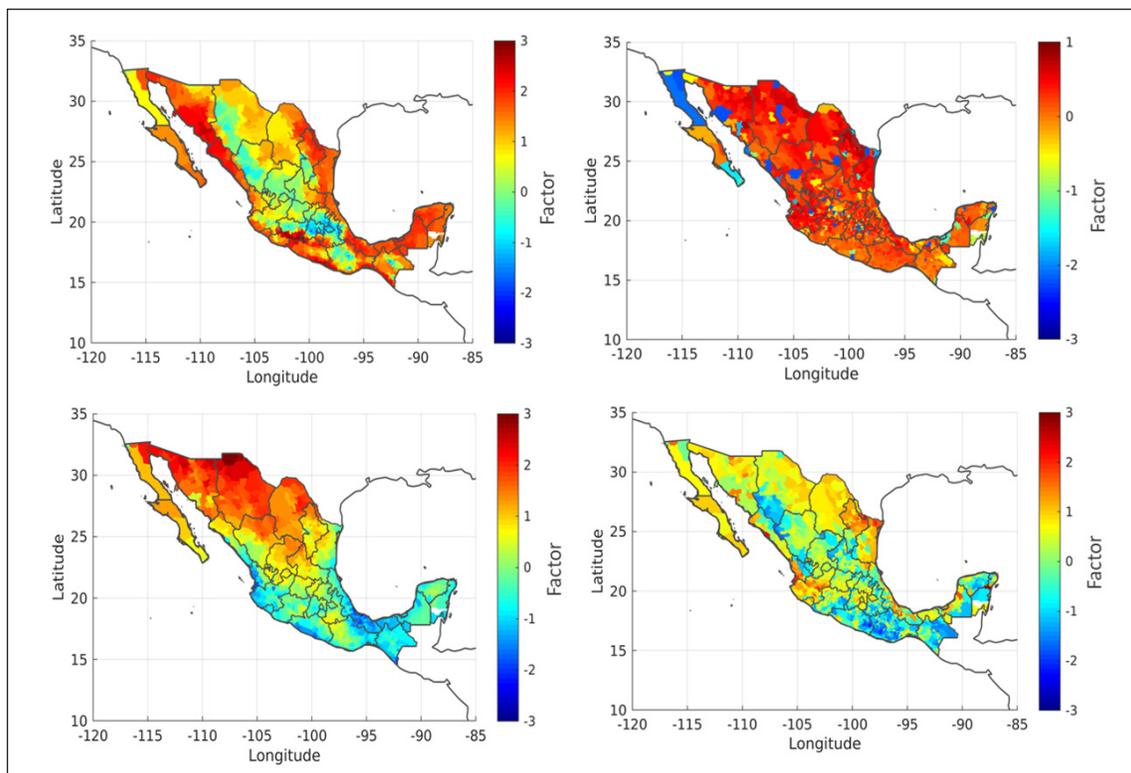


Figura 2. (A) Índice de Riesgo Histórico, (B) Índice de Riesgo Futuro 2070 y el escenario RCP8.5, (C) Índice de Riesgo Futuro 2070 y el escenario RCP8.5+25%.

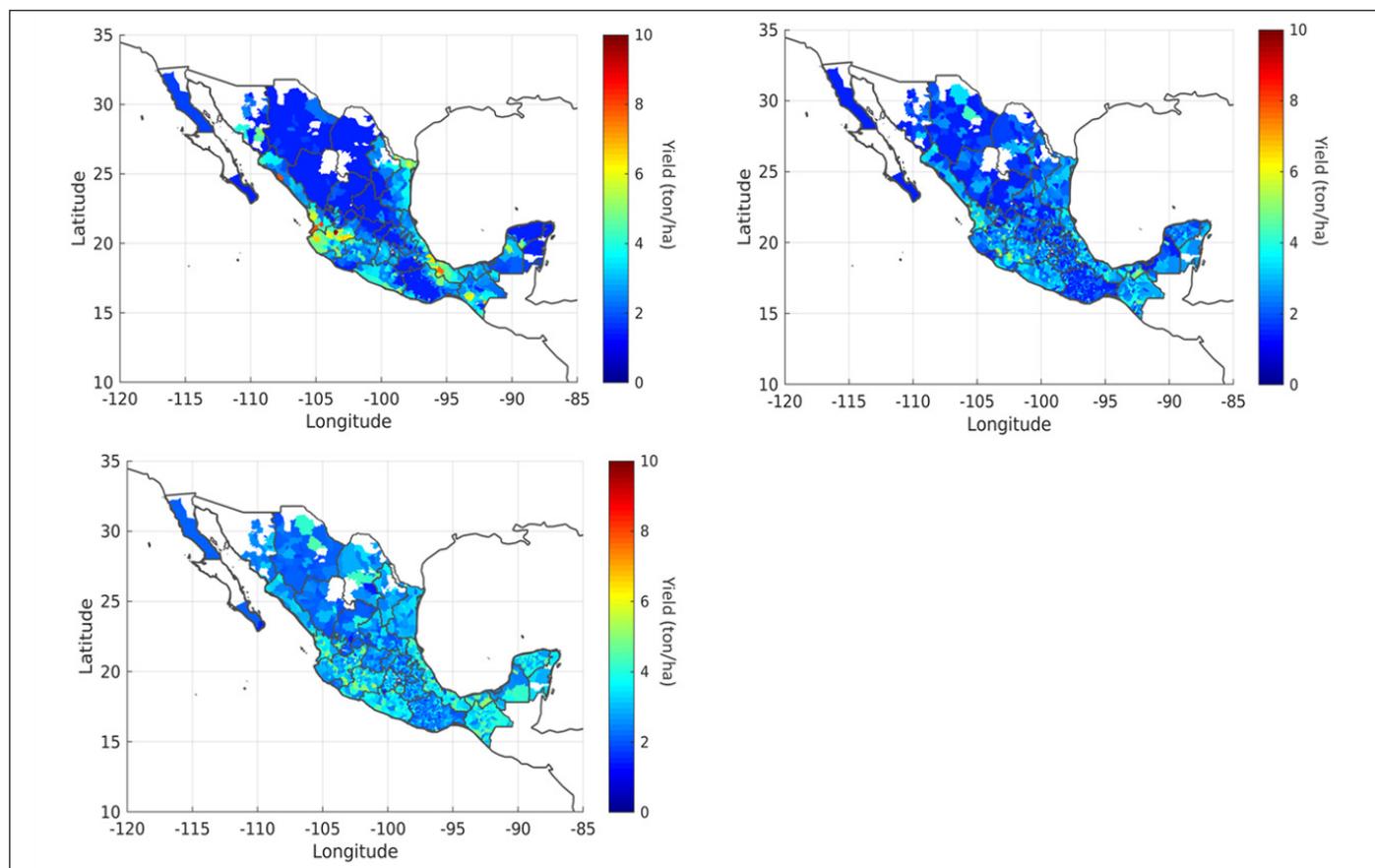


Figura 3. A) Rendimiento medio histórico del maíz de secano (2003-2019), (B) rendimiento futuro del maíz en 2070 y el escenario RCP 8,5, (C) rendimiento futuro del maíz en 2070 y el escenario RCP8,5+25%.

Finalmente, basados en la heterogeneidad del riesgo a nivel municipal, sugerimos algunas estrategias de adaptación que aporten a la disminución del riesgo socioecológico de la producción de maíz de temporal ante el cambio climático (Tabla 2). Por ejemplo, los municipios de la región noroeste del país, seguidos por municipios del suroeste, presentan el mayor riesgo. El riesgo en la región norte está fuertemente impulsado por elementos climáticos, como las altas temperaturas, las bajas precipitaciones y la variabilidad de las altas temperaturas. El riesgo aumenta en algunos municipios del sur del país, de manera más dispersa en el estado de Oaxaca y municipios del centro, norte y sur del estado de Chiapas. Los municipios de Chiapas, en la categoría de muy alto riesgo, tienen un rendimiento medio histórico de 2.4 ton/ha y para el 2070 baja a 1.1 ton/ha. Significa que los productores de maíz enfrentarán mayores riesgos y desafíos impuestos no solo por el cambio climático, sino también por sus históricamente altos grados de marginación en varios municipios de los estados del sur.

Algunas estrategias de adaptación transformadoras incluyen mejorar la gestión del agua, para evitar la sobreexplotación de las capas freáticas mediante la exploración

de algunas alternativas sostenibles. La adaptación en los municipios de la región sur debe centrarse en la creación de capacidad para aumentar la producción de manera sostenible, a fin de aliviar la pobreza y, al mismo tiempo, disminuir los impactos sobre la degradación del suelo y el cambio de uso de la tierra. En la región norte del país, sugerimos que, para reducir el riesgo, los municipios deben diversificar sus cultivos mediante la promoción de razas nativas de maíz y el cultivo de otros productos que puedan ser más tolerantes al calor y al estrés hídrico.

Conclusiones

Nuestros resultados muestran que actualmente más de un tercio de los municipios mexicanos se encuentran en muy alto y alto riesgo para la continuidad de la producción de maíz de temporal como medio de vida de los campesinos y, para el 2070, esto podría aumentar a más de la mitad del país.

El riesgo en el norte de México se debe, principalmente, a factores climáticos como las altas temperaturas, la variabilidad de las altas temperaturas y las bajas precipitaciones.

En escenarios futuros, encontramos que las áreas aptas para el maíz de temporal experimentan los efectos sinérgi-

Tabla 2. Municipios en la categoría de muy alto y alto riesgo, según su regionalización. Se muestran los principales factores de riesgo en las ocho regiones y se vinculan sus respectivas opciones de adaptación. Las dos últimas columnas, en texto naranja y azul, se refieren al tipo de adaptación (incremental y transformadora, respectivamente). Adaptación incremental. Adaptaciones transformadoras (atendiendo las causas raíz de la vulnerabilidad).

Región	Municipios (%) en muy alto y alto riesgo	Principales impulsores de riesgo	Opciones potenciales de adaptación
Noroeste	107 (49.5 %)	Temperaturas altas, precipitaciones bajas y alta variabilidad de la temperatura (+++) Marginación media (++)	<ul style="list-style-type: none"> • Promover el cultivo de variedades nativas de maíz resistentes al calor y la sequía; realizar rotación de cultivos • Promover cultivos tolerantes al estrés climático • Mejorar los sistemas de alerta temprana de sequías • Diversificación de los medios de subsistencia (actividades no agrícolas) • Gestión sostenible del agua (especial atención para evitar a sobreexplotación de los mantos freáticos) • Explorar tecnológicas de desalinización del agua de mar • Subsidios para crear y mejorar las capacidades de los grupos vulnerables (indígenas y pequeños agricultores) a través de la agricultura sostenible • Promover el mercado de cultivos locales y regionales • Inclusión de conocimientos locales/tradicionales en los planes de adaptación
Noreste	47 (34.5 %)		
Centro Norte	65 (31.7 %)	Temperaturas altas, precipitaciones bajas, y alta variabilidad de la temperatura (+++) Marginación alta (+++)	<ul style="list-style-type: none"> • Promover variedades nativas de maíz resistentes a condiciones de sequía • Apertura y fortalecimiento de los mercados de cultivos locales y regionales • Gestión sostenible del agua (e.g., recolección de agua de lluvia) • Subsidios enfocados en soluciones basadas en la naturaleza a través de Adaptación Basada en Ecosistemas (EbA): (e.g., agroforestería, conservación de bosques); y crear y mejorar las capacidades de los grupos vulnerables (indígenas y pequeños agricultores)
Este	123 (33.6 %)		
Centro Sur	13 (7.3 %)	Temperaturas altas (+++) Precipitaciones bajas, media variabilidad de la temperatura (++) Marginación media (++)	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión sostenible del suelo y el agua • Reforzar los mercados de maíz locales y regionales; abriendo oportunidades de agricultores orgánicos en sectores gourmet • Enfocar los subsidios en soluciones basadas en la naturaleza a través de AbE (e.g., conservación forestal, reforestación, agrosilvicultura, ecoturismo)
Oeste	37 (13.6 %)	Temperaturas altas (+++) Precipitaciones bajas, media variabilidad de la temperatura (++) Marginación alta (+++)	<ul style="list-style-type: none"> • Promover variedades nativas de maíz resistentes al calor y la sequía; rotación y diversificación de cultivos • Gestión sostenible del suelo y el agua • Subsidios enfocados en soluciones basadas en la naturaleza a través de AbE (e.g., conservación de bosques, reforestación, agrosilvicultura, ecoturismo) • Subsidios para crear y mejorar las capacidades de grupos vulnerables (pequeños agricultores) a través de la agricultura sostenible
Sureste	101 (27.4 %)	Temperaturas altas (++) Precipitaciones bajas, baja variabilidad de la temperatura (+) Marginación alta (+++)	<ul style="list-style-type: none"> • Promover variedades nativas de maíz resistentes al calor y la sequía; rotación y diversificación de cultivos • Promover cultivos tolerantes al estrés • Gestión sostenible del suelo • Diversificación de los medios de subsistencia (actividades no agrícolas) • Subsidios enfocados en crear y mejorar las capacidades de grupos vulnerables (pequeños agricultores) a través de la agricultura sostenible • Subsidios enfocados en soluciones basadas en la naturaleza a través de AbE (e.g., conservación de bosques, reforestación, agrosilvicultura, ecoturismo)
Suroeste	325 (41.3 %)	Temperaturas altas (++) Precipitaciones bajas, baja variabilidad de la temperatura (+) Marginación alta (+++)	<ul style="list-style-type: none"> • Promover variedades nativas de maíz resistentes al calor y la sequía; rotación y diversificación de cultivos • Tecnologías de riego asequibles • Subsidios enfocados en soluciones basadas en la naturaleza a través de AbE (e.g., conservación forestal, agrosilvicultura y ecoturismo)
		Temperaturas altas (+++) Precipitaciones bajas (+) Marginación alta (+++)	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar las condiciones para la diversificación de los medios de vida (fuera de la explotación agrícola) • Inclusión de conocimientos locales y tradicionales en los planes de adaptación • Subsidios enfocados en crear y mejorar las capacidades de grupos vulnerables (indígenas y pequeños productores) a través de la agricultura sostenible

cos del cambio climático y los desafíos de la pobreza y la marginación.

Incrementar los subsidios agrícolas no es suficiente para reducir el riesgo de cambio climático.

Los impactos del cambio climático en la agricultura requieren planes de adaptación para abordar estrategias transformadoras adaptativas.

Son necesarias las estrategias de adaptación que consideren la complejidad del SSE, como el alivio de la pobreza, las variedades nativas resistentes, la creación de capacidad para mejorar la gestión y el uso del agua, la tecnificación sostenible y la restauración del suelo.

Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., & Sarukhán, J. (2018). Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican campesinos. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285, 20181049. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1049>
- Chakraborty, T., Hsu, A., Many, D., & Sheriff, G. (2019). Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods: a multi-city perspective. *Environmental Research Letters*, 14(10), 105003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3b99>
- Cohn, A., Vanwey, L., Spera, S., & Mustard, J. (2016). Cropping frequency and area response to climate variability can exceed yield response. *Nature Climate Change*, 6, 601–604. <https://doi.org/10.1038/nclimate2934>
- De Salvo, M., Begalli, D., & Signorello, G. (2013). Measuring the effect of climate change on agriculture: A literature review of analytical models. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 5, 499–509. <http://dx.doi.org/10.5897/JDAE2013.0519>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., Brauman, K. A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P. W., van Oudenhoven, A. P. E., van der Plaats, F., Schröter, M., Lavorel, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., ... Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359, 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Donatti, C. I., Harvey, C. A., Martínez-Rodríguez, M. R., Vignola, R., & Rodríguez, C. M. (2019). Vulnerability of smallholder farmers to climate change in Central America and Mexico: current knowledge and research gaps. *Climate and Development*, 11, 264–286. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1442796>
- Eakin, H. (2000). Smallholder Maize Production and Climatic Risk: A Case Study from Mexico. *Climatic Change*, 45, 19–36. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005628631627>
- Eakin, H., Sweeney, S., Lerner, A. M., Appendini, K., Perales, H., Steingerwald, D. G., Dewes, C. F., Davenport, F., & Bausch, J. C. (2018). Agricultural change and resilience: Agricultural policy, climate trends and market integration in the Mexican maize system. *Anthropocene*, 23, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.08.002>
- Estrada, F., Velasco, J. A., Martínez-Arroyo, A., & Calderón-Bustamante, O. (2020). An analysis of current sustainability of Mexican cities and their exposure to climate change. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00025>
- Feng, S., Oppenheimer, M., & Schlenker, W. (2015, marzo). Weather Anomalies, Crop Yields, and Migration in the US Corn Belt [Hoja de trabajo]. *School of Economics, Shanghai University of Finance and Economics*. <http://www.columbia.edu/~ws2162/articles/FengOppenheimerSchlenker.pdf>
- Fuller, A., Min, Q., Jiao, W., & Bai, Y. (2015). Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) of China: the challenge of complexity in research. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1, art6. <https://doi.org/10.1890/EHS14-0007.1>
- Galeana-Pizaña, J. M., Couturier, S., Figueroa, D., & Jiménez, A. D. (2021). Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture?: An approach to the case of Mexico using structural equation modeling. *Agricultural Systems*, 190, 103091. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103091>
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- IPCC (2014). *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, United Kingdom and New York, USA.
- Kotzee, I., & Reyers, B. (2016). Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach. *Ecological Indicators*, 60, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.018>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., & Taylor, W. W. (2007). Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317, 1513–1516. <https://doi.org/10.1126/science.1144004>
- Maass, M. (2017). Integrating Food-Water-Energy Research through a Socio-Ecosystem Approach. *Frontiers in Environmental Science*, 5, article 48. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00048>
- Monterroso, R., Conde, A., Rosales, D., Gómez, D., & Gay, G. (2011). Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24, 53–67.
- Murray-Tortarolo, G., J. Jaramillo, V., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011>

- Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., Dangour, A. D., & Huybers, P. (2017). Climate change and global food systems: potential impacts on food security and under-nutrition. *Annual Review of Public Health*, 38, 259–277. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>
- NeSmith, D. S., & Ritchie, J. T. (1992). Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain-filling. *Field Crops Research*, 29(1), 23–35. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90073-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90073-I)
- Olsson, L., Opondo, M., Tschakert, P., Agrawal, A., Eriksen, S., Ma, S., Perch, L., & Zekieldeen, S. (2014). Livelihoods and poverty. In C. B. Field, V. R. Barros., D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White. (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. 793–832). Cambridge University Press.
- Porter, J., Xie, L., Challinor, A., Cochrane, K., Howden, S., Iqbal, M., Lobell, D. B., & Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In C. B. Field, V. R. Barros., D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White. (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. 485–533). Cambridge University Press.
- Ray, D., West, P., Clark, M., Gerber, J., Prishchepov, A., & Chatterjee S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PLoS ONE*, 14(5): e0217148. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>
- Reardon, T., Stamoulis, K., & Pingali, P. (2007). Rural nonfarm employment in developing countries in an era of globalization. *Agricultural Economics*, 37(s1), 173–183. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00243.x>
- Rivera-Ferre, M., Ortega, M., & Baumgärtner, J. (2013). Rethinking Study and Management of Agricultural Systems for Policy Design. *Sustainability*, 5(9), 3858–3875. <https://doi.org/10.3390/su5093858>
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Stevens, T., & Madani, K. (2016). Future climate impacts on maize farming and food security in Malawi. *Scientific Reports*, 6, 36241. <https://doi.org/10.1038/srep36241>
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A., & Álvarez-Buylla, E. R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>

Priorizando la conservación de la biodiversidad ante escenarios de cambio global¹

Alma V. Mendoza-Ponce², Rogelio O. Corona-Núñez³, Florian Kraxner⁴, Francisco Estrada⁵

Resumen

Los impactos del cambio de uso y cobertura del suelo y el cambio climático están distribuidos de manera desigual, lo que dificulta la ejecución de prácticas de conservación. En consecuencia, una adecuada priorización de la conservación es crucial para minimizar los impactos negativos de amenazas sobre la biodiversidad. Los esfuerzos globales y nacionales para priorizar la conservación muestran que >45 % de México debe ser protegido. Este estudio desarrolla tres escenarios para identificar áreas prioritarias, que integran la exposición a los cambios de uso y cobertura del suelo y al cambio climático, la capacidad adaptativa y la distribución de especies endémicas en riesgo de extinción. Nuestros resultados muestran que, para el 2050, entre 11.6, 13.9 y 16.1 % de México alcanzaría un valor medio de vulnerabilidad, bajo los escenarios optimista, tendencial y pesimista, respectivamente. Para el 2070, estas cifras ascenderían al 11.9, 14.8 y 18.4 %. Siete municipios (0.39 % del país) representan el 30 % de las áreas más vulnerables.

Palabras clave: Biología de la conservación; priorización espacial; cambios de uso y cobertura del suelo; cambio climático.

Abstract

Impacts of land-use/cover-change and climate change are unevenly distributed, which hinders the execution of conservation practices. Consequently, an adequate spatial conservation prioritization is crucial to minimize the negative impacts of threats on biodiversity. Global and national efforts to prioritize conservation show that >45 % of Mexico should be protected. This study develops three scenarios that integrate exposure to land-use/cover-change and climate change, adaptive capacity, and the distribution of endemic species on risk of extinction. Our results show that by 2050 between 11.6, 13.9 and 16.1% of Mexico would reach medium score of vulnerability, under the optimistic, BAU, and the worst-case scenarios, respectively. By 2070, these figures would rise to 11.9, 14.8 and 18.4 %. Moreover, seven municipalities (0.39 % of the country) represent 30 % of the most vulnerable areas.

Key words: Conservation biology, spatial prioritization, land use cover changes, climate change.

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Mendoza-Ponce, A. V., Corona-Núñez, R. O., Kraxner, F., & Estrada, F. (2020). Spatial prioritization for biodiversity conservation in a megadiverse country. *Anthropocene*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100267> Esta contribución está basada en el artículo presentado por Alma Mendoza y que fue premiado dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Schloßpl. 1, 2361, Laxenburg, Austria. Correo: amendezap@pincc.unam.mx

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Procesos y Sistemas de Información en Geomática, SA de CV, Tlalnepantla, Edo. de México, México. Correo: r.o.corona_nunez@ciencias.unam.mx

⁴ International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Schloßpl. 1, 2361, Laxenburg, Austria. Correo: kraxner@iiasa.ac.at

⁵ Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Instituto de Ciencias Atmosféricas y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México Correo: feporrúa@atmosfera.unam.mx

Introducción

La pérdida de la biodiversidad es el resultado de varios impulsores y sus interacciones, incluyendo cambio de uso y cobertura del suelo (CUCS), cambio climático (CC), invasión de especies y enfermedades (Brooks *et al.* 2006). En los trópicos, los CUCS son la principal fuerza de cambio que se exacerbará por el CC (Paniw *et al.* 2019). México es uno de los países más ricos en diversidad biológica a nivel mundial, y ha reducido a la mitad su vegetación natural en el último siglo (Velázquez *et al.* 2002), debido, principalmente, a la expansión agrícola y ganadera (Bonilla-Moheno 2012; Mendoza-Ponce *et al.* 2018). Las amenazas no actúan de forma homogénea en el espacio y en el tiempo, ni la biodiversidad se distribuye uniformemente, por ello, deben desarrollarse herramientas epistemológicas que permitan aumentar la eficiencia y la probabilidad de éxito de las estrategias y recursos de la conservación de la biodiversidad.

La priorización espacial de la conservación biológica refiere al uso de técnicas cuantitativas para generar información espacialmente explícita que permita identificar áreas para conservar o restaurar la biodiversidad (Ferrier, & Wintle 2009). En este estudio implementamos estas herramientas para identificar los ecosistemas y los municipios más importantes para la conservación de especies de vertebrados ante dos de las principales amenazas (CUCS y el CC). Nos basamos en dos criterios utilizados para la ciencia de la conservación, a saber: la irremplazabilidad y la vulnerabilidad (Margules, & Pressey, 2000; Pressey, Johnson, & Wilson, 1994).

Nosotros evaluamos la irremplazabilidad basada en la endemidad de las especies de vertebrados, y la vulnerabilidad a los CUCS y al CC. La vulnerabilidad de un sitio está dada por una función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Adger, 2006). 1) La exposición es entendida como el grado o duración en que un sistema, o una parte de él, está en contacto con una amenaza (Adger, 2006). 2) La sensibilidad se entiende como la susceptibilidad de un elemento a ser dañado (IPCC, 2014); desde una perspectiva de biodiversidad, utilizamos la endemidad de las especies y su nivel de riesgo de acuerdo con la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés). 3) La capacidad adaptativa está relacionada con la posibilidad de adaptarse tanto a condiciones actuales como futuras (IPCC, 2014).

Métodos

Los modelos de CUCS se desarrollaron utilizando el software Dinamica EGO (versión 3.0.17.0). Los modelos incluyeron cálculos de matrices de transición, colinealidad de las variables, la estimación de los pesos de evidencia de variables

explicativas, proyección de corto plazo para validación del modelo y proyecciones a largo plazo, siguiendo el enfoque de Soares-Filho *et al.* (2009).

Los mapas de clasificación de uso y cobertura del suelo provienen del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1985, 1993, 2001, 2005, 2007, 2011 y 2015). Todos los mapas fueron reclasificados en catorce clases: bosque templado, bosque mesófilo, vegetación hidrofílica, matorral, selvas perennifolias, selvas caducifolias, pastizal natural, otros tipos de vegetación, agricultura de riego, agricultura de temporal, pastizales para ganadería, asentamientos humanos, sin vegetación y cuerpos de agua (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). Además, utilizamos un conjunto de 24 variables explicativas (13 socioeconómicas y 11 biofísicas (Mendoza-Ponce *et al.*, 2020)) para representar los principales impulsores de cambio.

Generamos tres escenarios que se basaron en combinaciones de las proyecciones socioeconómicas, los escenarios climáticos y las tasas de cambio de las coberturas y usos de suelo históricas (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018 y 2020). 1) Escenario Tendencial que incluye la combinación de los SSP2, RCP4.5 y las tasas medias de deforestación y regeneración históricas; 2) Escenario Optimista que integra la combinación de los SSP1, RCP2.6 y las tasas más altas de regeneración y mapas bajas de deforestación históricas; y 3) un Escenario Pesimista que combina los SSP3 y RCP 8.5, las tasas más altas de deforestación y más bajas de regeneración históricas. Los modelos de cambio climático estuvieron basados en cuatro modelos de circulación general (GCMs, por sus siglas en inglés) (CNRMCM5; GFDL-CM3; HadGEM2-E5; MPI-ESM-LR), y dos horizontes de tiempo: 2050s (promedio para 2041–2060) y 2070 (promedio de 2061–2080) (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018).

Exposición

La exposición a los CUCS se estimó considerando la propensión de un área de cambiar de una cobertura natural a una cobertura antrópica. Para ello, se evaluaron los cambios de los periodos 2011-2050 y 2011-2070. Los resultados mostraron la permanencia de las cubiertas naturales o antropogénicas, la pérdida de la vegetación natural y la regeneración. Un valor de 100 refiere a áreas susceptibles a ser convertidas en cubiertas antropogénicas, un valor de 50 se relacionó con las áreas de regeneración, ya que estas tienen más probabilidad de ser deforestadas nuevamente (Rudel *et al.* 2005). Finalmente, se dio un valor de cero a las áreas donde no hubo cambios (Mendoza-Ponce *et al.* 2020). La exposición al CC se estimó como la diferencia entre los valores históricos y los futuros para la temperatura media anual (BIO1), y la precipitación anual (BIO12). Los valores

resultantes se normalizaron entre 0 y 100. El 100 refiere a las mayores diferencias entre los valores históricos y los futuros y el cero muestra que no hubo cambios. La integración de la exposición a los CUCS y el CC se estimó por igual, ponderando ambas exposiciones (Mendoza-Ponce *et al.* 2020).

Sensibilidad y capacidad adaptativa

Utilizamos los datos espaciales de biodiversidad de la IUCN para los vertebrados terrestres (mamíferos, reptiles, anfibios) (IUCN, 2017) y aves (BirdLife-Internacional, 2017). La información fue rasterizada a una resolución espacial de 1 km², y a partir de esto calculamos el número de especies totales, endémicas y las especies en peligro crítico o en peligro de extinción. Para cada grupo, normalizamos los datos entre 0 y 100, donde 100 refiere a las áreas con mayor número de especies endémicas que están en peligro crítico o en peligro de extinción.

La capacidad adaptativa se estimó utilizando el Índice de Riesgo de Conservación propuesto por Hoekstra *et al.* (2005). Seleccionamos este índice porque expresa la capacidad de una región para enfrentar los retos de los impactos que supone la actividad antrópica. Este índice es la relación entre el porcentaje de tierra convertida (natural a antropogénica), y el porcentaje de áreas protegidas de una región. La capacidad adaptativa se estimó a nivel municipal para los datos históricos y los futuros de los tres escenarios. Los datos finales se normalizaron entre 0 y 100. El valor más alto refiere a los municipios con ausencia de áreas protegidas y mayor conversión de vegetación natural a antrópica. Valores cercanos a cero denotan municipios en cuya pérdida de cobertura natural es igual o menor que la extensión total de las áreas protegidas.

Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad se calculó como una media de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. Los valores cercanos a 100 son sitios propensos a perder su cobertura natural con los mayores cambios en las variables climáticas (temperatura y precipitación), ausencia en áreas protegidas y con la presencia de vertebrados endémicos y en peligro de extinción. En contraste, las cifras cercanas a cero refieren a sitios que enfrentarán un bajo riesgo de pérdida de cobertura natural, con pequeños cambios en el clima y sin endemismos de vertebrados en peligro de extinción.

Resultados

Exposición a los CUCS

La cobertura nativa representaba el 72.2% de la parte terrestre de México en 2011; sin embargo, de acuerdo al Escenario Tendencial para el 2050 y el 2070, las coberturas naturales

cubrirían el 62.9% y el 60.5% del país, respectivamente (Mendoza-Ponce *et al.* 2020). En el Escenario Pesimista solo el 14.1 y el 12.2% de México quedaría con cobertura natural para esas mismas fechas. Por el contrario, el Escenario Optimista muestra una leve recuperación para el 2050 y el 2070, sugiriendo que es posible aumentar el área de vegetación nativa y alcanzar el 78.8 y el 79.2% del territorio nacional para esos horizontes temporales. Las áreas con la mayor exposición a los CUCS, de acuerdo con el Escenario Tendencial se encuentra en la costa del Pacífico y la península de Yucatán, donde hay selvas caducifolias. En el Escenario Pesimista hay expansiones agrícolas y ganaderas en la Sierra Madre Occidental y en la Sierra Madre del Sur (Figura 1), representadas principalmente por bosques templados y mesófilos.

Exposición al CC

Los GCMs muestran un incremento en temperatura en la mayor parte del país. Según el Escenario Optimista para el 2050, el 73% de México mostrará incrementos en temperatura entre 1.7 y 2.3°C. Además, el 75% del país experimenta incrementos entre 2.0 y 2.6°C para el 2050, y entre 2.4 y 3.2°C para el 2070, bajo el Escenario Tendencial. Para el Escenario Pesimista se proyectan aumentos entre 3.0 y 3.8°C para el 2050 en el 73% del país, y para el 2070 podría haber un incremento entre 3.6 y 4.6°C en el 76% de México. Los mayores incrementos se proyectan en pequeñas áreas en las cadenas montañosas que están dominadas por bosques templados, y en diferentes regiones, como en el noroeste y noreste del país que están dominados por matorrales y desiertos. En el Escenario Pesimista, la zona más afectada se encuentra en el norte donde están los estados de Sonora y Chihuahua en la Sierra Madre Occidental y en el Altiplano norte.

La precipitación muestra una gran variabilidad entre los GCMs. Se espera que México muestre un aumento de la precipitación >5% en el 28, 27 y 17% del país, según los escenarios Optimista, Tendencial y Pesimista, respectivamente. Estos cambios se dan en la cadena montañosa del sur (Istmo de Tehuantepec) y en la parte baja de la Sierra Madre Oriental. Por el contrario, para el 2050 y el 2070, el 9 y el 10% del país mostrarían una disminución en precipitación >3% en el Escenario Tendencial, particularmente en la zona central de la Sierra Madre Oriental y las llanuras costeras del golfo de México. Además, para el 2070, se espera una reducción de la precipitación, >5%, en 12 y 13% de México, y un incremento >3% en 16% y 20% del país, según los escenarios Optimista y Tendencial, respectivamente (Figura 1). En el Escenario Pesimista hay disminuciones <5% en el 37 y el 68% del país para el 2050 y para el 2070.

Sensibilidad

De acuerdo con la IUCN (2017), México cuenta con 256 especies de vertebrados terrestres endémicas y en peligro crítico o de extinción (56 mamíferos, 154 anfibios, 12 aves y 34 reptiles). De estos, los anfibios son los más amenazados, con un 62%. En relación con las especies endémicas de mamíferos, aves y reptiles encontramos que 39, 12 y 9% están en peligro o en peligro crítico. Los ecosistemas dominantes en los que habitan los vertebrados endémicos son los bosques templados, seguidos por los matorrales, las selvas caducifolias y los pastizales naturales. La distribución de los anfibios en esas categorías de riesgo representa 3,3% del país; mientras que los mamíferos, aves y reptiles representan el 9,9, el 16.2 y el 28.7% del país, respectivamente. Las especies de mamíferos endémicas y amenazadas se extienden por la península de Baja California, parte de la costa del Pacífico sur y el golfo de México en la parte sur del estado de Vera-

crúz. Los reptiles endémicos y en peligro de extinción están principalmente restringidos a los ecosistemas áridos como matorrales y pastizales naturales en el norte y centro oriente de México. Las zonas más importantes para la riqueza de aves están en el sur de México, la llanura costera del golfo de México y la Sierra Madre del Sur. Las zonas más ricas para los reptiles están en la selva tropical perennifolia de la costa del golfo de México y los matorrales del norte de México (Cañón de Santa Elena); sin embargo, las áreas más ricas dominadas por especies endémicas y amenazadas se encontraron en la Sierra Madre Oriental. Finalmente, aunque la mayor riqueza de anfibios está en la selva perennifolia, son los bosques templados de la Franja Central Volcánica (es decir, Pico de Orizaba y Cofre de Perote) y los bosques mesófilos del estado de Guerrero los sitios más importantes para especies endémicas de anfibios en peligro.

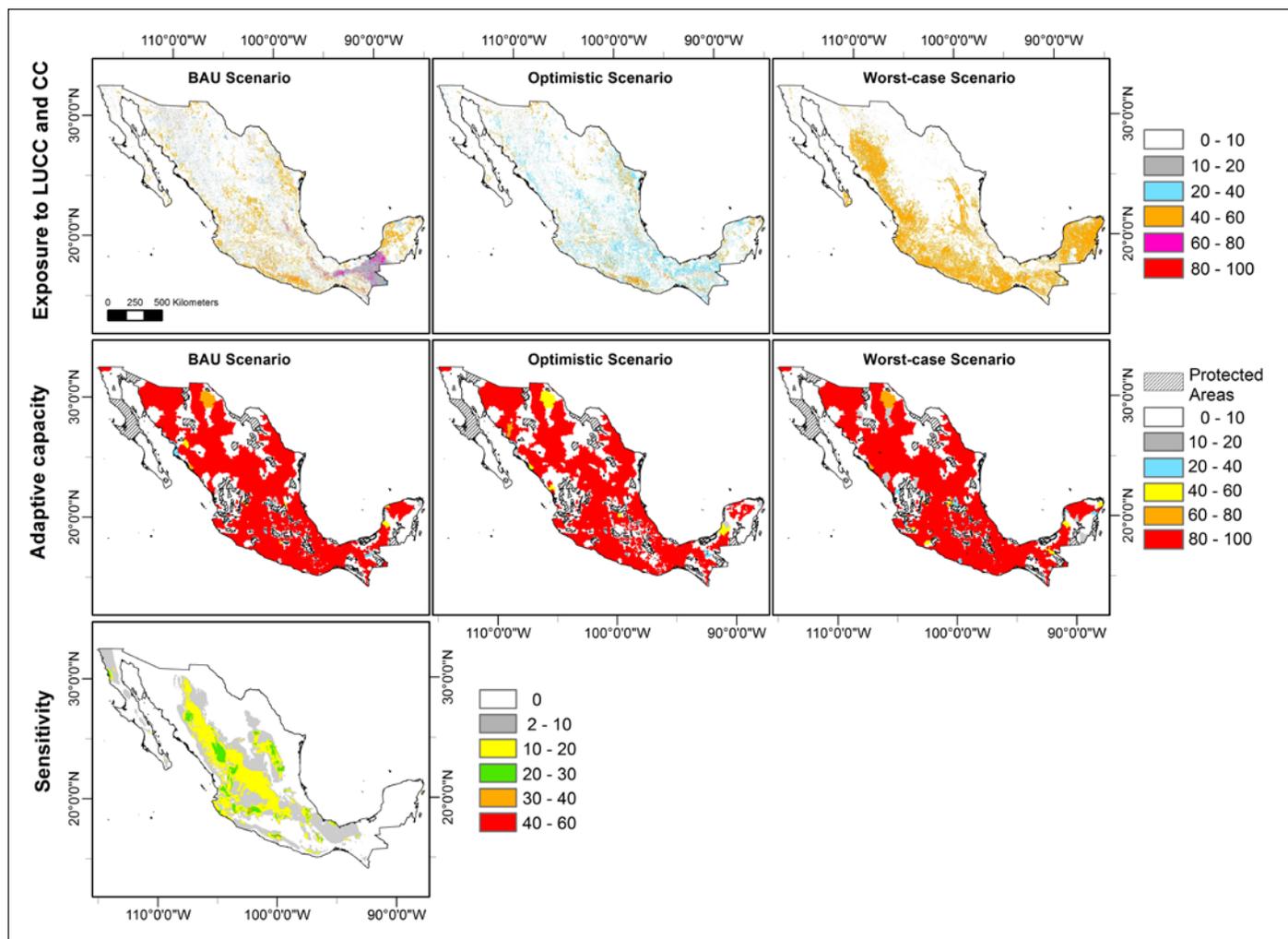


Figura 1. Exposición, capacidad adaptativa y sensibilidad en el 2050 para los escenarios Tendencial (BAU), Optimista y Pesimista (Worst-case). LUCC (Land Use Cover/Change) refiere a los cambios de uso y cobertura del suelo (CUCS) y CC al cambio climático (Mendoza-Ponce *et al.* 2020).

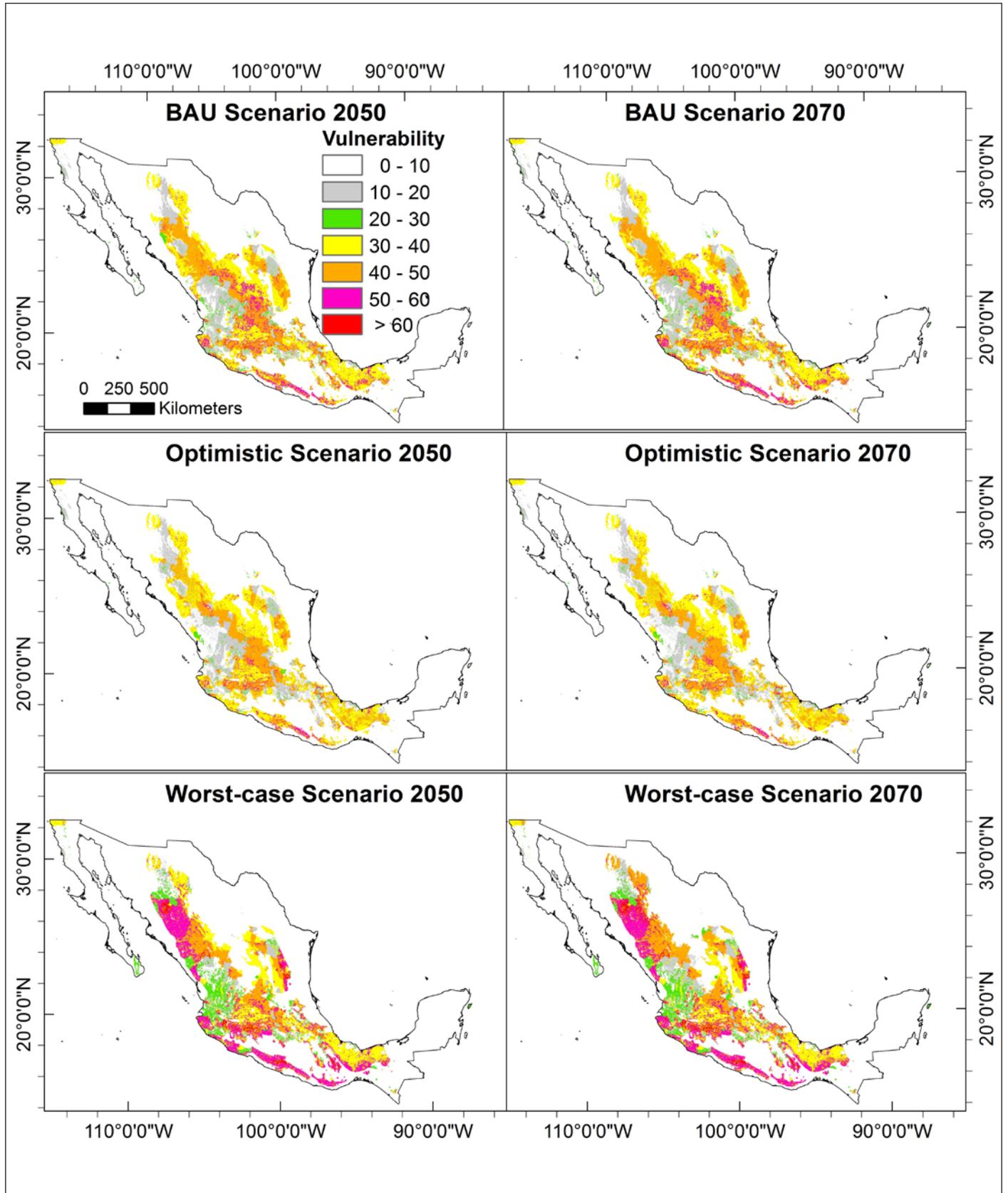


Figura 2. Mapas de vulnerabilidad para el 2050 y el 2070 para los escenarios Tendencial (BAU), Optimista y Pesimista (Worst-case) (Mendoza-Ponce *et al.* 2020)

Capacidad adaptativa

Las áreas con menor capacidad adaptativa (alto índice de riesgo de conservación) se localizan en la Franja Central Volcánica, el Altiplano central, la costa del Pacífico sur, el área noroeste en el desierto de Sonora, y la Sierra Madre Oriental. Estas áreas coinciden con las ciudades más importantes del país y las zonas más pobladas. Además, 56, 70 y 72 % de los municipios mexicanos, de acuerdo a los escenarios Optimista, Tendencial y Pesimista, muestran baja capacidad adaptativa. En relación con los ecosistemas fueron los matorrales, las selvas caducifolias las que deben reforzar sus estrategias de conservación para evitar los CUCS.

Vulnerabilidad

Los valores de vulnerabilidad oscilaron entre 0 y 80; el 42.6 % del país muestra una vulnerabilidad moderada con valores superiores a 50. Para el 2050, 8.2, 10.4 % y 16.1 % de México registran un valor de vulnerabilidad de 50 para los escenarios Optimista, Tendencial y Pesimista, respectivamente. Para el 2070, las cifras aumentan a 8.4, 10.9 o 18.1 % para cada escenario. En el Escenario Pesimista la máxima vulnerabilidad alcanzada fue de 80, y existen cuatro municipios con este valor, 452 tienen un índice de 70. De esos municipios, siete representan el 30.4 % de las zonas más vulnerables y el 0.39 % del país. Estos municipios se encuentran principalmente en el estado de Guerrero (Figura 2).

Conclusiones

Este estudio demuestra que el modelado es fundamental para la conservación de la biodiversidad, ante las principales amenazas como son el cambio de uso y cobertura del suelo y el cambio climático. Los modelos espacialmente explícitos permiten la identificación de áreas con mayor exposición y presión, en donde existen especies endémicas y con algún grado de peligro. La metodología aquí presentada permite que sea replicable en otras regiones, lo cual es esencial para la toma de decisiones y gestión del manejo ecosistémico. Además, este estudio muestra que el marco de vulnerabilidad e irremplazabilidad es útil para identificar áreas para la conservación de la biodiversidad. Nuestro estudio permite priorizar el 19.0 % del territorio nacional y destacar que siete municipios de los más de 2 mil que tiene el país, representan el 30.4 % de las más áreas más vulnerables. Esta información puede ayudar a 1) priorizar las acciones de monitoreo de poblaciones de especies amenazadas. Para ello, deberán acompañarse con medidas como definición y establecimiento de nuevas áreas protegidas en regiones que tienen poblaciones en peligro con distribución de rango pequeño. 2) La creación de corredores biológicos para permitir el flujo y establecer conectividad entre las poblaciones; y 3)

diseñar estudios y políticas tendientes a comprender y mitigar los impactos locales de los CUCS y el CC.

Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- BirdLife-International, 2017. In: Organization, B. (Ed.), Country Profile: Mexico. Accessed 10th March 2019 <http://datazone.birdlife.org/country/mexico>
- Bonilla-Moheno, M., Aide, T. Mitchell, Clark, & Matthew L. (2012). The influence of socioeconomic, environmental, and demographic factors on municipality-scale land-cover change in Mexico. *Regional Environmental Change*, 12, 543-557.
- Brooks, T., R. Mittermeier, G. da Fonseca, J. Gerlach, M. Hoffmann, J. Lamoreux, C. Mittermeier, J. Pilgrim, & A. Rodrigues (2006). Global Biodiversity Conservation Priorities. *Science*, 313(5783), 58-61. <https://doi.org/10.1126/science.1127609>
- Ferrier, S., & B. Wintle. (2009). Quantitative approaches to spatial conservation prioritization: matching the solution to the need. In A. Moilanen, Wilson, K. A., Possingham, H. P., (Eds.), *Spatial Conservation Prioritization: Quantitative Methods and Computational Tools*, 1-15. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Hoekstra, J., T. Boucher, T. Ricketts, & C. Roberts (2005). Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters*, 8(1), 23-29. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00686.x>
- INEGI (1985). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie I. Aguascalientes: Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (1993). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Serie II. Aguascalientes: Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2001). Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación, 1:250,000, (serie II). Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2005). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del suelo y Vegetación, escala 1:250,000 (serie III) Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2007). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie IV. Aguascalientes, Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2011). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie V. Aguascalientes, Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- INEGI (2015). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie VI. Aguascalientes, Instituto Nacional de Geografía y Estadística.F
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. Synthesis Report. 132. IPCC.
- IUCN (2017). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017-3.

- Margules, C., & R. Pressey (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405, 243–253.
- Mendoza-Ponce, A., R. Corona-Núñez, F. Kraxner, S. Leduc, & P. Patrizio (2018). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, 53, 12-23.
- Mendoza-Ponce, A. V., R. O. Corona-Núñez, F. Kraxner, & F. Estrada (2020). Spatial conservation prioritization for biodiversity in a megadiverse country. *Anthropocene*, 32, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100267>
- Paniw, M., T. James, C. Archer, G. Römer, S. Levin, A. Compagnoni, J. Che-Castaldo, J. Bennett, A. Mooney, D. Childs, A. Ozgul, O. Jones, J. Burns, A. Beckerman, A. Patwary, N. Sanchez-Gassen, T. Knight, & R. Salguero-Gómez (2019). Global analysis reveals complex demographic responses of mammals to climate change. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2019.12.16.878348>
- Pressey, R., I. Johnson, & P. Wilson (1994). Shades of irreplaceability: towards a measure of the contribution of sites to a reservation goal. *Biodiversity and Conservation*, 3, 242-262. <https://doi.org/10.1007/BF00055941>
- Rudel, T. K., O. T. Coomes, E. Moran, F. Achard, A. Angelsen, J. Xu, & E. Lambin (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.001>
- Soares-Filho, B., H. Rodrigues, & Souza William (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Velázquez, A., J. Mas, J. Díaz-Gallegos, A. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y J. Palacio (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21-37.

El cambio climático favorece la proliferación del gusano cogollero del maíz¹

Edison Armando Díaz-Álvarez², Juan Pablo Martínez-Zavaleta³, Elba Esther López-Santiz⁴, Erick de la Barrera⁵, John Larsen⁶, Ek del Val de Gortari⁷

Resumen

El maíz es el cultivo más importante del mundo; en México forma parte fundamental de nuestra cultura, tradición e historia. Por otra parte, el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith) es una de las plagas más dañinas del maíz, puesto que reduce su producción. La amenaza que representa el gusano cogollero podría verse exacerbada por el cambio climático, dado que se estima que el incremento en las temperaturas favorece a esta plaga. En esta investigación de laboratorio estudiamos la relación entre el desempeño de *S. frugiperda* bajo un gradiente de temperatura, alimentándose de dos variedades nativas de maíz, y la respuesta de las plantas ante la herbivoría. Encontramos que el desarrollo de las larvas fue más rápido y su ciclo de vida tuvo una menor duración bajo temperaturas elevadas. El efecto de la herbivoría, sin embargo, difirió entre razas de maíz, siendo particularmente dañina para el maíz blanco ranchero, en comparación con el amarillo, ambos provenientes de la Meseta Purhépecha, en Michoacán. Debido a que se estiman condiciones más secas y calientes para la región de estudio, sembrar variedades de maíz que puedan lidiar mejor con la herbivoría bajo cambio climático, podría ayudar a mitigar las pérdidas económicas para los campesinos.

Palabras clave: Producción agrícola; daño por herbívoros; larvas; ciclo de vida; FAW

Abstract

Maize has become the most important crop in the world. In Mexico, the place of its original domestication, it has a major cultural, tradition, and historical importance. In turn, the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)) is one of the most damaging pests that reduces maize production. Climate change also poses a significant threat to maize production since fall armyworm populations are likely to be favored by increasing temperatures. We thus investigated in the laboratory the relationship between *S. frugiperda* performance, while feeding on different landraces of maize under a temperature gradient, and plant responses to herbivory. A faster larval developmental time and a shorter life-cycle were observed under elevated air temperature. Herbivory, in turn, was more damaging for the White Ranchero maize than for the Yellow maize, both landraces from the Purhépecha Plateau, Michoacán. Considering that the climate at the study region is projected to become warmer and drier, sowing maize varieties that can better deal with herbivory under climate change may help to mitigate economic losses for farmers.

Key words: Agricultural production; herbivore damage; larvae; life cycle; FAW

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Díaz-Álvarez, E. A., Martínez-Zavaleta, J. P., López-Santiz, E. E., de la Barrera, E., Larsen, J., & del-Val, E. (2021). Climate change can trigger fall armyworm outbreaks: a developmental response experiment with two Mexican maize landraces. *International Journal of Pest Management*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/09670874.2020.1869347>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Ek del Val y que fue premiado dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Investigaciones Forestales, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. Correo: ealvarez@cieco.unam.mx

³ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

⁵ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México. Correo: delabarrera@unam.mx

⁶ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México. Correo: jlarsen@cieco.unam.mx

⁷ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México. Correo: ekdelval@iies.unam.mx

Introducción

El cambio climático es una de las causas más relevantes de la pérdida de biodiversidad en el mundo, debido a los cambios en los patrones de temperatura y precipitación que inciden sobre las áreas idóneas para la distribución de las especies (Magaña *et al.*, 2000; Sala *et al.*, 2000; Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Los efectos negativos del cambio climático son particularmente preocupantes en el contexto de las especies cultivadas como el maíz, puesto que son la base de sustento de, al menos, 4.5 mil millones de personas (Shiferaw *et al.*, 2011). En México el maíz es particularmente importante, ya que constituye uno de los pilares de la cultura, la alimentación y la historia (Louette, & Berthaud, 1997; Turrent Fernández *et al.*, 2013). Se proyecta que el cambio climático reducirá significativamente los rendimientos de maíz alrededor del mundo. En particular, cuando la temperatura supera 30 °C el rendimiento disminuye en 1 % por grado, bajo condiciones de riego óptimas, y en 1.7 %, bajo condiciones de sequía (Shiferaw *et al.*, 2011). Dado que una gran proporción del maíz cultivado en México es de temporal, y que se prevé una disminución en la precipitación para gran parte del país, el cambio climático es una amenaza particularmente relevante para este cultivo (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Bellon *et al.*, 2011; Guerrero-Jiménez, & de la Barrera, 2015; SIAP, 2015).

Por otro lado, diversas plagas que atacan al cultivo de maíz y causan reducciones importantes en la producción, son motivo de la mayor preocupación. Una de ellas es el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* [J. E. Smith]; FAW) que, aunque es nativo del continente americano, ha sido introducido en casi todo el mundo, mostrando incrementos significativos en épocas recientes de su distribución y en sus poblacionales (Early *et al.*, 2018; Kebede, & Shimalis, 2019; Padhee, & Prassana, 2019). El gusano cogollero se alimenta vorazmente del maíz y sus daños pueden causar pérdidas de hasta 75 % de la producción en momentos críticos (Capinera, 1999; Fernández, 2002).

El cambio climático puede afectar las interacciones entre las plantas y los insectos que se alimentan de ellas. Por ejemplo, cuando ocurren sequías recurrentes, el estrés en las plantas se incrementa y son más susceptibles a la infestación por plagas (Ouyang *et al.*, 2014; Boggs, 2016). Por otra parte, el aumento en la temperatura puede contribuir a la expansión de la distribución de las plagas y un aumento en pérdidas agrícolas (Forrest, 2016; Early *et al.*, 2018; Deutsch *et al.*, 2018). Adicionalmente, puede resultar en periodos de crecimientos prolongados, que repercutan en un mayor número de generaciones de insectos por año (Bale *et al.*, 2002; Dell *et al.*, 2005; Altermatt, 2010; Forrest, 2016). En el caso particular del gusano cogollero, la temperatura afecta su desempeño dependiendo de la planta de la que se alimenta;

por ejemplo, su tasa de desarrollo es mucho mayor cuando se alimenta de maíz que de algodón (Combs, & Valerio, 1980; Ali, & Schneider, 1990; Du Plessis *et al.*, 2020).

En esta investigación, realizada bajo condiciones controladas, evaluamos: 1) la duración del ciclo de vida de *S. frugiperda* bajo un gradiente de temperatura; 2) los efectos de dos escenarios climáticos (actual y futuro) sobre el ciclo de vida de *S. frugiperda* alimentándose de dos variedades de maíz; y 3) los efectos de los escenarios climáticos experimentales sobre el desempeño de las variedades de maíz con y sin herbívoros.

Desarrollo

Ciclo de vida de *S. frugiperda*

Para evaluar el efecto de diferentes temperaturas sobre el ciclo de vida de *S. frugiperda*, utilizamos masas de huevos provenientes de un cultivo de laboratorio. En cámaras de ambiente controlado se utilizaron 100 larvas de *S. frugiperda* por cada tratamiento de temperatura a 23, 25, 27, 29 y 31 °C, con un fotoperiodo de 12 h. Para cada tratamiento, las larvas estaban contenidas en recipientes individuales de plástico para evitar canibalismo, además fueron alimentadas con la dieta semisintética basada en agar enriquecido con vitaminas, sugerida por Poitout, & Bues (1974). Se monitoreó el tamaño y el peso de cada larva cada tres días. Cuando puparon, los individuos de *S. frugiperda* fueron sexados y cambiados a un recipiente transparente que permitió monitorear su emergencia durante los 10 días subsecuentes.

Respuesta de *S. frugiperda* en interacción con variedades de maíz bajo condiciones climática actuales y futuras

En otro experimento bajo condiciones controladas, en el cual sembramos dos variedades de maíz provenientes de San Francisco Pichátaro, Michoacán, conocidas localmente como blanco ranchero y amarillo, evaluamos el desempeño de *S. frugiperda* y de las plantas de ambos maíces bajo dos diferentes condiciones climáticas. La primera condición denominada «actual», con temperaturas de 25/15 °C día/noche y riego a capacidad de campo. La segunda condición, denominada «condiciones futuras» se estableció con temperatura de 30/20 °C día/noche y riego a 70 % de la capacidad de campo (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). La humedad relativa dentro de las cámaras de crecimiento fue 50 % en ambas condiciones y el fotoperiodo fue de 12 h. En cada condición climática evaluamos las dos variedades de maíz y la presencia/ausencia de *S. frugiperda*. En total se utilizaron 8 tratamientos con 20 plantas cada uno.

Las semillas de maíz se sembraron en macetas plásticas de 13 L. Cuando las plantas tenían ocho semanas, después

de la germinación (equivalente a V5), se añadió una larva de *S. frugiperda* en el 4.º estadio. Las plantas con larvas se cubrieron con una malla fina de tul para evitar su escape. Evaluamos el desarrollo de las plantas, la herbivoría y el desarrollo de las larvas hasta que todas puparon.

Resultados y discusión

La temperatura influyó de manera significativa en el desarrollo de las larvas de *S. frugiperda* ($p < 0.05$). La temperatura óptima para larvas y pupas fue de 27 °C, bajo la cual los individuos alcanzaron las mayores tallas. El tiempo de desarrollo total se redujo conforme aumentó la temperatura de 46 días a 21 °C a tan solo 19 días a 31 °C. Nuestros resultados concuerdan con otros estudios en los que las temperaturas óptimas de desarrollo y alimentación para *S. frugiperda* están en el rango de 27 a 29 °C (Valdez *et al.*, 2012; Du Plessis *et al.*, 2020; Barfield, & Ashley, 1987). El rango de temperaturas que utilizamos no parece superar la tolerancia térmica de la especie, puesto que las larvas tuvieron buen desempeño en todas las temperaturas utilizadas, lo cual concuerda con su rango de distribución natural (Sparks, 1979; Simmons, 1993).

Para los insectos, el hecho de que la fase larvaria y de pupa sean prolongadas, implica que son más susceptibles a la depredación o la parasitación (Stearns, 1992), por lo que los individuos que presentan tasas más rápidas de crecimiento pueden tener una ventaja al escapar de la depredación, como podría ocurrir bajo temperaturas elevadas, tal como se observó en este trabajo con *S. frugiperda* (Evans *et al.*, 2013; Meineke *et al.*, 2014; Forrest, 2016). Por otro lado, el acortar la duración del ciclo de vida, al incrementarse la temperatura, podría implicar que *S. frugiperda* tenga más generaciones durante el ciclo agrícola. Si contemplamos los escenarios propuestos para la región del centro de Mé-

xico, este panorama podría suceder en 2030, lo que podría implicar hasta cinco generaciones al año para el fin de siglo (Saenz-Romero *et al.*, 2010; Ramirez-Cabral *et al.*, 2017), por lo que se vislumbra un incremento sustancial en las pérdidas económicas ocasionadas por este insecto (Porter *et al.*, 1991; Bale *et al.*, 2002; Dixon, 2009). Además, es bastante probable que, al aumentar la temperatura, el gusano cogollero se vuelva problemático en zonas con climas más fríos, en donde actualmente no tiene mayor relevancia.

Gusano cogollero y maíz: interacciones bajo diferentes escenarios climáticos

Las plantas de maíz amarillo crecieron a una tasa constante bajo el escenario actual de temperatura, pero desaceleraron su crecimiento a partir del día 60, resultando en plantas más pequeñas al término del experimento ($p = 0.02$; Fig. 2A). Por el contrario, para el maíz rancharo observamos un crecimiento acelerado en las condiciones de temperatura elevada, sin embargo, el tamaño final no difirió entre escenarios después de los 80 días ($p = 0.77$; Figura 2B).

La situación de que ambas variedades crecieran con mayor rapidez en condiciones de temperatura elevada, pero que tuvieran una menor talla al final del experimento, puede relacionarse con el hecho de que esta aceleración metabólica también implica una menor asimilación de CO₂ y, por tanto, una reducción en la acumulación de biomasa (Sánchez *et al.*, 2013; Bassu *et al.*, 2014). Dado que México tiene múltiples variedades de maíz que suelen ser cultivadas en sus ambientes óptimos, y que los escenarios de cambio climático proyectan modificaciones importantes en la temperatura y precipitación y sus rendimientos potenciales (Diffenbaugh *et al.*, 2015; de la Barrera, & Orozco-Martínez, 2016; Zhao *et al.*, 2017; Murray-Tortarolo *et al.*, 2018), es muy necesario considerar el movimiento de las semillas para asegurar la conservación de los maíces.

La herbivoría por *S. frugiperda* tuvo un efecto significativo en el crecimiento de ambas variedades de maíz, bajo las condiciones climáticas actuales ($p < 0.05$). En cambio, bajo la temperatura elevada las plantas de maíz rancharo fueron más pequeñas cuando tenían al insecto ($p = 0.05$); mientras que el maíz amarillo no fue afectado ($p = 0.72$; Figura 3). Sin embargo, el maíz amarillo sin insectos creció menos bajo las condiciones futuras que bajo la temperatura actual ($p < 0.05$), pero tuvo un crecimiento mayor cuando estuvo dañada por los herbívoros ($p < 0.05$). El hecho de que ambas variedades de maíz respondieron de manera distinta ante la herbivoría en condiciones de incremento en temperatura y reducción de la precipitación, provee información útil para los agricultores, en términos de selección de variedades en condiciones determinadas. Para minimizar las pérdidas

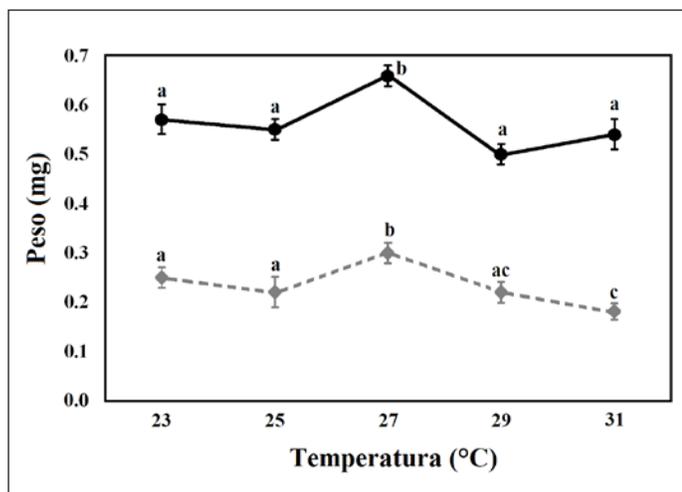


Figura 1. Desempeño de *S. frugiperda* (larva y pupa) bajo diferentes temperaturas

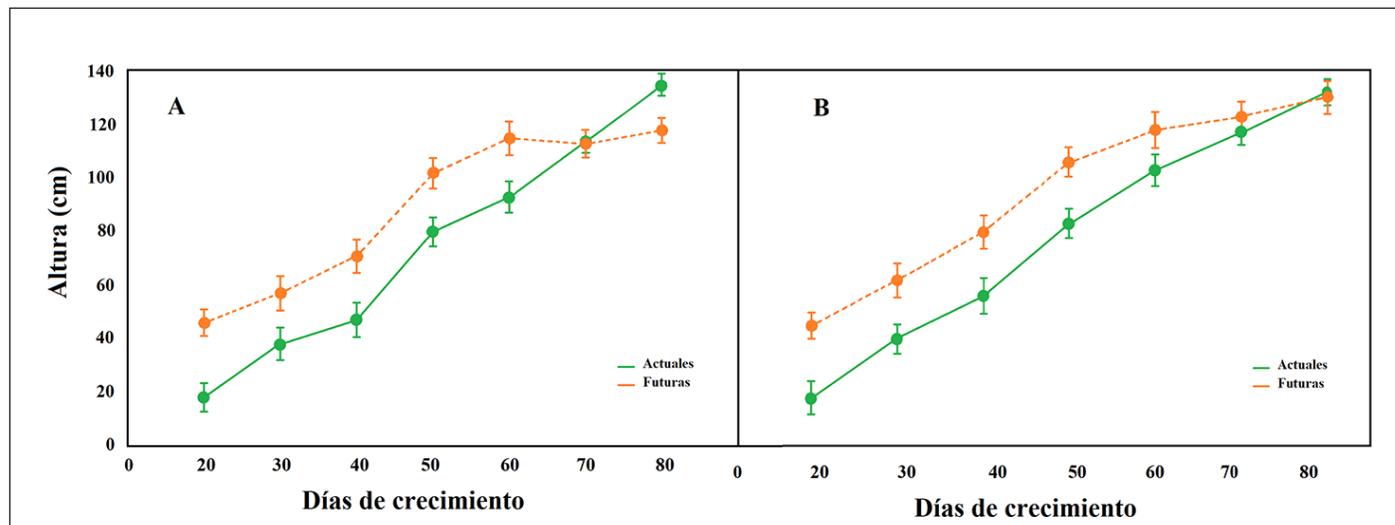


Figura 2A/2B. Crecimiento de plantas maíz: A) amarillo y B) rancharo bajo condiciones actuales (verde) y de cambio climático (rojo). Los datos se presentan como promedio \pm desviación/error estándar (n = 20).

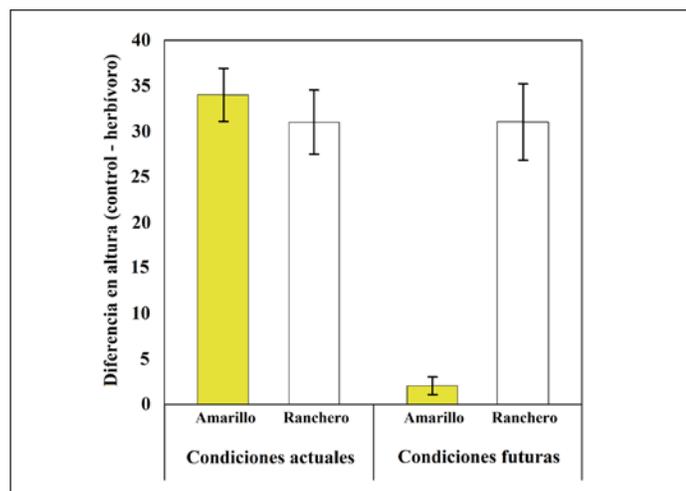


Figura 3. Respuesta de plantas de maíz amarillo y rancharo bajo condiciones actuales y de cambio climático en presencia del gusano cogollero (Promedio de la diferencia de altura entre tratamientos expresada en cm \pm desviación estándar).

producidas por el gusano cogollero se propone que el maíz amarillo debería sembrarse en áreas donde se prevé que la temperatura se incremente de manera acelerada, puesto que esta variedad mostró tolerancia a la herbivoría bajo tales condiciones. Hay escasos estudios que cuantifiquen la tolerancia a la herbivoría bajo diferentes condiciones de temperatura, del mismo modo, no se han encontrado patrones consistentes (Lemoine *et al.*, 2014), por lo que es un área para futuras y necesarias investigaciones.

En conclusión, las predicciones sobre cambio climático para este siglo ponen en riesgo el futuro de la producción de maíz en México, en particular, por los efectos favorables que tendrá el clima futuro sobre una de sus principales plagas, el

gusano cogollero. Sin embargo, debido a la alta diversidad de maíces en México, existen muchas oportunidades de utilizar las variedades adaptadas a condiciones climáticas más extremas para minimizar los daños en la producción. Es necesario continuar con el estudio de cómo las interacciones entre el maíz y sus herbívoros se verán afectadas en el corto y mediano plazo, a fin de minimizar pérdidas económicas y posibles efectos negativos sobre la seguridad alimentaria campesina.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el Fondo Semarnat-Conacyt (Proyecto 2008-C01-107978).

Referencias

- Ali, A., Luttrell, R. G., & Schneider, J. C. Effects of Temperature and Larval Diet on Development of the Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) (1990). *Annals of the Entomological Society of America*, 83, 725–733. <https://doi.org/10.1093/aesa/83.4.725>
- Altermatt, F. Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths (2010). *Proceedings of the Royal Society*, 277(1685), 1281-1287. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1910>
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J. E. G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T. H., Lindroth, R. L., Press, M. C., Symrnioudis, I., Watt, A. D., & Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>
- Barfield, C. S., & Ashley, T. R. (1987). Effects of corn Phenology and temperature on the life cycle of the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomological Society*, 70, 110-116.

- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J. L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J. W., & Waha, K. (2014). How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology*, 20, 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(33), 13432–13437. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Boggs, C. L. (2016). The fingerprints of global climate change on insect populations. *Current Opinion in Insect Science*, 17, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2016.07.004>
- Capinera, L. J. (1999). Fall armyworm, *S. frugiperda* (Smith) University of Florida. Publication No. EENY-98.
- Combs, R. L., & Valerio, J. R. (1980). Biology of the Fall Armyworm on Four Varieties of Bermudagrass When Held at Constant Temperatures. *Environmental Entomology* 9(4), 393–396. <https://doi.org/10.1093/ee/9.4.393>
- de la Barrera E., & Orozco-Martínez, R. (2016). Socio-ecological considerations on the persistence of Mexican heirloom maize. *Maydica*, 61, M36.
- Dell, D., Sparks, T. H., & Dennis, R. L. H. (2005). Climate change and the effect of increasing spring temperatures on emergence dates of the butterfly *Apatura iris* (Lepidoptera: Nymphalidae). *European Journal of Entomology*, 102(2), 161–167.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battistiti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Diffenbaugh, N. S., Swain, D. L., & Touma, D. (2015). Anthropogenic warming has increased drought risk in California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 112(13), 3931–3936. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422385112>
- Dixon, G. R. (2009). The impact of climate and global change on crop production. In Letcher, T. M. (ed.) *Climate Change. Observed impacts on planet Earth*. Elsevier 307, 324.
- Du Plessis, H., Schlemmer, M. L., & Van den Berg, J. (2020). The Effect of Temperature on the Development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Insects*, 11, 228. <https://doi.org/10.3390/insects11040228>
- Early, R., Ganzález-Moreno, P., Murphy, S. T., & Day, R. (2018). Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *NeoBiota*, 40, 25–50.
- Evans, E. W., Carlile, N. R., Innes, M. B., & Pitigala, N. (2013). Warm springs reduce parasitism of the cereal leaf beetle through phenological mismatch. *Journal of applied entomology*, 137, 383–391.
- Fernández, J. L. (2002). Estimación de umbrales económicos para *Spodoptera frugiperda* (J.E Smith) en el cultivo de maíz. *Investigación agraria. Producción y protección vegetales*, 17(3), 200–202.
- Forrest, J. R. (2016). Complex responses of insect phenology to climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 17, 49–54.
- Guerrero-Jiménez, Z. D., de la Barrera E. (2015). Short-term drought responses by seedlings of three maizes along an environmental gradient in Michoacán, Mexico. *Maydica*, 60, 17.
- Kebede, M., & Shimalis, T. (2019). Out-break, Distribution and Management of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* J.E. Smith in Africa: The Status and Prospects. *Academy of Agriculture Journal*, 3(10), 551–568.
- Lemoine, N. P., Burkepille, D. E., & Parker J. D. (2014). Variable effects of temperature on insect herbivory. *Peer J*, 2, e376. <https://doi.org/10.7717/peerj.376>
- Louette, D. A., Berthaud, J. (1997). In situ conservation of maize in Mexico: genetic diversity and maize seed management in a traditional community. *Economic Botany*, 51, 20–38.
- Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., y Gay, C. (2000) Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. En Gay García, C. (ed.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio Climático en México*. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, 9–26.
- Meineke, E. K., Dunn, R. R., Frank, S. D. (2014). Early pest development and loss of biological control are associated with urban warming. *Biology Letters*, 10(11), 20140586. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0586>
- Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo V. J., & Larsen J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011>
- Ouyang, F., Hui, C., Ge S., Men, X. Y., Zhao, Z. H., Shi, P. J., Zhang, Y. S., Li, B. L. (2014). Weakening density dependence from climate change and agricultural intensification triggers pest outbreaks: a 37-year observation of cotton bollworms. *Ecology and Evolution*, 4(17), 3362–3374. <https://doi.org/10.1002/ece3.1190>
- Padhee, A. K., & Prasanna, B. M. (2019) The emerging threat of Fall Armyworm in India time for proactive and collective action. *Indian Farming*. 69, 51–54.
- Poitout, S., & Bues, R. (1974). Elevage des chenilles de vingt-huit espèces de Lépidoptères: Noctuidae et de deux espèces á Arctiidae sur milieu artificiel simple. Particularités de l'élevage selon les espèces. *Annales de zoologie: Ecologie Animale*, 6, 431–441.
- Porter, J. H., Parry, M. L., & Carter, T. R. (1991). The potential effects of climatic change on agricultural insect pest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57, 221–240.
- Ramírez-Cabral, N. Y. Z., Kumar, L., & Shabani, F. (2017). Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *The Journal of Agricultural Science*, 155(8), 1219–1238. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000314>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3–4), 595–623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>

- Sala, O.E., Chapin, S. F. III, Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R. B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D. M., Mooney, H. A., Oesterheld, M., Poff, N. L., Sykes, M. T., Walker, B. H., Walker, M., & Wal, D. H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1170-1774. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2013). Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biology*, 20, 408–417. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>
- Shiferaw, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3, 307–327.
- SIAP (2015). Cierre de la producción agrícola por estado. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>
- Simmons, A. M. (1993). Effects of Constant and Fluctuating Temperatures and Humidities on the Survival of *Spodoptera frugiperda* Pupae (Lepidoptera: Noctuidae). *The Florida Entomologist*, 76(2), 333-340. <https://doi.org/10.2307/3495733>
- Sparks, A. N. (1979). A review of the biology of the fall armyworm. *The Florida Entomologist*, 62(2), 82-87. <https://doi.org/10.2307/3494083>
- Stearns, S. C. (1992). *The Evolution of Life Histories*. Oxford University Press, Oxford.
- Turrent Fernández, F., Wise, T. A., & Garvey, E. (2013). Achieving Mexico's Maize Potential. Food Sovereignty: A Critical Dialogue. Conference Paper # 10, Yale University.
- Valdez-Torres, J. B., Soto-Landeros, F., Osuna-Enciso, M. y Báez-Sañudo M. A. (2012). Modelos de predicción fenológica para maíz blanco (*Zea mays L.*) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). *Agrociencia*, 46, 399-410.
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J. L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., Peng, S., Peñuelas, J., Ruane, A.C., Wallach, D., Wang, T., Wu, D., Liu, Z., Zhu, Y., Zhu, Z., & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 35, 9326-9331.

El colapso de la corriente AMOC y los impactos sobre la diversidad de anfibios a nivel global¹

Julián A. Velasco²

Resumen

En la Tierra se han identificado varios elementos de inflexión que pueden detonar consecuencias climáticas catastróficas, si se superan ciertos umbrales. Uno de estos elementos es la corriente meridional de retorno del Atlántico (AMOC), la cual transporta calor desde las zonas tropicales hacia la región templada, en el hemisferio norte. Un apagón o debilitamiento de esta corriente puede ocasionar cambios climáticos abruptos, pero casi nada se sabe de su impacto potencial en la biodiversidad. Aquí se presenta una pequeña revisión de la literatura sobre el tema y la reseña de un estudio reciente en el que se evaluó el impacto de un apagón potencial de la AMOC: ¿cómo podría afectar el clima del planeta y cuáles serían las consecuencias sobre la distribución y riqueza de especies de anfibios en el mundo?

Palabras clave: Puntos de inflexión; biodiversidad; cambio climático; AMOC

Abstract

Several tipping elements have been identified on Earth, triggering catastrophic climate consequences if certain thresholds on these subsystems are exceeded. One of these tipping elements is the Atlantic Meridional Overturning Current (AMOC), which transports heat from the tropics to the Northern Hemisphere. A blackout or weakening of this current can cause abrupt climatic changes, but almost nothing is known about its potential impact on biodiversity. Here is a brief review of the literature on the subject and a review of a recent study that evaluated the effect of a possible AMOC collapse or weakening, how it could affect the planet's climate, and the consequences on the distribution and richness of amphibian species in the world.

Key words: Biodiversity; climate change; biodiversity; tipping points; AMOC

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Velasco, J. A., Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Swingedouw, D., Ureta, C., Gay, C. & DeFrance, D. (2021). Synergistic impacts of global warming and thermohaline circulation collapse on amphibians. *Communications Biology*, 4, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01665-6>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Julián Velasco y que recibió la Mención Honorífica dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: javelasco@atmosfera.unam.mx

Introducción

Los puntos de inflexión o puntos de no retorno (*tipping points*) son fenómenos conocidos que pueden generar una disrupción sustancial en la dinámica de los sistemas naturales y humanos (Gladwell, 2006; Lenton *et al.*, 2008). Estos puntos o elementos críticos se caracterizan porque pueden ser ocasionados por cambios pequeños y, en algunas situaciones, provocar un cambio irreversible en el equilibrio dinámico del sistema en particular (p. ej. unos pocos años o décadas). Alrededor del planeta se han podido identificar y caracterizar nueve de estos puntos de inflexión que pueden alterar el sistema climático: (1) el hielo marino de verano en el Ártico; (2) la capa de hielo de Groenlandia; (3) la capa de hielo de la Antártica occidental; (4) La circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés); (5) El Niño –Oscilación del Sur; (6) el monzón de verano de la India; (7) el monzón de África occidental; (8) el bosque Amazónico; y el (9) bosque boreal (Lenton *et al.*, 2008; Lenton, 2011; Brovkin *et al.*, 2021). En algunos de estos puntos de inflexión, se han identificado los factores, que desencadenan el cambio repentino en el estado del sistema y los valores, donde se cambia de estado de fase (Lenton *et al.*, 2008).

Por ejemplo, en el caso de la AMOC se ha estimado que una entrada de agua dulce de 0.1-0.5 sverdrups -Sv-, los cuales equivalen a medio millón de metros cúbicos por segundo o 31,356 km³/año, pueden ocasionar un cambio irreversible en el sistema climático (Lenton *et al.*, 2008). La AMOC es parte de la corriente de circulación termohalina (*THC*, por sus siglas en inglés), y se encarga de distribuir calor desde la zona tropical hacia el hemisferio norte (Swingedouw *et al.*, 2022). Un apagón o debilitamiento de la AMOC puede ocasionar cambios irreversibles en el sistema climático del planeta y, por tanto, un evento climático catastrófico (Sgubin *et al.*, 2017). Se ha encontrado evidencia de impactos en el clima, incluyendo inviernos más severos en los Estados Unidos (Yin, & Zhao, 2021), disminución de las lluvias y alteraciones en el almacenamiento de carbono en Centro y Suramérica (Parsons *et al.*, 2014), reducciones del monzón en África occidental (Defrance *et al.*, 2017) e incrementos de temperatura en el hemisferio sur (Vellinga, & Wood, 2002; Jackson *et al.*, 2015). Sin embargo, el conocimiento de los impactos de un apagón de la AMOC sobre sistemas naturales y humanos más allá del clima está escasamente documentado (Anthoff, & Tol, 2016; Defrance *et al.*, 2017; Velasco *et al.*, 2021).

Anfibios como grupo indicador

Los anfibios constituyen un grupo bastante particular dentro de los vertebrados terrestres, que se pueden caracterizar por

la combinación de varias características, incluyendo que son organismos ectotérmicos (esto es, no generan calor por ningún proceso metabólico); presentan una piel desnuda y permeable, la cual es susceptible a la desecación; y sus huevos no presentan amnios, una membrana que envuelve al embrión que está presente en reptiles, aves y mamíferos. Los anfibios se dividen en tres grupos u órdenes: (1) ranas y sapos (*Anura*); (2) salamandras (*Caudata*); y (3) cecilias (*Gymnophiona*); cada uno con un plan corporal distintivo. Hasta la fecha se reconocen 8455 especies (Frost, 2021) que se distribuyen en casi todo el planeta ocupando una variedad muy amplia de hábitats y pisos térmicos. La mayor riqueza de especies se concentra en los bosques húmedos tropicales del Amazonas, la mata Atlántica, el Congo, la selva del arco oriental en África, el Sudeste Asiático continental e insular (Jenkins, *et al.*, 2013). Sin embargo, la mayor diversidad se concentra en el Neotrópico, y se considera que esta disparidad taxonómica entre regiones se debe a una interacción entre diversos factores ecológicos, que incluyen la heterogeneidad de hábitat, una marcada asimetría en aridez entre regiones y cambios en temperaturas del pasado (Hagen *et al.*, 2021). Es bastante probable que estos patrones de diversidad taxonómica dispares a través del planeta, estén directamente relacionados con la evolución de sus tolerancias térmicas y nichos ecológicos (esto es, las características del ambiente que permiten la supervivencia de las poblaciones de cada especie).

Por ejemplo, un estudio realizado recientemente, donde se incorpora información sobre la distribución de las especies de cuatro grupos de vertebrados terrestres (anfibios, reptiles, aves y mamíferos), encontró que los organismos ectotérmicos (anfibios y reptiles) tienden a presentar tasas de evolución de nichos más bajas que los organismos endotérmicos (aves y mamíferos), en los cuales la temperatura corporal se controla por procesos metabólicos internos (Rolland *et al.*, 2018). La tasa de evolución de nicho nos da información acerca de la velocidad en la que las especies se han adaptado a las condiciones de temperatura del pasado. En este sentido, los anfibios presentan las tasas más bajas, en comparación con los otros grupos, y esto sugiere que, posiblemente, no puedan adaptarse, si los cambios climáticos que se proyectan a futuro ocurren bastante rápido. Los anfibios son uno de los grupos más amenazados dentro de los vertebrados terrestres (Berridge *et al.*, 2008; IUCN, 2020). Las categorías de riesgo de extinción estipulan amenazas a la supervivencia de las especies, que tienen que ver con la combinación de factores propios de la especie (p. ej., el tamaño de las áreas de distribución, tamaño corporal, modos de vida (Cooper *et al.*, 2008; Sodhi *et al.*, 2008) y factores de estrés antrópico, incluyendo la deforestación y degradación del hábitat, presencia de enfermedades infecciosas emergentes (p. ej.,

el hongo quitridio, Scheele *et al.*, 2019), especies invasoras, contaminación y sobreexplotación (Berridge *et al.*, 2008). Estas categorías de riesgo son útiles para priorizar acciones de conservación sobre las especies y las regiones. Al evaluar los patrones geográficos de riqueza de especies para los anfibios, de acuerdo a sus categorías, se encuentra que las especies en mayor peligro de extinción se han acumulado en la región Neotropical (Figura 1). Usualmente, esto se relaciona con el hecho de que las especies que habitan en esa región tienden a tener áreas de distribución pequeñas (Jenkins *et al.*, 2013) y el impacto humano, o la huella humana (Sanderson *et al.*, 2002), es mucho mayor en esta región.

Este grupo de organismos se caracteriza por presentar áreas de distribución pequeñas, capacidades de dispersión bajas a través de los paisajes, rangos de tolerancia térmica estrechos, una gran sensibilidad a las sequías y/o aridez, y una capacidad de adaptación a climas cambiantes mucho más baja, todo esto en comparación con reptiles, aves y mamíferos. Adicionalmente, los impactos de las actividades humanas son mayores en las regiones con mayor diversidad de especies, por lo que la combinación de todos estos factores pone a los anfibios en una situación de conservación crítica, y donde muchas especies están casi en el borde de la extinción (Berridge *et al.*, 2008; Alroy, 2015).

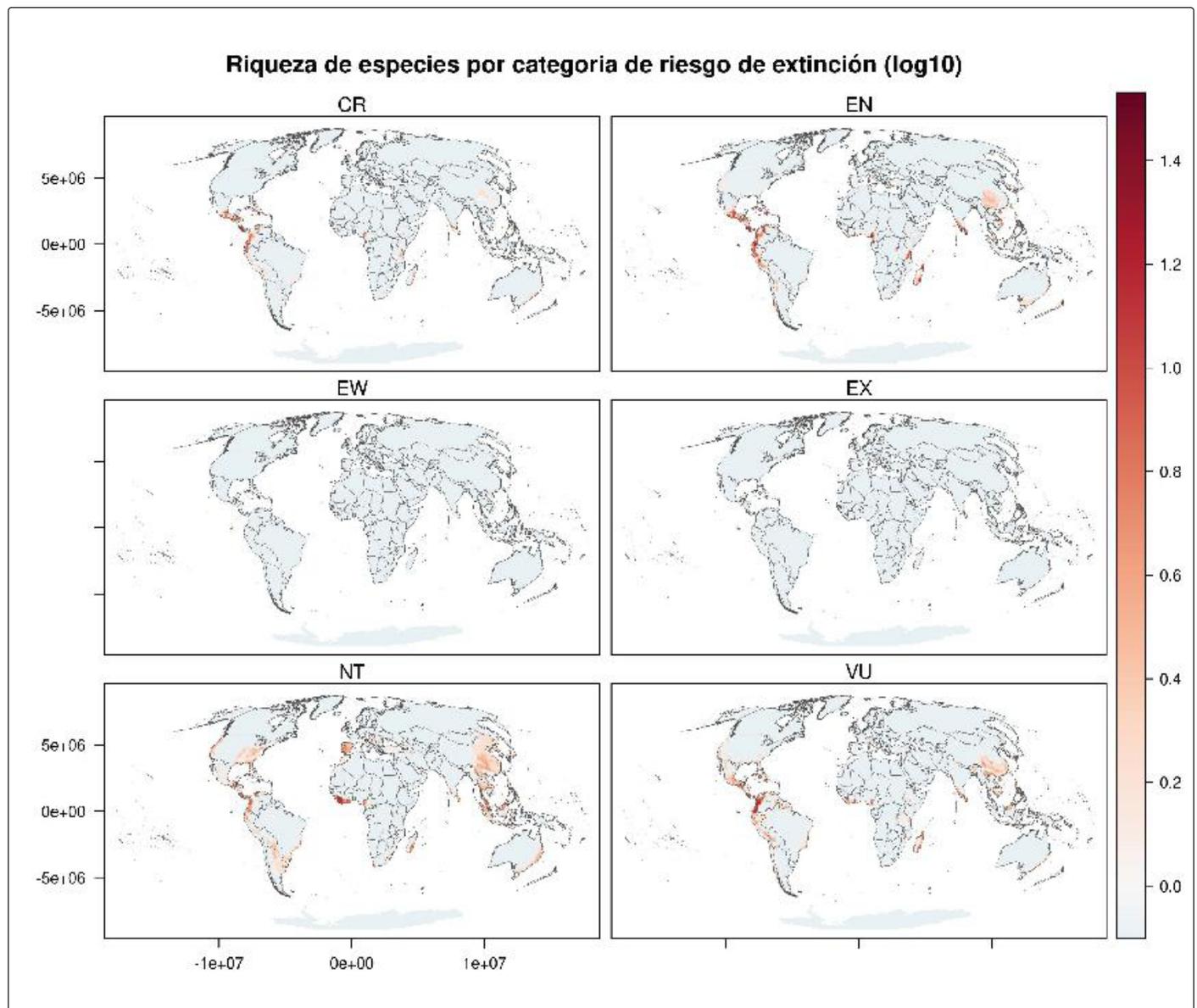


Figura 1. Variación geográfica de la riqueza de especies en escala logarítmica en las diferentes categorías de riesgo de extinción de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN (IUCN, 2020)). CR: En peligro crítico; EN: En peligro; EW: Extinto en vida silvestre; EX: Extinto; NT: Casi amenazado; VU: Vulnerable.

El impacto del cambio climático abrupto sobre los anfibios

La literatura sobre cambio climático enfocada en anfibios ha aumentado considerablemente en los últimos años. Esto sugiere que los anfibios son un grupo de interés en la comunidad científica, dadas sus características ecológicas y, probablemente, por su considerable amenaza de desaparición, como se ha mencionado anteriormente. Al examinar la literatura en detalle, vemos que existen varios estudios enfocados a evaluar impactos a escala global o regional sobre las distribuciones geográficas de las especies (Hof *et al.*, 2011), los patrones geográficos de riqueza (Araújo *et al.*, 2006; Hof *et al.*, 2018; Thuiller *et al.*, 2019; Menéndez-Guerrero *et al.*, 2020; Biber *et al.*, 2019) o la exposición de los ensamblajes (esto es, conjuntos regionales de especies) (Trisos *et al.*, 2020). Algunos estudios incluso se han enfocado en evaluar cómo las diferentes políticas de mitigación (Warren *et al.*, 2013, 2018) o la implementación de tecnologías verdes (Hof *et al.*, 2018) podrían afectar a este grupo de organismos.

El impacto de eventos climáticos abruptos o catástrofes climáticas sobre la biodiversidad es desconocido hasta la fecha, por lo que este tipo de estudios son necesarios. En un estudio reciente evaluamos cómo un colapso potencial de la AMOC podría afectar la distribución geográfica de las diferentes especies de anfibios y los patrones geográficos resultantes de la riqueza de especies (Velasco *et al.*, 2021). Para esto, se simularon diferentes escenarios de un apagón de la AMOC usando experimentos de manguera. Estos experimentos consisten en agregar agua dulce en el océano a través del tiempo y con diferentes cantidades, y se realizan con los clásicos modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés). Estas simulaciones a futuro nos muestran que un impacto abrupto en el sistema climático no tendría un equivalente con ningún evento del pasado, desde el último periodo interglaciario, es decir, hace aproximadamente 121 000 años (Figura 2). La emergencia de climas muy diferentes (esto es, climas no análogos) se concentra en las regiones tropicales de América, África, Australia, las islas del Sudeste Asiático, la porción más sureña de Estados Unidos, y algunas regiones en China (Figura 2). En contraste, las regiones del Sahara y la porción del extremo norte de Estados Unidos, así como Canadá y la región de Groenlandia podrían exhibir climas similares a los que emergieron en el pasado (esto es, climas análogos; Figura 2).

Con el fin de evaluar los impactos del cambio climático abrupto generamos una serie de variables de clima que son relevantes para las especies de animales y plantas (es decir, variables bioclimáticas). Estas variables fueron creadas a mediados de la década de los 80 y se usaron para modelar la distribución geográfica de especies de serpientes en Australia,

a partir de la combinación de localidades donde se han registrado las especies y los valores de cada variable para cada localidad (Booth *et al.*, 2014; Nix, 1986).

En un principio estas variables bioclimáticas se seleccionaron considerando un proceso fisiológico de restricción climática sobre el crecimiento de las plantas (Booth *et al.*, 2014). Es, por esto, que el estudio de Nix (1986), quizás, representa el primer estudio de distribución geográfica con respecto al clima sobre una base fisiológica relativamente sólida. Estos modelos hoy en día son conocidos como modelos de nicho ecológico (MNE), y son una de las herramientas conceptuales y metodológicas más usadas en las evaluaciones de impactos de cambio climático en biodiversidad (Urban *et al.*, 2016, 2022). Estos modelos han sido usados extensivamente en diferentes grupos de organismos, y nos permiten hacer inferencias muy sencillas sobre cómo las distribuciones geográficas de las especies pueden experimentar contracciones o expansiones bajo los diferentes escenarios futuros. A partir de estos cambios en la distribución de las especies, podemos evaluar cambios en los patrones de riqueza y composición de especies.

En nuestro estudio (Velasco *et al.*, 2021) usamos un enfoque basado en modelación de nicho ecológico, y seleccionamos las variables bioclimáticas que tienen una influencia en la distribución geográfica de las especies (Munguía *et al.*, 2012) y los patrones de diversidad de especies y de funciones ecológicas (Araújo *et al.*, 2008; Ochoa-Ochoa *et al.*, 2019). Escogimos un conjunto de especies (aproximadamente 2 500) que fueran endémicas a las principales regiones biogeográficas del planeta. Ajustamos modelos de nicho ecológico para cada especie y se generaron mapas de favorabilidad climática (Figura 3). En la figura 3 podemos observar los mapas de favorabilidad climática para una especie de anfibio endémica de la región afrotropical, y podemos notar cómo los valores más altos en el mapa, que corresponden a las condiciones más favorables para la persistencia de las especies, se reducen de forma significativa en los escenarios futuros simulando un apagón de la AMOC.

En nuestro estudio encontramos que un debilitamiento considerable de la AMOC podría generar un impacto significativo en las áreas de distribución de las especies y en los patrones de riqueza resultantes. En particular, observamos que las especies podrían reducir sus áreas en promedio entre un 67 y 80 %, con respecto a su distribución actual (Velasco *et al.*, 2021). Esto contrasta con reducciones entre 50 y 75 % de un escenario de emisiones altas (RCP8.5), el cual solo muestra un pequeño debilitamiento de la corriente hacia finales de este siglo. Asimismo, para muchas especies encontramos que se podría perder la totalidad de su área de distribución actual. Cuando compilamos los mapas de distri-

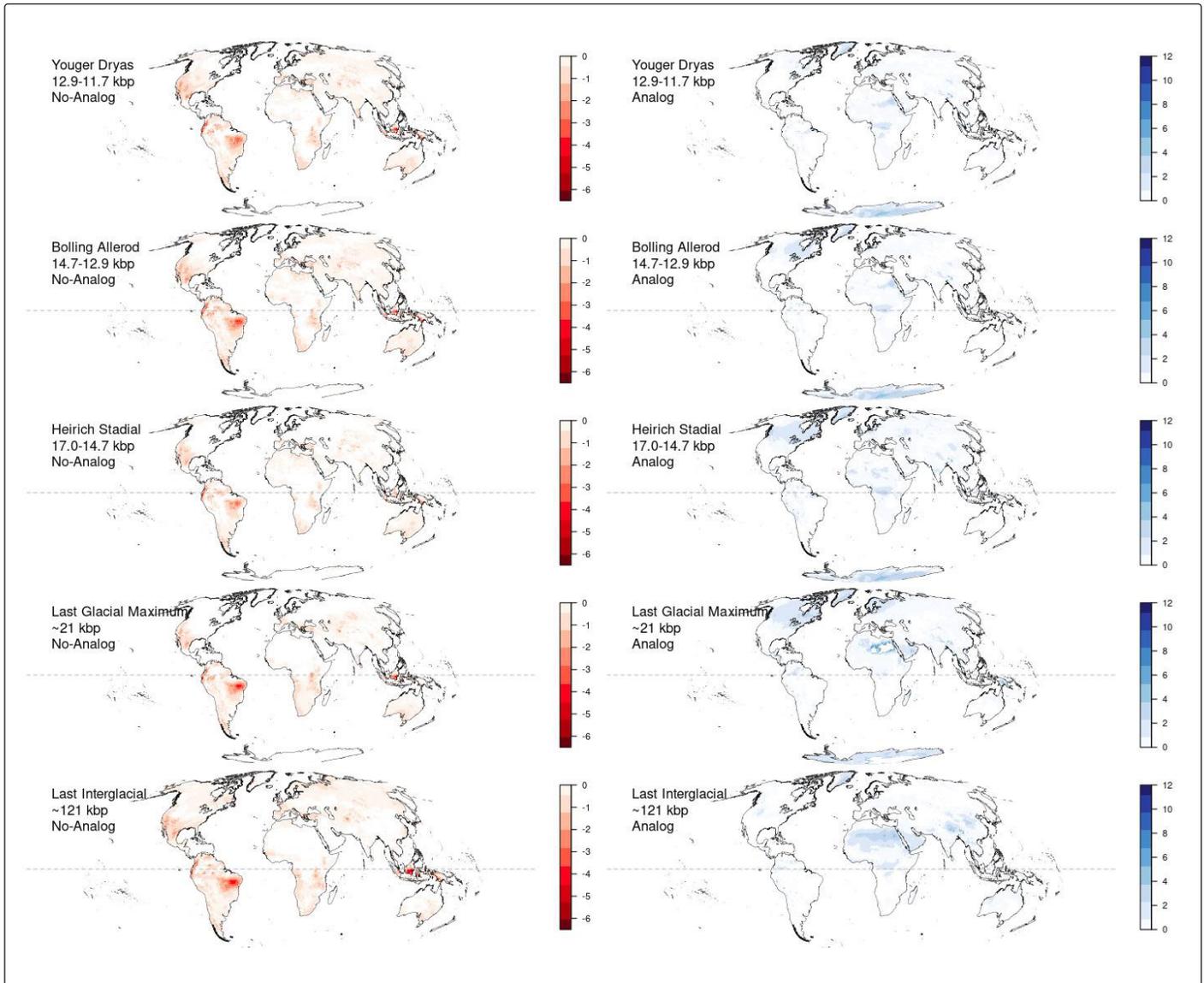


Figura 2. Equivalencia climática entre cinco periodos de clima abrupto que ocurrieron durante el Pleistoceno (hace 121,000 años) y los escenarios de colapso de la AMOC bajo experimentos de manguera. Los colores rojos corresponden a condiciones no-análogas, las cuales representan climas muy diferentes de lo registrado para el pasado. Los colores azules corresponden a condiciones análogas, las cuales representan climas similares a lo registrado en el pasado.

bución potencial y calculamos los porcentajes de riqueza de especies que podrían perderse, pudimos observar una gran variación geográfica en estas pérdidas donde las regiones más afectadas serían el Neotrópico, el sur de la región Paleártica y Neártica, así como el sur de África, este de Europa, Sudeste Asiático, y el Medio Oriente. Estos resultados en conjunto sugieren que el impacto de un debilitamiento sustancial de la AMOC puede afectar a muchas especies de anfibios, que pertenecen a muchos grupos taxonómicos y regiones en el planeta, aunque los impactos más severos se proyectan que ocurran en la región Neotropical y las regiones templadas (Velasco *et al.*, 2021).

A partir de estos resultados hacemos un llamado a una evaluación más integral de los impactos de catástrofes climáticas en la biodiversidad, incluyendo otros grupos taxonómicos con diferentes historias de vida y otras dimensiones de la biodiversidad (p. ej., diversidad genética, funcional, filogenética). Esta información nos permitirá tener un entendimiento más preciso de las consecuencias de estos eventos, que se consideran como raros por su probabilidad baja de aparición, pero que pueden ocasionar lo que conocemos como sorpresas ecológicas.

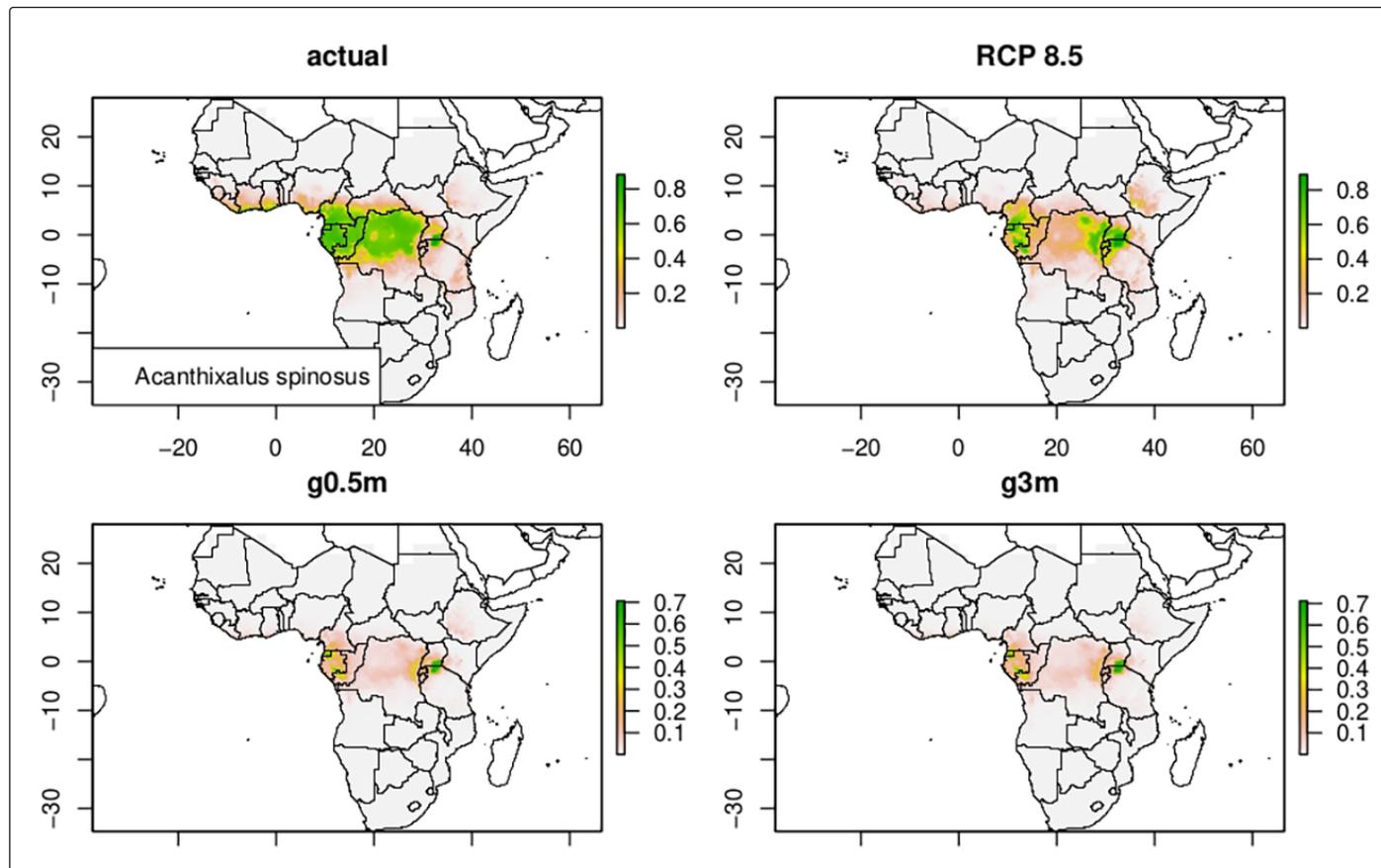


Figura 3. Proyección geográfica de la favorabilidad climática para una especie de anfibio africano *Acanthixalus spinosus* para el tiempo actual y proyecciones para el 2070 en un escenario de emisiones altas (RCP8.5) y dos escenarios donde se simula una descarga de agua dulce en el océano (g0.5m y g3m) que genera un apagón de la AMOC.

Referencias

- Aloy, J. (2015). Current Extinction Rates of Reptiles and Amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(42), 13003–13008. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508681112>
- Anthoff, D., Estrada, F., & Tol, R. S. J. (2016). Shutting Down the Thermohaline Circulation. *American Economic Review*, 106(5), 602–606. <https://doi.org/10.1257/aer.p20161102>
- Araújo, M. B., Nogués-Bravo, D., Diniz-Filho, J. A. F., Haywood, A. M., Valdes, P. J., & Rahbek, C. (2008). Quaternary Climate Changes Explain Diversity Among Reptiles and Amphibians. *Ecography*, 31(1), 8–15. https://doi.org/10.1111/j.2007_0906-7590.05318.x
- Araújo, M. B., Thuiller, W., & Pearson, R. G. (2006). Climate Warming and the Decline of Amphibians and Reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1712–1728. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01482.x>
- Berridge, R., Chanson, J., Cox, N., Hoffmann, M., Ramani, P., Stuart, S. N., & Young, B. E. (2008). *Threatened Amphibians of the World*. <https://portals.iucn.org/library/node/9186>
- Biber, M. F., Voskamp, A., Niamir, A., Hickler, T., & Hof, C. (2019). A comparison of macroecological and stacked species distribution models to predict future global terrestrial vertebrate richness. *Journal of Biogeography*, 47(1), 114–129. <https://doi.org/10.1111/jbi.13696>
- Booth, T. H., Nix, H. A., Busby, J. R., & Hutchinson, M. F. (2014). BIOCLIM: The First Species Distribution Modelling Package, Its Early Applications and Relevance to Most Current MAXENT Studies. *Diversity and Distributions*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Brovkin, V., Brook, E., Williams, J. W., Bathiany, S., Lenton, T. M., Barton, M., DeConto, R. M., Donges, J. F., Ganopolski, A., & McManus, J. (2021). Past Abrupt Changes, Tipping Points and Cascading Impacts in the Earth System. *Nature Geoscience*, 14(8), 550–558. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00790-5>
- Cooper, N., Bielby, J., Thomas, G. H., & Purvis, A. (2008). Macroecology and Extinction Risk Correlates of Frogs. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 211–221. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00355.x>
- Defrance, D., Ramstein, G., Charbit, S., Vrac, M., Famien, A. M., Sultan, B., Swingedouw, D., Dumas, C., Gemenne, F., & Alvarez-Solas, J. (2017). Consequences of Rapid Ice Sheet Melting on the Sahelian Population Vulnerability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(25), 6533–6538. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619358114>
- Frost, D. R. (2021). *Amphibian Species of the World: An Online Reference*, Version 6.1. <http://Research.Amnh.Org/Vz/Herpetology/Amphibia>

- Gladwell, M. (2006). *The Tipping Point: How Little Things Can Make a Big Difference*. Little, Brown.
- Hagen, O., Skeels, A., Onstein, R. E., Jetz, W., & Pellissier, L. (2021). Earth History Events Shaped the Evolution of Uneven Biodiversity Across Tropical Moist Forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(40), e2026347118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2026347118>
- Hof, C., Araújo, M. B., Jetz, W., & Rahbek, C. (2011). Additive Threats from Pathogens, Climate and Land-Use Change for Global Amphibian Diversity. *Nature*, 480(7378), 516–519. <https://doi.org/10.1038/nature10650>
- Hof, C., Voskamp, A., Biber, M. F., Böhning-Gaese, K., Engelhardt, E. K., Niamir, A., Willis, S. G., & Hickler, T. (2018). Bioenergy Cropland Expansion May Offset Positive Effects of Climate Change Mitigation for Global Vertebrate Diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13294–13299. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807745115>
- IUCN. (2020). The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2020-2. <http://iucnredlist.org>. Birdlife International.
- Jackson, L. C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M. A., Woollings, T., Mecking, J. V., & Wood, R. A. (2015). Global and European Climate Impacts of a Slowdown of the AMOC in a High Resolution GCM. *Climate Dynamics*, 45(11), 3299–3316. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>
- Jenkins, C. N., Pimm, S. L., & Joppa, L. N. (2013). Global Patterns of Terrestrial Vertebrate Diversity and Conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), E2602–E2610. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302251110>
- Lenton, T. M. (2011). Early Warning of Climate Tipping Points. *Nature Climate Change*, 1(4), 201–209. <https://doi.org/10.1038/nclimate1143>
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
- Menéndez-Guerrero, P. A., Green, D. M., & Davies, T. J. (2020). Climate Change and the Future Restructuring of Neotropical Anuran Biodiversity. *Ecography*, 43(2), 222–235. <https://doi.org/10.1111/ecog.04510>
- Munguía, M., Rahbek, C., Rangel, T. F., Diniz-Filho, J. A. F., & Araújo, M. B. (2012). Equilibrium of Global Amphibian Species Distributions with Climate. *PLoS One*, 7(4), e34420. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034420>
- Nix, H. A. (1986). A Biogeographic Analysis of Australian Elapid Snakes. In: Longmore, R. (Ed.), *Atlas of Elapid Snakes of Australia*, 7, 4–15. Australian Government Publishing Service.
- Ochoa-Ochoa, L. M., Mejía-Domínguez, N. R., Velasco, J. A., Marske, K. A., & Rahbek, C. (2019). Amphibian Functional Diversity Is Related to High Annual Precipitation and Low Precipitation Seasonality in the New World. *Global Ecology and Biogeography*, 28(9), 1219–1229. <https://doi.org/10.1111/geb.12926>
- Parsons, L. A., Yin, J., Overpeck, J. T., Stouffer, R. J., & Malyshev, S. (2014). Influence of the Atlantic Meridional Overturning Circulation on the Monsoon Rainfall and Carbon Balance of the American Tropics. *Geophysical Research Letters*, 41(1), 146–151. <https://doi.org/10.1002/2013GL058454>
- Rolland, Jonathan, Daniele Silvestro, Dolph Schluter, Antoine Guisan, Olivier Broennimann, & Nicolas Salamin. (2018). The impact of endothermy on the climatic niche evolution and the distribution of vertebrate diversity. *Nature Ecology and Evolution*, 2(3), 459–464. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0451-9>
- Sanderson, E. W., Jaiteh, M., Levy, M. A., Redford, K. H., Wannebo, A. V., & Woolmer, G. (2002). The Human Footprint and the Last of the Wild: The Human Footprint Is a Global Map of Human Influence on the Land Surface, Which Suggests That Human Beings Are Stewards of Nature, Whether We Like It or Not. *BioScience*, 52(10), 891–904. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0891:THEFATL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0891:THEFATL]2.0.CO;2)
- Scheele, B. C., Pasmans, F., Skerratt, L. F., Berger, L., Martel, A., Beukema, W., Acevedo, A. A., Burrowes, P. A., Carvalho, T., Catenazzi, A., de la Riva, I., Fisher, M. C., Flechas, S. V., Foster, C. N., Frías-Álvarez, P., Garner, T. W. J., Gratwicke, B., Guayasamin, J. M., Hirschfeld, M., Kolby, J. E., ... Kosch, T. A. (2019). Amphibian Fungal Panzootic Causes Catastrophic and Ongoing Loss of Biodiversity. *Science*, 363(6434), 1459–1463. <https://doi.org/10.1126/science.aav0379>
- Sgubin, G., Swingedouw, D., Drijfhout, S., Mary, Y., & Bennabi, A. (2017). Abrupt Cooling over the North Atlantic in Modern Climate Models. *Nature Communications*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/ncomms14375>
- Sodhi, N. S., Bickford, D., Diesmos, A. C., Lee, T. M., Koh, L. P., Brook, B. W., Sekercioglu, C. H., & Bradshaw, C. J. A. (2008). Measuring the Meltdown: Drivers of Global Amphibian Extinction and Decline. *PLoS One*, 3(2), e1636. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001636>
- Swingedouw, D., Houssais, M-N., Herbaut, C., Blaizot, A-C., Devilliers, M., & Deshayes, J. (2022). AMOC Recent and Future Trends: A Crucial Role for Oceanic Resilience and Greenland Melting? *Frontiers in Climate*, 4, s. p. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.838310>
- Thuiller, W., Guéguen, M., Renaud, J., Karger, D. N., & Zimmermann, N. E. (2019). Uncertainty in Ensembles of Global Biodiversity Scenarios. *Nature Communications*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09519-w>
- Trisos, C. H., Merow, C., & Pigot, A. L. (2020). The Projected Timing of Abrupt Ecological Disruption from Climate Change. *Nature*, 580(7804): 496–501. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2189-9>
- Urban, M. C., Bocedi, G., Hendry, A. P., Mihoub, J-B., Pe'er, G., Singer, A., Bridle, J. R., Crozier, L. G., De Meester, L., Godsoe, W., Gonzales, A., Hellmann, J. J., Holt, R. D., Huth, A., Johst, K., Krug, C. B., Leadley, P. W., Palmer, S. C. F., Pantel, J. H., Schmitz, A., Zollner, P. A., & Travis, J. M. J. (2016). Improving the Forecast for Biodiversity Under Climate Change. *Science*, 353(6304). <https://doi.org/10.1126/science.aad8466>

- Urban, M.C., Travis, J. M. J., Zurell, D., Thompson, P. L., Synes, N. W., Scarpa, A., Peres-Neto, P. R., Malchow, A-K., James, P. M. A., Gravel, D., De Meester, L., Brown, C., Bocedi, G., Albert, C. H., Gonzales, A., & Hendry, A. P. (2022). Coding for Life: Designing a Platform for Projecting and Protecting Global Biodiversity. *BioScience*, 72(1), 91–104. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab099>
- Velasco, J. A., Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Swingedouw, D., Ureta, C., Gay, C., & Defrance, D. (2021). Synergistic Impacts of Global Warming and Thermohaline Circulation Collapse on Amphibians. *Communications Biology*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01665-6>
- Vellinga, M., & Wood, R. A. (2002). Global Climatic Impacts of a Collapse of the Atlantic Thermohaline Circulation. *Climatic Change*, 54(3), 251–267. <https://doi.org/10.1023/A:1016168827653>
- Warren, R., Price, J., VanDerWal, J., Cornelius, S., & Sohl, H. (2018). The Implications of the United Nations Paris Agreement on Climate Change for Globally Significant Biodiversity Areas. *Climatic Change*, 147(3), 395–409. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2158-6>
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J. A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T. J., Jarvis, A., Shoo, L. P., Williams, S. E., & Lowe, J. (2013). Quantifying the Benefit of Early Climate Change Mitigation in Avoiding Biodiversity Loss. *Nature Climate Change*, 3(7), 678–682. <https://doi.org/10.1038/nclimate1887>
- Yin, J., & Zhao, M. (2021). Influence of the Atlantic Meridional Overturning Circulation on the US Extreme Cold Weather. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00290-9>

El cambio climático: una amenaza para la avifauna de los bosques secos estacionales del Neotrópico¹

David A. Prieto-Torres², Andrés Lira-Noriega³, Adolfo G. Navarro-Sigüenza⁴

Resumen

Se evaluaron los efectos potenciales del cambio climático global en los patrones espaciotemporales de biodiversidad en la avifauna asociada a los bosques secos estacionales del Neotrópico (BSEN). Se estimaron las áreas de distribución de >700 especies en escenarios de climas del presente y el futuro (2050 y 2070), considerando dos hipótesis de dispersión (contigua vs. no dispersión), para así evaluar los cambios esperados en el tamaño de las áreas de distribución y la composición de especies de las comunidades de los BSEN y dentro de las áreas protegidas (AP). Se estimó que más del 77 % de las especies podrían reducir sus áreas de distribución en el futuro, incluso con varias potenciales extinciones de especies. Además, una reducción en los valores de riqueza de especies con un incremento de la diversidad beta (es decir, alto recambio de especies) parece ser el escenario inmediato en el futuro entre los sitios con BSEN incluso dentro de las AP. Estos resultados sugieren que, debido al cambio climático, la avifauna de los BSEN sufriría procesos heterogéneos de reorganización de sus comunidades, amenazando la estabilidad y funcionamiento de este altamente diverso, pero frágil y amenazado ecosistema.

Palabras clave: Aves; bosques tropicales; cambios de distribución; intercambio de especies; modelado ecológico

Abstract

We assessed the potential effects of global climate change on spatio-temporal biodiversity patterns of bird assemblages associated to Neotropical seasonally dry forests (NSDF). We estimated the geographic distribution of >700 bird species under current and future (2050 and 2070) climates projections considering two dispersal ability assumptions (contiguous dispersal vs. no dispersal). Then, we assessed the potential changes of range size and species composition across NSDF and within the current Protected Areas (PAs). Over 77% of species tended to reduce their distributional ranges in the future, including several species extirpations. We estimated a general decrease in local species richness and increase in beta diversity (i.e., high species turnover) across NSDF and PAs under future scenarios. This suggests that NSDF's avian assemblages could be prone to an uneven structural reorganization as a consequence of climate change, which imply a threat for stability and functions of this highly diverse but at same time fragile and endangered ecosystem.

Key words: Birds; ecological modelling; range shifts; species turnover; tropical forests

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.01.002> Esta contribución está basada en el artículo presentado por David Prieto y que recibió la Mención Honorífica dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Tlalnepantla, Estado de México, México. Correo: davidprietorres@gmail.com

³ Investigador por México, Red de Estudios Moleculares Avanzados, Laboratorio de Biogeografía, Instituto de Ecología A. C., Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México. Correo: andres.lira@inecol.mx

⁴ Museo de Zoología, Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: adolfofon@ciencias.unam.mx

Introducción

Hoy día sabemos que el cambio climático global impacta negativamente en gran parte de la biodiversidad del planeta, ocasionando un aumento en los riesgos de extinción de muchas especies y alteraciones en los ecosistemas donde estas habitan (Lovejoy, & Hannah, 2019). El rápido incremento de la temperatura y los cambios en los patrones de precipitación promueven alteraciones en las dinámicas poblacionales de las especies que, a su vez, producen modificaciones en sus rangos altitudinales y latitudinales de distribución, así como en los patrones de migración y abundancia de los organismos, e incluso una eventual desaparición de especies (Peterson *et al.*, 2002; Golicher *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2016; Wilkening *et al.*, 2019). Además, considerando que las especies responden individualmente a estos impactos, es posible que sus patrones de codistribución también sean afectados en el futuro, lo que podría dar como resultado la reorganización de ensamblajes biológicos, debido a la extinción, migración e intercambio de especies (Golicher *et al.*, 2012; Zwiener *et al.*, 2018; Lovejoy, & Hannah, 2019). El resultado de tales modificaciones puede, en consecuencia, alterar la estabilidad y funciones de los ecosistemas. Por ello, predecir los impactos del cambio climático en los patrones de biodiversidad se ha vuelto un tema prioritario para la conservación, especialmente para los países megadiversos de Latinoamérica (Pearson *et al.*, 2019).

En el Neotrópico, los bosques secos estacionales (BSEN) son de los ecosistemas más amenazados hoy en día debido al desarrollo de actividades humanas como la agricultura, la ganadería, la explotación maderera, e incluso la instalación de desarrollos turísticos (Portillo-Quintero, & Sánchez-Azofeifa, 2010; Banda *et al.*, 2016). En estos bosques, que en determinadas épocas del año parecerían inhóspitos, se han reportado altos niveles de riqueza y endemismos de especies (Pennington *et al.*, 2009; Banda *et al.*, 2016; Prieto-Torres *et al.*, 2019). No obstante, han recibido relativamente poca atención por parte de ecólogos y conservacionistas. Una evidencia de ello es que más del 60 % de su vegetación original ya se ha perdido y, desafortunadamente, solo menos de un 10 % de su extensión actual se encuentra dentro de alguna categoría de protección (Portillo-Quintero, & Sánchez-Azofeifa, 2010; Prieto-Torres *et al.*, 2018). Ante este escenario, durante los últimos 20 años ha existido un creciente interés en comprender cómo las perturbaciones antropogénicas (tanto de uso de suelo como del clima) afectan la biodiversidad de estos bosques; así como en identificar sitios prioritarios a proteger para garantizar su conservación a largo plazo (Banda *et al.*, 2016; Prieto-Torres *et al.*, 2016, 2018, 2021).

Recientes estudios sugieren que los impactos del cambio climático más probables, en las comunidades biológicas de los BSEN, están relacionados con la disminución de la

diversidad, tanto alfa (número de especies) como beta (re-cambio de especies entre regiones). De hecho, se espera que el cambio climático promueva la extinción de biotas ecológicamente especializadas (típicamente de nichos ecológicos y distribuciones geográficas pequeñas) y, al mismo tiempo, la expansión de la distribución de especies generalistas, lo cual ocasionaría una homogenización de las comunidades alguna vez dispares (Vázquez-Reyes *et al.*, 2017; Zwiener *et al.*, 2018). Sin embargo, dado que se reconoce una alta rotación de especies entre las principales regiones del continente con BSEN (Banda *et al.*, 2016; Prieto-Torres *et al.*, 2019) es de esperar que estos impactos no sean uniformes para todas las regiones (Prieto-Torres *et al.*, 2016; Wilkening *et al.*, 2019). A pesar de la relevancia de este tema, son pocos los estudios que comparan la riqueza de los biomas secos a escala regional y global, considerando las alteraciones climáticas esperadas en el futuro (Prieto-Torres *et al.*, 2016; Borges *et al.*, 2019; Hidas-Neto *et al.*, 2019). Esto, evidentemente, restringe nuestra capacidad de comprender las futuras amenazas para estos importantes ecosistemas que, además, proveen a la humanidad de importantes servicios ambientales.

En este capítulo resumimos los resultados obtenidos en el trabajo “Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests”, publicado en la revista *Perspectives in Ecology and Conservation* (Prieto-Torres *et al.*, 2020). Este estudio tuvo como objetivos: (1) evaluar cómo el cambio climático global, pronosticado para los años 2050 y 2070, podría afectar la distribución y los patrones de diversidad de 719 especies de aves residentes de los BSEN de las islas del Caribe, Mesoamérica y el norte de Sudamérica; (2) estimar los grados de vulnerabilidad de las especies teniendo en cuenta su estado de conservación, grado de restricción geográfica y niveles de especialización; y (3) determinar la importancia de la actual red de áreas protegidas para el salvaguardo, a largo plazo, de las áreas de distribución de las especies, y los patrones de diversidad de los BSEN de la región. Decidimos utilizar a las aves como grupo de estudio, dado que son de los vertebrados más conocidos por la sociedad. Estas durante mucho tiempo han atraído la atención de científicos y tomadores de decisiones, con el fin de promover políticas de conservación; además, las aves desempeñan importantes funciones ecológicas (ej. dispersión de semillas, polinización y reproducción de plantas) dentro de los ecosistemas tropicales, y son buenos indicadores del estado de salud de estos (Sekercioglu, 2006; Barnagaud *et al.*, 2017; Wilkening *et al.*, 2019). Por ello, las aves representan una excelente alternativa para proporcionar evidencia nueva y más precisa, que permita guiar los esfuerzos de conservación a largo plazo para la biodiversidad de los BSEN.

Desarrollo

Los BSEN se distribuyen en fragmentos desde el noroeste de México hasta el norte de Argentina y suroeste de Brasil. La característica más común de estos bosques es que tienen suelos ricos y fértiles, crecen en zonas bajas y cálidas (su temperatura promedio anual es superior a los 25 °C), y están formados por árboles que pierden las hojas en los periodos de sequía que duran, al menos, tres meses al año, con lluvias de tan solo unos 100 mm (Portillo-Quintero, & Sánchez-Azofeifa, 2010; Banda *et al.*, 2016). Estas características ambientales generan una variedad de hábitats que permiten la existencia de una gran diversidad y endemismos de especies entre las regiones de BSEN. Para este trabajo solamente se consideraron los BSEN del llamado “grupo del norte” (Figura 1), conformado por las zonas de las islas del Caribe (1), el noroeste de México (2), la península de Yucatán (3), Centroamérica (4), la costa caribeña de Colombia y Venezuela (5), y los valles interandinos del norte en Colombia (6), las cuales tienen una historia biogeográfica común, pero diferente a la del resto de América del Sur (Pennington *et al.* 2009; Banda *et al.* 2016; Prieto-Torres *et al.* 2019).

Gracias al financiamiento aportado por organizaciones nacionales —como CONABIO, CONACyT y la UNAM (a través del PAPIIT-DGAPA proyecto IA202822)— e internacionales —como IdeaWild (EUA) y The Rufford Foundation (Reino Unido)— se ha logrado conformar una base de datos con más de 1 000 000 de registros históricos de presencia de las especies de aves en estos bosques (Prieto-Torres *et al.*, 2020). Con esta información se construyeron mapas de distribución para las aves, tanto en el presente como en el futuro (años 2050 y 2070), utilizando técnicas de modelación espacial, mejor conocidas como *modelado de distribución de especies* (Peterson *et al.*, 2011). Estas consisten en análisis matemáticos que permiten —basados en la teoría biológica del nicho ecológico— relacionar diferentes tipos de variables geográficas (p. ej. clima, topografía, vegetación, etc.) con los registros de presencia de una especie, para de esta manera identificar cómo y cuáles variables condicionan su distribución, y así trazar mapas de áreas con idoneidad climática para las especies (Peterson *et al.*, 2011). Para lograr esto, se utilizaron los datos disponibles en el proyecto WorldClim 1.4, los cuales incluyen 19 variables bioclimáticas que resumen los aspectos de precipitación y temperatura del planeta en el presente (Hijmans *et al.*, 2005). Para el caso

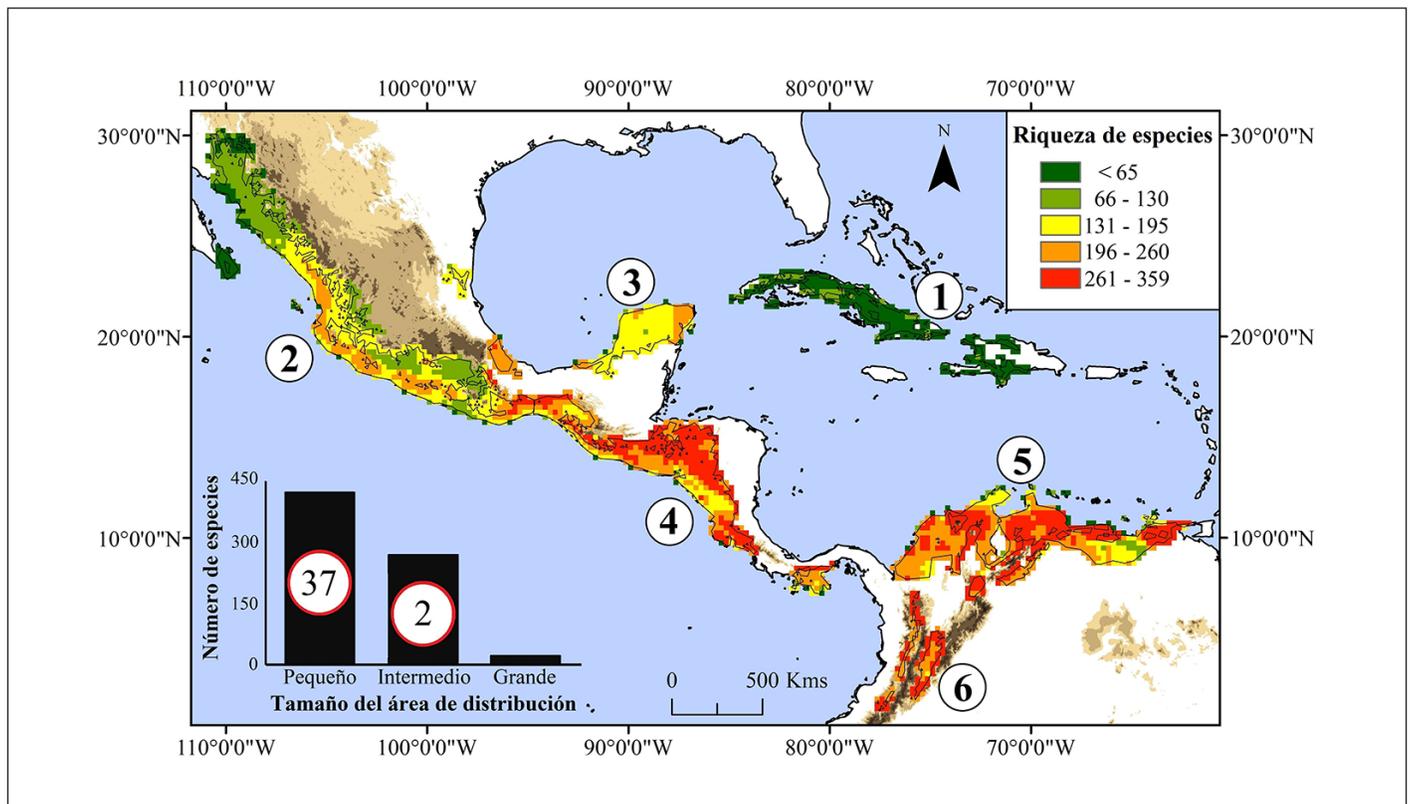


Figura 1. Patrón de riqueza de especies para la avifauna del “grupo norte” de los bosques secos estacionales del Neotrópico. El gráfico de barras indica el número de especies por categoría (pequeño, intermedio, grande), para el tamaño de las áreas de distribución. Los círculos indican el número de especies amenazadas.

de las condiciones en el futuro, se utilizaron las estimaciones de cuatro modelos de circulación global (ACCESS 1.0, CCSM4, MIROC5 y HadGEM2-ES), considerando dos escenarios contrastantes de Concentración Representativa de Carbono (IPCC, 2014): RCP 4.5 (“optimista”) vs. RCP 8.5 (“pesimista”).

Partiendo de estos mapas, se estimó qué proporción de la distribución de las especies se perdería por los cambios del clima en el futuro. Asimismo, se calculó cuánta de esa área remanente se encontrará dentro de la red existente de áreas protegidas (AP), y evaluamos si en el futuro algunas especies podrían ser más vulnerables que otras, de acuerdo a los tamaños (pequeño, intermedio o grande) de sus áreas de distribución, sus grados de especialización (especies restringidas al BSEN versus no restringidas) y/o sus estados de conservación (amenazadas versus no amenazadas). Además, identificamos en qué regiones habría una mayor y menor concentración de especies, y determinamos qué tan parecidas (similitud) son o podrían ser las regiones de BSEN, considerando tanto el número de especies presentes en cada región (diversidad alfa) como la proporción de especies que se comparten (diversidad beta) entre ellas. Para ello, utilizamos el índice de diversidad beta de Whittaker (Arita *et al.*, 2012). Estos análisis se realizaron considerando dos hipótesis de dispersión para las especies (Peterson *et al.*, 2002): dispersión contigua (las especies podrían desplazarse buscando su nicho y colonizar nuevas áreas) versus no dispersión (no podrán colonizar nuevos sitios, ocupando sólo áreas del presente que permanezcan idóneas en el futuro).

Los modelos obtenidos revelan que, en la actualidad, las aves tienen en promedio un 34.4 % de su distribución dentro

de los BSEN. Cerca del 60 % de las especies poseen áreas de distribución pequeñas dentro de los BSEN del norte; mientras que únicamente el 3.3 % de las especies muestran áreas grandes de distribución (Figura 1). Además, hoy en día 39 de estas especies están clasificadas como amenazadas (vulnerables, en peligro o en peligro crítico), y 26 como casi amenazadas, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (ver: IUCN; <https://www.iucnredlist.org/>). La riqueza promedio fue estimada en casi 182 especies (equivalente a un 25,1 % de las analizadas) por sitio (Tabla 1), siendo las regiones con mayor concentración de especies las de Centroamérica, la costa caribeña de Colombia y Venezuela, y los valles interandinos del norte de Colombia (Figura 1). En general, el valor para la beta de Whittaker fue de 3,96 con covarianza positiva para la mayoría de los sitios, lo que es indicativo de la presencia de especies en común entre las regiones.

Los impactos del cambio climático global

Las estimaciones obtenidas demuestran que los patrones de distribución de la avifauna de los BSEN podrán modificarse significativamente, para los años 2050 y 2070, por efectos del clima. Los resultados tienden, incluso, a mostrar patrones cualitativos similares entre los escenarios climáticos y de dispersión analizados (Tabla 1), aunque los supuestos pesimistas (RCP 8.5) y poco favorables (no dispersión) son donde se predicen mayores porcentajes de disminución, tanto para las especies individualmente como para los patrones de riqueza general en los BSEN (Figura 2).

Desafortunadamente, más del 77 % de las especies podrían reducir sus áreas de distribución, incluso con varias

Tabla 1. Valores promedios de riqueza de especies por sitio, tamaño del área de distribución por especie, así como la diversidad beta y el grado de disimilitud de riqueza estimados para la avifauna de los bosques secos estacionales del Neotrópico en el presente y el futuro.

Escenario climático	Riqueza de especies (% de especies)	Tamaño del área de distribución	Diversidad Beta de Whittaker	Valores de disimilitud
Present	181.73 (25.1%)	583.11	3.96	0.99851
Dispersión contigua				
2050 RCP4.5	163.08 (22.68%)	523.26	4.41	0.99852
2050 RCP8.5	151.54 (21.08%)	485.45	4.75	0.99856
2070 RCP4.5	154.09 (21.50%)	495.12	4.65	0.99855
2070 RCP8.5	129.29 (18.04%)	415.42	5.55	0.99864
No dispersión				
2050 RCP4.5	146.63 (20.39%)	471.10	4.41	0.99860
2050 RCP8.5	135.21 (18.81%)	434.42	4.75	0.99863
2070 RCP4.5	138.54 (9.27%)	443.76	4.65	0.99862
2070 RCP8.5	123.13 (17.13%)	395.63	5.55	0.99868

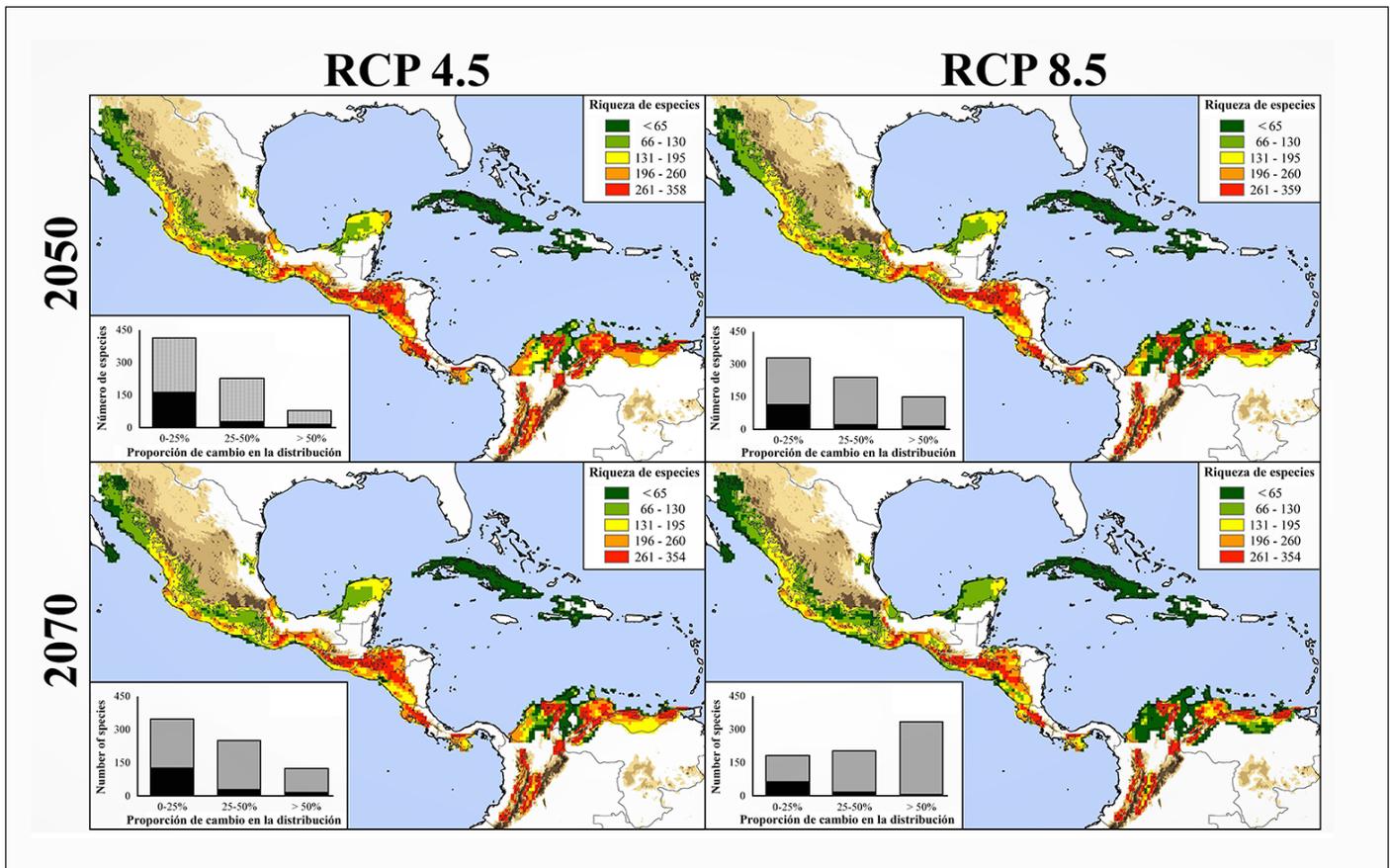


Figura 2. Patrones de riqueza de especies para la avifauna del “grupo norte” de los bosques secos estacionales del Neotrópico en el futuro, bajo escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5), considerando el supuesto de dispersión favorable para las especies. Los histogramas en los mapas muestran el número de especies y su proporción de cambio (reducción [color gris] o incremento [color negro]) en su distribución estimada en el futuro.

potenciales extinciones de especies (Tabla 2) como el loro yucateco (*Amazona xantholora*), el gavilán cubano (*Accipiter gundlachi*), el colibrí esmeralda de Cozumel (*Chlorostilbon forficatus*) y la chachalaca pálida (*Ortalis poliocephala*), por mencionar algunos casos. De hecho, se observó una clara tendencia de disminución en la distribución de las especies, aun considerando los escenarios optimistas de cambio climático y de dispersión (Tabla 2): solamente un 7 % de las especies se verán favorecidas (aumentando >10 % de sus áreas de distribución) por las nuevas condiciones climáticas en el futuro. Las pruebas estadísticas demostraron que las especies consideradas como restringidas a los BSEN (ANOVA: $F = 5.77$; $p < 0.01$) y, actualmente, amenazadas (ANOVA: $F = 14.23$; $p < 0.001$) serían las más vulnerables a estos impactos del clima futuro, especialmente, considerando un escenario de no dispersión. Además, las especies tendrán menos de 31 % de su distribución remanente dentro de los BSEN, por lo que en el futuro podrían desplazarse a otros ecosistemas colindantes en busca de mejores condiciones.

Por otra parte, los valores de riqueza de especies, dentro de los BSEN, también podrían verse reducidos (desde 5.06 % hasta un 33.63 %) en el futuro (Tabla 1), incluso de forma individual para cada una de las seis regiones analizadas. Esta reducción de riqueza de especies podría ocurrir entre un 31-51 % de las áreas conocidas hoy día como de mayor riqueza para los BSEN. Igualmente, se estima que las áreas de BSEN con mayor riqueza de especies ocuparán zonas de mayor elevación (en promedio 250 m) a la distribución promedio conocida en la actualidad. Aunque los valores obtenidos para la beta de Whittaker registran tendencias al incremento en el futuro (es decir, menor similitud entre regiones; Tabla 1), es importante resaltar que, en regiones como las islas del Caribe, la península de Yucatán y la costa Caribe de Colombia y Venezuela se observan, además, tendencias a un aumento del tamaño de distribución de las especies (Figura 3). Finalmente, las AP mostraron una clara tendencia a disminuir la riqueza de especies y el tamaño de las áreas de distribución de las especies en el futuro (Figura 4).

Tabla 2. Valores de expansión y reducción de las áreas de distribución para las aves de los bosques secos estacionales de acuerdo a las tres categorías de tamaños aquí consideradas.

Escenario	No. extinciones *	% Expansión			% Reducción		
		Grande	Intermedio	Pequeño	Grande	Intermedio	Pequeño
Dispersión contigua							
2050 RCP4.5	6	2.1±1.9	4.5±11.6	24.5±39.9	2.8±2.5	14.2±9.7	29.3±20.6
2050 RCP8.5	12	2.6±1.9	2.4±1.7	27.2±39.6	6.0±3.5	18.9±11.9	36.5±21.8
2070 RCP4.5	8	2.3±2.3	2.0±1.8	26.8±36.9	4.9±3.3	17.6±11.1	34.6±21.5
2070 RCP8.5	14	1.2±0.7	10.9±10.5	30.3±40.8	13.9±6.3	30.9±14.6	46.5±21.8
No dispersión							
2050 RCP4.5	10	—	—	—	6.1±2.5	17.4±9.9	34.9±20.8
2050 RCP8.5	24	—	—	—	9.9±3.5	23.6±11.3	42.9±22.7
2070 RCP4.5	16	—	—	—	8.6±3.1	21.7±10.7	40.8±22.2
2070 RCP8.5	29	—	—	—	14.7±5.6	30.6±13.4	47.8±23.4

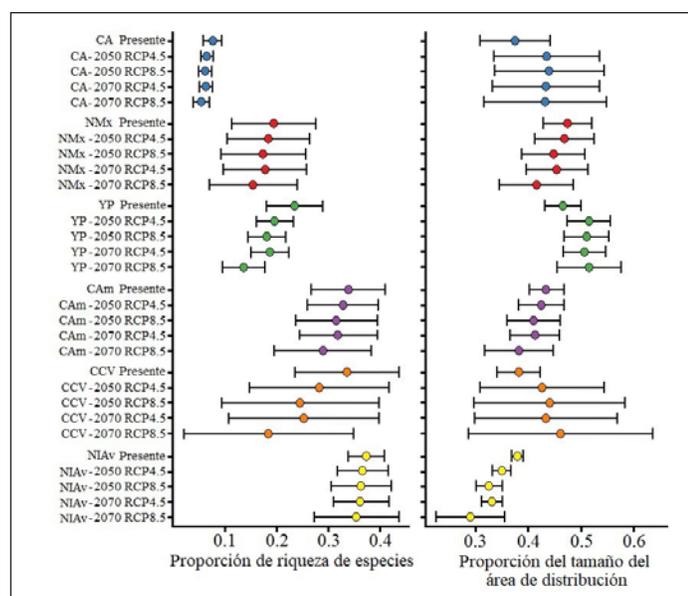


Figura 3. Valores de riqueza de especies por sitio y tamaño del área de distribución por especie, estimados bajo condiciones climáticas actuales y futuras, para la avifauna del "grupo norte" de los bosques secos estacionales del Neotrópico.

Conclusiones

Este estudio proporciona evidencia cuantitativa sólida sobre cómo el cambio climático global podría reducir las áreas climáticamente adecuadas, para más del 75 % de las especies de aves asociadas a los BSEN y, consecuentemente, alterar los patrones espaciotemporales de diversidad (debido a la disminución en la riqueza de especies a nivel local) en este ecosistema. Los impactos no solo afectan a especies categorizadas como amenazadas, sino también a especies de preocupación menor para la conservación. Esto refuerza la idea de que durante el siglo XXI ocurrirán cambios importantes en la biodiversidad, en las zonas de baja montaña, a causa de la migración de especies a sitios más altos, donde la humedad y temperatura son factores clave para la biota (Peterson *et al.*, 2002; Golicher *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2016, 2020; Borges *et al.*, 2019). Más importante aún, cualquier hipótesis de una diversidad beta estable en el futuro debe ser descartada para los BSEN: el cambio climático aumentará la disimilitud taxonómica y los niveles de especies restringidas geográficamente entre las regiones de BSEN, destacando aún más sus singularidades y rele-

vancia en conservación (Prieto-Torres *et al.*, 2020). Todo esto coincide con las tendencias predichas por autores como Menéndez-Guerrero *et al.* (2020) y Medina *et al.* (2020), para la biodiversidad de anuros (anfibios) en el Neotrópico, donde se estiman, también, procesos de heterogenización biótica en zonas con elevaciones menores a los 1500 msnm (rango altitudinal de distribución de los BSEN; Portillo-Quintero, & Sánchez-Azofeifa, 2010).

No obstante, es importante resaltar que este aumento en la diferenciación biótica podría ser solo el comienzo de un futuro proceso de homogeneización entre las regiones de BSEN. Si consideramos el dominante patrón de especies con áreas pequeñas de distribución, de continuar las constantes reducciones de distribución de las especies, entonces, se aumentará la probabilidad de extinción completa de las mismas y, al mismo tiempo, la invasión de especies generalistas (Zwiener *et al.*, 2018; Hidasi-Neto *et al.*, 2019; Prieto-Torres *et al.*, 2020). De hecho, a escala local observamos que esto es lo que está ocurriendo en varias regiones como las islas del Caribe, el noroeste de México y las áreas de tierras bajas de la costa caribeña de Colombia y Venezuela (Figura 3). Esto es indicativo de que la avifauna de los BSEN podría sufrir procesos heterogéneos de reorganización de sus comunidades, amenazando la estabilidad y funcionamiento de este tipo de ecosistema tanto a escala local como regional (Clavel *et al.*, 2011; Zwiener *et al.*, 2018; Hidasi-Neto *et al.*, 2019; Lovejoy, & Hannah, 2019). Por ejemplo, los cambios en la distribución de las aves podrían ocasionar efectos negativos en cascada, dada la potencial ruptura de las interacciones ecológicas plantas-animales (incluidos los polinizadores y los dispersores de semillas), o incluso que especies que actualmente no viven juntas, compitan en un futuro por los mismos recursos (Hegland *et al.*, 2009; Pauw, 2019). Por ello, sin duda, el cambio climático debe ser considerado como un factor de amenaza directa para la biodiversidad de los BSEN (Prieto-Torres *et al.*, 2016, 2020, 2021). La implementación de programas de monitoreo es fundamental para evaluar cómo las comunidades biológicas responden a estos cambios ambientales, especialmente considerando que no todas las especies tendrán las mismas capacidades de responder, en poco tiempo, a estas alteraciones del ambiente (Hegland *et al.*, 2009; Pauw, 2019).

Implicaciones para la conservación

Si bien la actual red de AP proporciona un servicio invaluable para salvaguardar los BSEN y su biodiversidad, los análisis muestran que estas áreas no están exentas de sufrir los impactos del cambio climático global (Figura 4). Claramente, la tarea por delante es tan urgente como desafiante, ya que gran parte de la biodiversidad de esta avifauna permanece

aún sin un adecuado nivel de protección y representatividad dentro de las AP (Prieto-Torres *et al.*, 2018). Si no se protege cada una de las regiones de los BSEN, se producirán grandes pérdidas de componentes únicos de su biodiversidad (Banda *et al.*, 2016; Prieto-Torres *et al.*, 2018, 2019). Por tanto, es necesario definir unidades prioritarias de conservación y añadirlas al sistema existente. Solamente si se desarrolla una red de AP idónea (es decir, extensa en superficie, representativa de la biodiversidad e interconectada entre sí), podremos garantizar la conservación de estos bosques (Hannah *et al.*, 2007; Prieto-Torres *et al.*, 2021).

Es necesario desarrollar más estudios de este tipo que permitan entender cómo los cambios globales impactarán los patrones de la biodiversidad, especialmente, considerando que la expansión de la frontera agrícola avanza rápidamente y atenta contra la persistencia y estabilidad ecológica de estos bosques (Vázquez-Reyes *et al.*, 2017). Para ello, es sumamente relevante fortalecer aún más los vínculos de trabajo entre las instituciones de investigación, las instituciones gubernamentales y las organizaciones no gubernamentales (ONG). Sólo el trabajo colaborativo entre ellas permitirá desarrollar estrategias de conservación eficaces, para un verdadero manejo sostenible de este ecosistema y su biodiversidad.

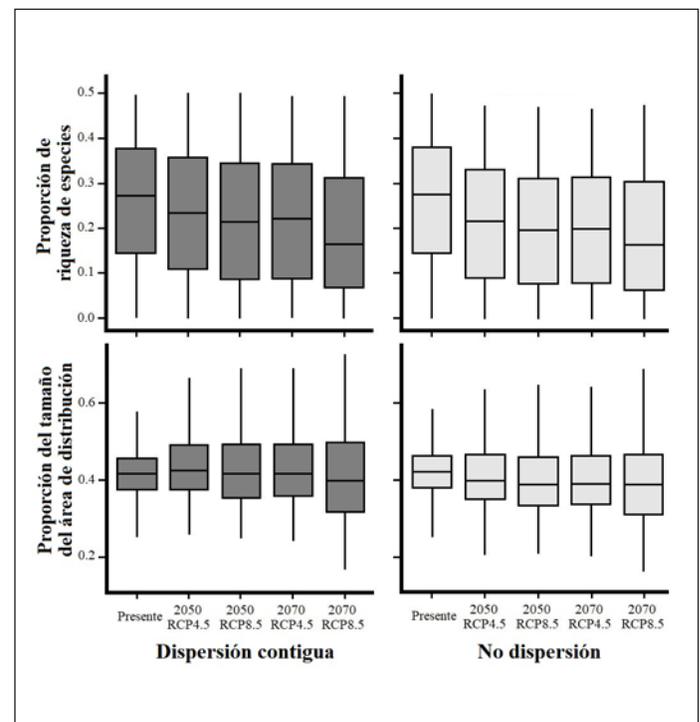


Figura 4. Valores de riqueza de especies por sitio y tamaño del área de distribución por especie, estimados dentro de las AP para la avifauna del "grupo norte" de los bosques secos estacionales del Neotrópico, bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

Referencias

- Arita, H. T., Christen, A., Rodríguez, P., & Soberón, J. (2012). The presence-absence matrix reloaded: the use and interpretation of range-diversity plots. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2), 282-292. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00662.x>
- Banda-R, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K. G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez M, G. M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren B., A., Arteaga, J. C., Aymard, G., Castaño, A., Ceballos-Mago, N..., & Pennington, R. T. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*, 353(6306), 1383-1387.
- Barnagaud, J. Y., Kissling, W. D., Tsirogiannis, C., Fisikopoulos, V., Villegier, S., Sekercioglu, C. H., & Svenning, J. C. (2017). Biogeographical, environmental and anthropogenic determinants of global patterns in bird taxonomic and trait turnover. *Global Ecology and Biogeography*, 26(10), 1190-1200. <https://doi.org/10.1111/geb.12629>
- Borges, F. J. A., Ribeiro, B. R., Lopes, L. E., & Loyola, R. (2019). Bird vulnerability to climate and land use changes in the Brazilian Cerrado. *Biological Conservation*, 236, 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.055>
- Clavel, J., Julliard, R., & Devictor, V. (2011). Worldwide decline of specialist species: toward a global functional homogenization? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(4), 222-228. <https://doi.org/10.1890/080216>
- Golicher, D. J., Cayuela, L., & Newton, A. C. (2012). Effects of climate change on the potential species richness of Mesoamerican forests. *Biotropica*, 44(3), 284-293. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00815.x>
- Hannah, L., Midgley, G., Anelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., Pearson, R., & Williams, P. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(3), 131-138. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[31:PANIAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[31:PANIAC]2.0.CO;2)
- Hegland, S. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknæs, A. L., & Totland, Ø. (2009). How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12, 184-195. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x>
- Hidasi-Neto, J., Joner, D. C., Resende, F., de Macedo Monteiro, L., Faleiro, F. V., Loyola, R. D., & Cianciaruso, M. V. (2019). Climate change will drive mammal species loss and biotic homogenization in the Cerrado Biodiversity Hotspot. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(2), 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.02.001>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- IPCC, 2014. *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* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Lovejoy, T. E., & Hannah, L. (2019). *Biodiversity and Climate Change: Transforming the Biosphere*. USA: Yale University Press.
- Medina, R. G., Lira-Noriega, A., Aráoz, E., & Ponsa, M. L. (2020). Potential effects of climate change on a Neotropical frog genus: changes in the spatial diversity patterns of *Leptodactylus* (Anura, Leptodactylidae) and implications for their conservation. *Climatic Change*, 161, 535-553. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02677-7>
- Menéndez-Guerrero, P. A., Green, D. M., & Davies, T. J. (2020). Climate change and the future restructuring of Neotropical anuran biodiversity. *Ecography*, 43, 222-235. <https://doi.org/10.1111/ecog.04510>
- Pauw, A. (2019). A bird's-eye view of pollination: Biotic interactions as drivers of adaptation and community change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 477-502. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024845>
- Pearson, R., Martínez-Meyer, E., Andrade Velázquez, M., Caron, M., Corona-Núñez, R., Davis, K., Paz Durán, A., García Morales, R., Hackett, T., Ingram, D., Loyola Díaz, R., Lescano, J., Lira-Noriega, A., López-Maldonado, Y., Manuschevich, D., Mendoza, A., Milligan, B., Mills, S., Moreira-Arce, D... & Marquet, P. A. (2019). Research priorities for maintaining biodiversity's contributions to people in Latin America. *UCL Open: Environment*, 1, 002.
- Pennington, R. T., Lavin, M., & Oliveira-Filho, A. (2009). Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry tropical forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 437-457. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120327>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press, New Jersey.
- Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., & Stockwell, D. R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416, 626-629. <https://doi.org/10.1038/416626a>
- Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, 143(1), 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020>
- Prieto-Torres, D. A., Navarro-Sigüenza, A. G., Santiago-Alarcon, D., & Rojas-Soto, O. (2016). Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global Change Biology*, 22(1), 364-379. <https://doi.org/10.1111/gcb.13090>
- Prieto-Torres, D. A., Nori, J., & Rojas-Soto, O. R. (2018). Identifying priority conservation areas for birds associated to endangered Neotropical dry forests. *Biological Conservation*, 228, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.10.025>
- Prieto-Torres, D. A., Rojas-Soto, O. R., Santiago-Alarcon, D., Bonaccorso, E., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2019). Diversity, Endemism, Species

- Turnover and Relationships among Avifauna of Neotropical Seasonally Dry Forests. *Ardeola*, 66(2), 257-277. <https://doi.org/10.13157/arla.66.2.2019.ra1>
- Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18(1), 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.01.002>
- Prieto-Torres, D. A., Nori, J., Rojas-Soto, O. R., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2021). Challenges and opportunities in planning for the conservation of Neotropical seasonally dry forests into the future. *Biological Conservation*, 257, 109083. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109083>
- Sekercioglu, C. H. (2006). Increasing awareness of avian ecological function. *Trends in ecology & Evolution*, 21(8), 464-471. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.05.007>
- Vázquez-Reyes, L. D., Arizmendi, M. C., Godínez-Álvarez, H. O., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2017). Directional effects of biotic homogenization of bird communities in Mexican seasonal forests. *Condor*, 119(2), 275-288. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-16-116.1>
- Wilkening, J., Pearson-Prestera, W., Mungi, N. A., & Bhattacharyya, S. (2019). Endangered species management and climate change: When habitat conservation becomes a moving target. *Wildlife Society Bulletin*, 43, 11–20. <https://doi.org/10.1002/wsb.944>
- Zwiener, V. P., Lira-Noriega, A., Grady, C. J., Padial, A. A., & Vitule, J. R. (2018). Climate change as a driver of biotic homogenization of woody plants in the Atlantic Forest. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 298-309. <https://doi.org/10.1111/geb.12695>

Prediciendo la hibridación como consecuencia del cambio climático¹

Angela Nava Bolaños², Alex Córdoba Aguilar³, Rosa Ana Sánchez Guillén⁴

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrentan las especies en la actualidad. Numerosas especies están respondiendo al cambio climático modificando sus áreas de distribución en seguimiento de su nicho ecológico. Estos cambios pueden tener como consecuencia la alteración en las áreas de contacto entre especies y el riesgo de hibridación en las nuevas áreas de contacto, entre especies estrechamente relacionadas, es decir, con una reducida distancia genética. Comprender cuáles especies son vulnerables a la hibridación, debido al cambio climático, es de relevancia en este tiempo. Para una mejor comprensión de este proceso evolutivo y sus consecuencias, en el artículo que reseñamos hemos analizado: 1) cómo el cambio climático puede afectar la distribución de las especies de libélulas del género *Argia*; 2) si los cambios en la distribución generarán nuevas áreas de simpatria; 3) el grado de divergencia genética entre especies, y 4) si las nuevas áreas de superposición son pronosticadas para especies estrechamente relacionadas. Con esto, evaluamos el potencial de hibridación en función de la distancia genética y las proyecciones de cambio climático para las especies del género *Argia*.

Palabras clave: Hibridación; libélulas; cambio climático; simpatria; distancia genética

Abstract

Climate change is one of the biggest challenges that species face nowadays. Species are responding to climate change by modifying their distribution areas while chasing their ecological niche. This may change the contact areas between species, with a risk of hybridization there between closely related species. Understanding which species are vulnerable to hybridization as a consequence of climate change is currently relevant. For a better understanding of this evolutionary process and its consequences, in the article we review we have analyzed: 1) how climate change can affect the distribution of damselflies species of the genus *Argia*, 2) if changes in distribution will generate new areas of sympatry, 3) the degree of genetic divergence between species, and, 4) whether new areas of overlap are predicted for closely related species. With this, we evaluate the hybridization potential based on genetic distances and climate change projections for *Argia* species.

Key words: Hybridization; damselflies; climate change; sympatry; genetic distance

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Nava-Bolaños, A., Sánchez-Guillén, R. A., Wellenreuther, M., Muñoz, J., Torres-Pachón, M., Novelo-Gutiérrez, R., & Córdoba-Aguilar, A. (2019). Predicting hybridisation as a consequence of climate change in damselflies. *Insect Conservation and Diversity*, 12, 427-436. <https://doi.org/10.1111/icad.12354>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Angela Nava y que recibió la Mención Honorífica dentro de la Categoría 2 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático.

² Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Boulevard Juriquilla 3001, Jurica La Mesa, Juriquilla, 76230, Querétaro, México. Correo: anb@ciencias.unam.mx

³ Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: acordoba@iecolologia.unam.mx

⁴ Instituto de Ecología A. C., Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México. Correo: rosa.sanchez@inecol.mx

Introducción

En el artículo reseñado (Nava-Bolaños *et al.*, 2019), investigamos el riesgo de hibridación como consecuencia del cambio climático. Para ello, analizamos la divergencia genética y los cambios en la distribución potencial de las especies. Una de las principales respuestas que han manifestado las especies al cambio climático actual, es el cambio en sus patrones de distribución en seguimiento de las condiciones ambientales favorables para su existencia (Parmesan *et al.*, 1999). Estos cambios tienen como consecuencia un aumento de áreas de simpatria entre especies, o la generación de nuevos contactos entre especies aisladas previamente (Garroway *et al.*, 2010). Esto da pie a nuevas interacciones ecológicas entre especies, incluyendo la hibridación, es decir, el apareamiento entre individuos de diferentes especies (Taylor *et al.*, 2015).

La hibridación es un proceso evolutivo que influye en gran medida en los patrones de diversidad que observamos en la actualidad. Este proceso permite el intercambio genético entre especies, aumentando la variación y posibilitando nuevos picos adaptativos, o al desencadenar procesos de especiación y diversificación; sin embargo, también podría conducir a las poblaciones a su extinción local (Rhymer, & Simberloff, 1996; Dowling, & Secor, 1997). Por tanto, la hibridación provee una excelente oportunidad para el estudio de procesos evolutivos. En el presente estudio existen múltiples evidencias de procesos de hibridación a causa del cambio climático; uno de los ejemplos más emblemáticos ha sido el del oso grolar o pizzly, que es el híbrido resultado de la cruce entre el oso polar (*Ursus maritimus*) y el oso grizzly (*U. arctos*) (Kelly, Whiteley, & Tallmon, 2010). La hibridación entre estas especies ha surgido por la expansión en la distribución del oso grizzly hacia latitudes más nórdicas en el Ártico, debido al deshielo de los polos que ha venido en aumento en décadas recientes por causa del cambio climático (Crispo *et al.*, 2011). Ejemplos como este se han reportado en diferentes grupos de organismos como peces (Yau, & Taylor, 2013), mariposas (Mallet *et al.*, 2011), odonatos (Sánchez-Guillén *et al.*, 2011), por citar solo algunos.

El estudio de la hibridación con herramientas de cálculo de divergencia genética tiene una larga tradición desde el siglo pasado. De hecho, hay alrededor de 500 estudios que analizan la distancia genética como un correlato para predecir hibridación en organismos como aves (Price, & Bouvier, 2002), anfibios (Sasa, Chippindale, & Johnson, 1998), plantas (Scopece *et al.*, 2007), e insectos como mariposas (Presgraves, 2002) y odonatos (Sánchez-Guillén *et al.*, 2014). En cuanto a las herramientas de modelado de nicho ecológico con énfasis en las cuestiones de hibridación, el desarrollo ha sido más reciente (por ejemplo: Sánchez-Guillén *et al.*,

2013; Bariotakis *et al.*, 2016; Otis *et al.*, 2017; Nava-Bolaños *et al.*, 2019).

A pesar de las múltiples evidencias de que la hibridación puede ocurrir como consecuencia del cambio climático, no sabemos en cuáles especies se podría desencadenar este proceso. El método que empleamos en el artículo reseñado, puede ser usado para predecir cuáles especies podrían ser vulnerables a hibridar ante escenarios de cambio climático. Para esto, combinamos dos herramientas de análisis: el modelado de nicho ecológico y análisis de distancia genética entre las especies. Con el modelado de nicho ecológico proyectamos el impacto del cambio climático en las áreas de distribución potencial de las especies de libélulas del género *Argia*, e identificamos las zonas de simpatria futuras, o áreas de contacto entre especies, donde las interacciones sexuales pueden tener lugar. Con los análisis de distancia genética entre especies, identificamos cuáles combinaciones de especies del género *Argia* tienen una distancia genética por debajo del umbral de hibridación. Con esta información, analizamos cuáles especies, genéticamente cercanas, podrían hibridar con aquellas especies que traslapan su área de distribución en respuesta al cambio climático.

Cambio climático e hibridación en libélulas

Una de las principales respuestas de las libélulas ante el cambio climático ha sido la transformación en sus patrones de distribución. Estos cambios han sido ampliamente documentados en libélulas del continente europeo; particularmente, se ha descrito detalladamente el desplazamiento que han tenido en años recientes libélulas mediterráneas, e incluso africanas (Ott, & Samways, 2010). La tendencia observada ha sido de aumentar su área de distribución. Por ejemplo, 37 especies de libélulas de Gran Bretaña han ampliado su área de distribución hacia el norte, por hasta 87 km (Hickling *et al.*, 2005). Como este, existen otros estudios que documentan cómo algunas especies, que se distribuían al sur de Europa, se han desplazado hacia el centro y norte del continente. Tal es el caso de *Aeshna affinis*, *A. mixta*, *Anax parthenope*, *Erythromma viridulum* (Ott, & Samways, 2010). Además, se han hecho proyecciones hacia el futuro, para varias especies del género *Ischnura*, en Europa, las cuales trazan cambios en las distribuciones, con nuevas áreas que pueden conllevar la formación o aumento de simpatria entre especies estrechamente relacionadas. Además, para odonatos se ha documentado que existe una relación positiva entre el grado de aislamiento reproductivo y la distancia genética entre especies (Sánchez-Guillén *et al.*, 2014). Este correlato puede utilizarse para predecir la hibridación (Coyne, & Orr, 1989; Moyle, *et al.*, 2004). De hecho, se ha predicho

que las distancias genéticas entre pares de cinco especies de la familia *Coenagrionidae* (*I. elegans*, *I. fountaineae*, *I. genei*, *I. graellsii* y *I. saharensis*) caen dentro del umbral de hibridación (Sánchez-Guillén *et al.*, 2014), lo cual se ha corroborado en la naturaleza (Sánchez-Guillén *et al.*, 2012).

Argia es el género de libélulas con mayor número de especies en el mundo. Cuenta con más de 126 especies descritas (Garrison, & Von Ellenrieder, 2017). Se distribuyen exclusivamente en el continente americano, y la mayoría de las especies de este género se encuentran en Norte América, ocupando áreas relativamente grandes, por lo cual pueden encontrarse comúnmente en simpatria (Nava-Bolaños *et al.*, 2016). Uno de los principales resultados que observamos en el trabajo reseñado es la tendencia de las especies de libélulas a incrementar su área de distribución como respuesta al cambio climático. Si bien hay especies cuya área de idoneidad se verá más restringida, el patrón general para las especies de libélulas del género *Argia* es de incremento en sus áreas de distribución potencial. La mayoría de las especies (20 de 30) aumentarán sus rangos de distribución. Nuestras proyecciones indican que los aumentos en las áreas de distribución ocurrirán en latitudes hacia el norte, como se ha reportado para otras especies de libélulas en el centro y norte de Europa. Estos incrementos en las áreas de distribución tienen como consecuencia, a su vez, incrementos en extensas áreas de simpatria entre las especies del género *Argia*.

Las nuevas áreas de simpatria son zonas de contacto entre especies, donde podrán tener lugar todo tipo de interacciones ecológicas, constituyendo zonas de posible hibridación. Nuestros resultados indican que 100 combinaciones de pares de especies con hibridación altamente predicha muestran un grado de superposición en sus áreas de distribución potencial. Curiosamente, para las condiciones actuales, las especies del género *Argia* se superponen en gran medida con su distribución, lo que significa que estas especies comparten, sobre todo, características de nicho ecológico, mostrando pequeñas diferencias interespecíficas de nicho. En odonatos, se ha reportado que estas pequeñas diferencias de nicho pueden conducir a frecuentes interacciones sexuales interespecíficas a escala local. Estas diferencias de nicho reducidas pueden explicarse por la selección sexual como el motor de las diferencias interespecíficas, en lugar de la especiación ecológica en este género. De hecho, este patrón puede parecer común en los odonatos, los cuales, generalmente, muestran grandes diferencias en los rasgos sexuales secundarios (Paulson, 1974; Nava-Bolaños *et al.*, 2014), pero a menudo tienen diferencias de nicho interespecífico más pequeñas. Con los análisis de distancia genética entre las especies de libélulas del género *Argia*, detectamos 108 pares de especies con bajas

distancias genéticas, con respecto al umbral de hibridación de diferencia genética para el marcador de COI.

Conclusiones

En el artículo reseñado, predecimos cómo las especies de libélulas del género *Argia* responderán al cambio climático, aumentando sus zonas de contacto y de posible hibridación entre especies estrechamente relacionadas. En él documentamos cómo la hibridación puede ocurrir a causa del cambio climático, e identificamos las especies que proyectan áreas de simpatria bajo escenarios de cambio climático, y que presentan baja diferencia genética. La superposición espacial puede promover la formación de zonas de contacto entre las especies, y esto aumentará debido al cambio climático. Además, el cambio climático puede inducir a que las zonas híbridas actuales sean inestables, como se observa en algunas especies de aves.

Nuevas investigaciones son necesarias para entender las consecuencias ecológicas y evolutivas de los nuevos híbridos. Sin embargo, un escenario plausible, de lo que podríamos observar, es lo que se ha reportado para los híbridos del género *Ischnura*, los cuales son más exitosos que sus especies parentales, y las han desplazado de sus hábitats originales. Nuestros resultados, a su vez, pueden ayudar a dirigir los esfuerzos de conservación para comprender y proteger la biodiversidad, por ejemplo, como lo hemos propuesto en el caso de *A. garrisoni*, o bien estudiando la función de las áreas naturales protegidas que se crearon para conservar la biodiversidad, las cuales podrían no tener ese papel en el futuro. Finalmente, los análisis implementados, en el artículo reseñado, pueden implementarse para otros taxones y en otras zonas geográficas, a fin de identificar y estudiar el impacto del cambio climático en las especies, y predecir potenciales riesgos de hibridación.

Agradecimientos

Angela Nava Bolaños agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca postdoctoral otorgada

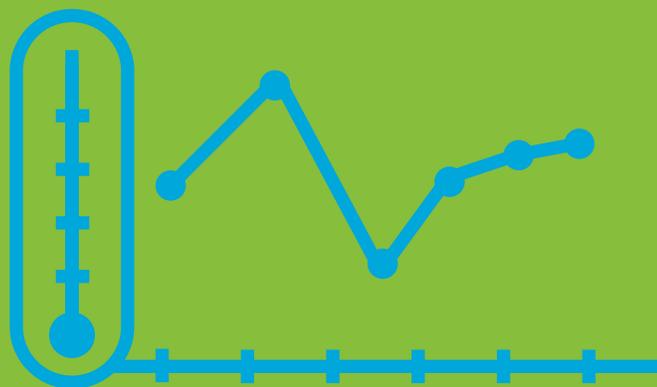
Referencias

- Bariotakis, M., Koutroumpa, K., Karousou, R., & Pirintson, S. A. (2016). Environmental (in)dependence of a hybrid zone: Insights from molecular markers and ecological niche modeling in a hybrid zone of *Origanum* (Lamiaceae) on the island of Crete. *Ecology and Evolution*, 6(24), 8727–8739. <https://doi.org/10.1002/ece3.2560>
- Coyne, J. A., & Orr, H. (1989). Patterns of speciation In *Drosophila*. *Evolution. International Journal of Organic Evolution*, 43(2), 362-381.
- Crispo, E., Moore, J. S., Lee-Yaw, J. A., Gray, S. M., & Haller, B. C. (2011). Broken barriers: Human-induced changes to gene flow and

- introgression in animals: An examination of the ways in which humans increase genetic exchange among populations and species and the consequences for biodiversity. *BioEssays* 33(7), 508–518. <https://doi.org/10.1002/bies.201000154>
- Dowling, T. E., & Secor, L. C. (1997). The role of hybridization and introgression in the diversification of animals. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 593–619. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.593>
- Garrison, R. W., & Von Ellenrieder, N. (2017). New species of the damselfly genus *Argia* from Mexico, Central America and Ecuador with an emphasis on Costa Rica (Insecta: Odonata: Coenagrionidae). *Zootaxa*, 4235(1), 1–93. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4235.1.1>
- Garroway, C. J., Bowman, J., Cascaden, T. J., Holloway, G. L., Mahan, C. G., Malcolm, J. R., Steele, M. A., Turner, G., & Wilson, P. J. (2010). Climate change induced hybridization in flying squirrels. *Global Change Biology*, 16(1), 113–121. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01948.x>
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., & Thomas, C. D. (2005). A northward shift of range margins in British Odonata. *Global Change Biology*, 11(3), 502–506. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00904.x>
- Kelly, B. P., Whiteley, A., & Tallmon, D. (2010). The Arctic melting pot. *Nature*, 468, 891. <https://doi.org/10.1038/468891a>
- Mallet, J., Wynne, I. R., & Thomas, C. D. (2011). Hybridisation and climate change: Brown argus butterflies in Britain (*Polyommatus* subgenus *Aricia*). *Insect Conservation and Diversity* 4, 192–199. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2010.00122.x>
- Moyle, L., Olson, M., & Tiffin, P. (2004). Patterns of reproductive isolation in three angiosperm genera. *Evolution*, 58(6), 1195–1208. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2004.tb01700.x>
- Nava-Bolaños, A., Sánchez-Guillén, R. A., Munguía-Steyer, R., & Córdoba-Aguilar, A. (2014). Isometric patterns for male genital allometry in four damselfly species. *Acta Ethologica* 17: 47–52. <https://doi.org/10.1007/s10211-013-0153-5>
- Nava-Bolaños, A., Sánchez-Guillén, R. A., Munguía-Steyer, R., & Córdoba-Aguilar, A. (2016). Isolation barriers and genetic divergence in non-territorial *Argia* damselflies. *Biological Journal of Linnean Society*, 120(4), 804–817. <https://doi.org/10.1111/bij.12916>
- Nava-Bolaños, A., Sánchez-Guillén, R. A., Wellenreuther, M., Muñoz, J., Torres-Pachón, M., Novelo-Gutiérrez, R., & Córdoba-Aguilar, A. (2019). Predicting hybridisation as a consequence of climate change in damselflies. *Insect Conservation and Diversity*, 12(5), 427–436. <https://doi.org/10.1111/icad.12354>
- Otis, J. A., Thornton, D., Rutledge, L., & Murray, D. L. (2017). Ecological niche differentiation across a wolf-coyote hybrid zone in eastern North America. *Diversity and Distributions* 23(5), 529–539. <https://doi.org/10.1111/ddi.12543>
- Ott, J., Samways M. J. (2010). Effects of climatic changes on Odonata: are the impacts likely to be the same in the northern and southern hemispheres? In Settele, J., Penev, L., Georgiev, T., Grabaum, R., & Grobelenk, V. (eds). *Atlas of Biodiversity Risk*, 84–85. Pensoft Publishers.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A., & Warren, M. (1999). Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399, 579–583. <https://doi.org/10.1038/21181>
- Paulson, D. (1974). Reproductive isolation in damselflies. *Systematic Zoology*, 23(1), 40–49. <https://doi.org/10.1093/sysbio/23.1.40>
- Presgraves, D. C. (2002). Patterns of postzygotic isolation in Lepidoptera. *Evolution*, 56(6), 1168–1183. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2002.tb01430.x>
- Price, T., & Bouvier, M. (2002). The evolution of F1 postzygotic incompatibilities in birds. *Evolution*, 56(10), 2083–2089.
- Rhymer, J. M., & Simberloff, D. (1996). Extinction by hybridization and introgression. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 83–109.
- Sánchez-Guillén, R. A., Wellenreuther, M., Cordero-Rivera, A., & Hansson, B. (2011). Introgression and rapid species turnover in sympatric damselflies. *BMC Evolutionary Biology* 11, 210. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-210>
- Sánchez-Guillén, R. A., Muñoz, J., Rodríguez-Tapia, G., Feria Arroyo, T. P., & Córdoba-Aguilar, A. (2013). Climate-induced range shifts and possible hybridisation consequences in insects. *PLoS ONE*, 8, 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080531>
- Sánchez-Guillén, R. A., Córdoba-Aguilar, A., Cordero-Rivera, A., & Wellenreuther, M. (2014). Genetic divergence predicts reproductive isolation in damselflies. *Journal of Evolutionary Biology*, 27(1), 76–87. <https://doi.org/doi:10.5061/dryad.vn110>
- Sánchez-Guillén, R. A., Wellenreuther, M., & Cordero-Rivera, A. (2012). Strong asymmetry in the relative strengths of prezygotic and postzygotic barriers between two damselfly sister species. *Evolution*, 66(3), 690–707. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01469.x>
- Sasa, M., Chippindale, P., & Johnson, N. (1998). Patterns of postzygotic isolation in frogs. *Evolution*, 52(6), 1811–1820. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1998.tb02258.x>
- Scopece, G., Musacchio, A., Widmer, A., & Cozzolino, S. (2007). Patterns of reproductive isolation in Mediterranean deceptive orchids. *Evolution*, 61(11), 2623–2642. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00231.x>
- Taylor, S. A., Larson, E. L., & Harrison, R. G. (2015). Hybrid zones: windows on climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(7), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.04.010>
- Yau, M. M., & Taylor, E. B. (2013). Environmental and anthropogenic correlates of hybridization between westslope cutthroat trout (*Oncorhynchus clarkii lewisi*) and introduced rainbow trout (*O. mykiss*). *Conservation Genetics*, 14, 885–900. <https://doi.org/10.1007/s10592-013-0485-8>

GANADORES

Categoría 3



Los incendios: una fuente importante de emisiones de carbono en México¹

Rogelio Omar Corona Núñez²

Resumen

La quema de biomasa, incluyendo los incendios, es la fuente primaria más grande de partículas de carbono y uno de los principales promotores del ciclo de carbono (C) global. La modelación sugiere un incremento en la frecuencia, intensidad y emisiones de C por incendios. Nosotros estimamos la variabilidad espaciotemporal de los incendios y de sus emisiones de C en México. Nuestros resultados indican que los ecosistemas tropicales, particularmente los de la península de Yucatán, la costa del Pacífico, y del golfo de México, aportan las mayores emisiones de C. Existe evidencia de la relación de las variaciones interanuales e intraanuales de las emisiones de C con efectos climáticos inmediatos y desfasados como El Niño y La Niña. Además, las emisiones de C por incendios son hasta 11 veces mayores que la deforestación, y representan el 19 % de las emisiones nacionales de CO₂, y el 5 % de las emisiones de C del Pantrópico. Debido a que los incendios se relacionan con el cambio climático, sugerimos que estudios futuros se enfoquen en la retroalimentación del clima con incendios, para la implementación adecuada de estrategias de mitigación.

Palabras clave: CONAFOR; degradación; ecosistemas; emisiones de CO₂; inventario de GEI

Abstract

Biomass burning, including fires, is the largest source of primary fine carbonaceous particles and one of the major drivers of global carbon (C) cycle. Modeling suggests an increase in Mexican fire frequencies, intensity, and C emission. We estimated the spatiotemporal variability of fires and its total C emissions in Mexico. We evidenced that tropical ecosystems, particularly tropical forests at Yucatan Peninsula, Pacific Coast, and Gulf of Mexico, provide the largest C emissions. We found evidence to contrast the relationships of the interannual and intraannual variability of C emissions with immediate and lagged climate effects such as El Niño and La Niña events. Moreover, C emissions from fires are up to 11 times higher than those from deforestation and account 19 % of the total National CO₂ emissions and 5 % of the total Panropical C emissions. Because fires are related to climate change, we encourage future studies to focus on climate fire feedbacks for implementing adequate climate mitigation strategies.

Key words: CONAFOR; degradation; ecosystems; CO₂ emissions; GHG inventory

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Corona-Núñez, R.O., Li, F., & Campo, J. E. (2020). Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, 1-16. <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Rogelio Corona y que fue premiado dentro de la Categoría 3 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Ecología y Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Procesos y Sistemas de Información en Geomática, SA de CV, Tlalnepantla, Edo. de México, México. Correo: ro.corona_nunez@ciencias.unam.mx

Introducción

La quema de biomasa, incluidos los incendios, es la fuente más grande de partículas de carbono finas primarias en la troposfera (van der Werf *et al.*, 2017). Anualmente se queman alrededor de 8.6 ± 4.3 Pg (media ± 1 DE) de biomasa seca (Andreae, 2019). Los incendios influyen en el comportamiento y en los procesos biogeoquímicos, incluida la dinámica del carbono (C) y el clima.

En los últimos años diferentes autores han evaluado las emisiones de C de los incendios y sus captaciones (Yin *et al.*, 2020). A nivel mundial se ha estimado que los incendios en vegetación nativa emiten 2.2 Pg C año⁻¹ con una importante variabilidad interanual (van der Werf *et al.*, 2017). Algunos autores han sugerido un incremento cada década del 20 % de las emisiones de C (Akagi *et al.*, 2011). Sin embargo, un estudio más reciente refuta este resultado, y sugiere que las emisiones de C de los incendios muestran una tendencia decreciente de ~10 % anual durante el período 2001-2014, particularmente en ecosistemas tropicales caducifolios (Yin *et al.*, 2020). Las simulaciones globales sugieren que los incendios pueden causar la reducción de la cubierta arbórea en el 84 % de los trópicos, específicamente en las regiones de sabanas y bosques tropicales, con una proporción del 44 % de las reducciones totales de las reservas de carbono a nivel mundial (Lasslop *et al.*, 2020). En el caso de México, algunas estimaciones con modelos han sugerido un aumento de los eventos de incendios (Krawchuk *et al.*, 2009).

Este estudio tuvo como objetivos: (1) evaluar la variabilidad espaciotemporal de los incendios y sus emisiones de C total en México; (2) identificar qué ecosistemas son propensos a incendios y (3) evaluar la variabilidad interanual e intraanual de las emisiones de C en el país. Para superar estos objetivos, utilizamos inventarios nacionales de incendios y datos satelitales de incendios activos del MODIS (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) en órbita polar y GOES (el sistema de satélites ambientales operativos geoestacionarios; GOES-13/GOES-E y GOES-15/GOES-W), para el período de 2011 a 2018, a través de la energía radiativa de los incendios (Fire Radiative Power, FRP por sus siglas en inglés). Los inventarios nacionales de fuego (National Census of Fires, NCF por sus siglas en inglés), realizados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), registran eventos de incendios diarios con una gran confianza en el terreno para todo México; mientras que GOES y MODIS brindan una cobertura completa del país en un intervalo de 15 minutos por día, respectivamente.

Resultados

Variabilidad interanual de incendios y emisiones de carbono

Los incendios presentan variaciones temporales en sus características. El NCF muestra que el número total de incendios por año, las emisiones de C acumuladas y la emisión media de C por incendio registraron una gran variabilidad durante el período 2011-2018. Más del 70 % de los incendios registrados anualmente son de corta duración (menos de un día). El número anual de incendios (Figura 1a) tiene una media de $1,781 \pm 393$ (media ± 1 DE) incendios dentro de una cuadrícula de 0.1° . Los incendios aislados (0,01 incendios por km²) representan el 52.2 ± 4.2 % del total de eventos de incendio. La superficie media afectada por incendios es de 50.8 ± 25.9 ha con una tendencia al alza durante la última década. La emisión media de C por hectárea, para todo el período, es de 2.03 ± 0.24 MgC. Las emisiones totales fueron de 0.53-2.62 Tg (Figura 1b), con una media anual de 86.3 ± 17.5 Mg por incendio (Figura 1c). Las estimaciones derivadas de FRP sugieren que el número de incendios osciló entre 45,677 y 104,032 (Figura 1d); mientras que la emisión total de C osciló entre 8.6 y 35.2 Tg (Figura 1e). La media de emisiones de C por hectárea fue de 0.023 ± 0.005 MgC. Las emisiones medias anuales de C oscilaron entre 58.6 y 106.6 MgC, con una media de 84.7 ± 14.0 MgC (Figura 1f).

El número de incendios y las emisiones de C contrastan entre ambos enfoques. El número de incendios de NCF representa el 2.7 ± 0.6 % de los derivados de los basados en FRP; mientras que las emisiones anuales de C calculadas a partir del NCF constituyen el 8.4 ± 3.5 % de las del FRP. Sin embargo, las emisiones medias anuales de C por incendio son estadísticamente similares entre ambos enfoques (W-test $p = 0.72$) (Figuras 1c y 1f).

La variabilidad intraanual de incendios y las emisiones de C estimadas por NCF y FRP muestran tres grupos dominantes. El menor número de incendios y emisiones de C se registró durante el período de septiembre a enero. Los mayores eventos de incendios y emisiones de C para ambos enfoques se presentaron durante el período de abril a junio.

Según el NCF, el bosque templado promueve las mayores emisiones de C. Por el contrario, las emisiones basadas en FRP muestran que los ecosistemas de bosques tropicales (es decir, bosques húmedos y caducifolios) contribuyen en la mayor parte (Figura 2). Los ecosistemas de bosques tropicales representan en promedio el 10.4 ± 7.1 % de las emisiones totales de C del NCF. Para estos ecosistemas, la estimación basada en FRP duplica la contabilizada por NCF (26.6 ± 5.4 %), y está dominada, principalmente, por el bosque

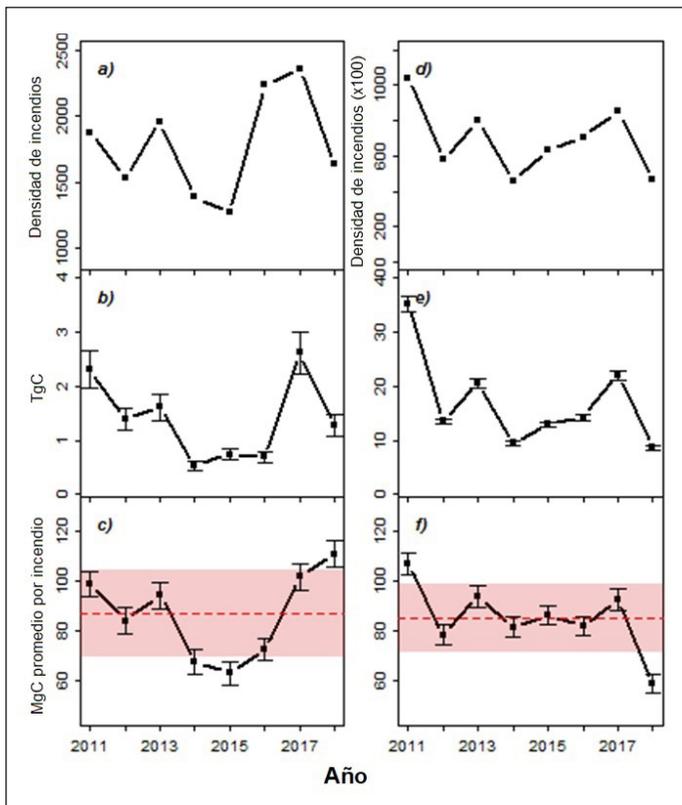


Figura 1. Serie temporal (2011-2018) del número de incendios, emisiones anuales de carbono (TgC) y emisiones medias de carbono por incendio (MgC por incendio ± 1 SD). Los paneles (a), (b) y (c) se refieren a los incendios reportados por el Censo Nacional de Incendios (NCF). Los paneles (d), (e) y (f) describen la estimación de incendios derivados de la energía radiativa de los incendios (FRP). Las barras en los paneles (c) y (f) se refieren a ± 1 DE estimado a partir de una distribución LOG-normal (prueba JB $p > 0,05$). La línea discontinua roja expresa las emisiones medias de carbono por incendio, estimadas anualmente; mientras que el área sombreada roja restringe el ± 1 DE a la media. ** Esta imagen fue tomada de Corona-Núñez *et al.* (2020).

tropical caducifolio (70.0 ± 9.8 %). Además, la importancia de las coberturas antropogénicas es significativamente diferente entre ambos enfoques. El NCF sugiere que este tipo de cobertura representa la proporción más pequeña, solo después de la clase de otra vegetación natural (media de 4.0 ± 2.1 %). Esto contrasta con la participación derivada de los basados en FRP, que suma 37.0 ± 7.1 %, representando la categoría con la mayor fuente de emisiones de C.

La distribución espacial de los incendios y sus emisiones de C, también, contrasta en ambos análisis (Figura 3). El NCF muestra que alrededor de la mitad del país no tiene ningún registro de incendios. La mayoría de ellos ocurren en la parte central de México y la Sierra Madre Occidental; en ambos

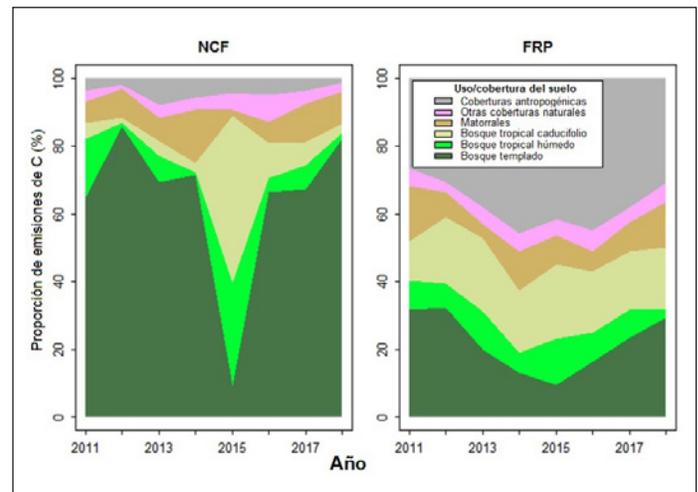


Figura 2. Emisiones de carbono de los incendios por uso/cobertura del suelo para el periodo 2011-2018, estimadas a partir del Censo Nacional de Incendios (NCF) y la base de datos de incendios activos sobre estimaciones de energía radiativa de incendios (FRP). Otra vegetación natural incluye pastizales y vegetación hidrofílica. Las coberturas antropogénicas incluyen pastos para la producción ganadera, agricultura de riego y de temporal. **Esta imagen fue tomada de Corona-Núñez *et al.* (2020).

casos, el bosque templado es la cubierta dominante. El FRP demuestra que la mayor parte del país, en algún momento en el pasado, ha experimentado un incendio. La región con mayor frecuencia de incendios es la península de Yucatán, seguida por la costa del Pacífico y el golfo de México, regiones con predominio de ecosistemas de bosque tropical. Además, según el NCF, las emisiones anuales medias de $GgCO_2e^-$ de la quema de biomasa por incendios representan $5.12 \pm 2.78 GgCO_2e^-$. La cantidad derivada de las cuentas basadas en FRP es de $62.5 \pm 32.0 GgCO_2e^-$.

Discusiones

Es probable que el NCF omita una gran proporción de incendios. Por ejemplo, el NCF exhibe grandes áreas sin registros de incendios (Figura 3), que corresponden con bajas densidades de incendios según FRP. Esto puede deberse a que el monitoreo de incendios por parte de la Comisión Nacional Forestal está sesgado hacia regiones accesibles.

Las emisiones de C en ambos enfoques arrojaron valores similares por incendio a nivel nacional. Este fenómeno sugiere que, si bien el FNC subestima la magnitud real de los incendios en México, es un buen proxy de la dinámica de los incendios, arrojando resultados comparables. Las emisiones medias de C por incendio fueron de $310.6 \pm 51.3 MgCO_2e^-$, de las cuales en promedio afecta 44.6 ha con

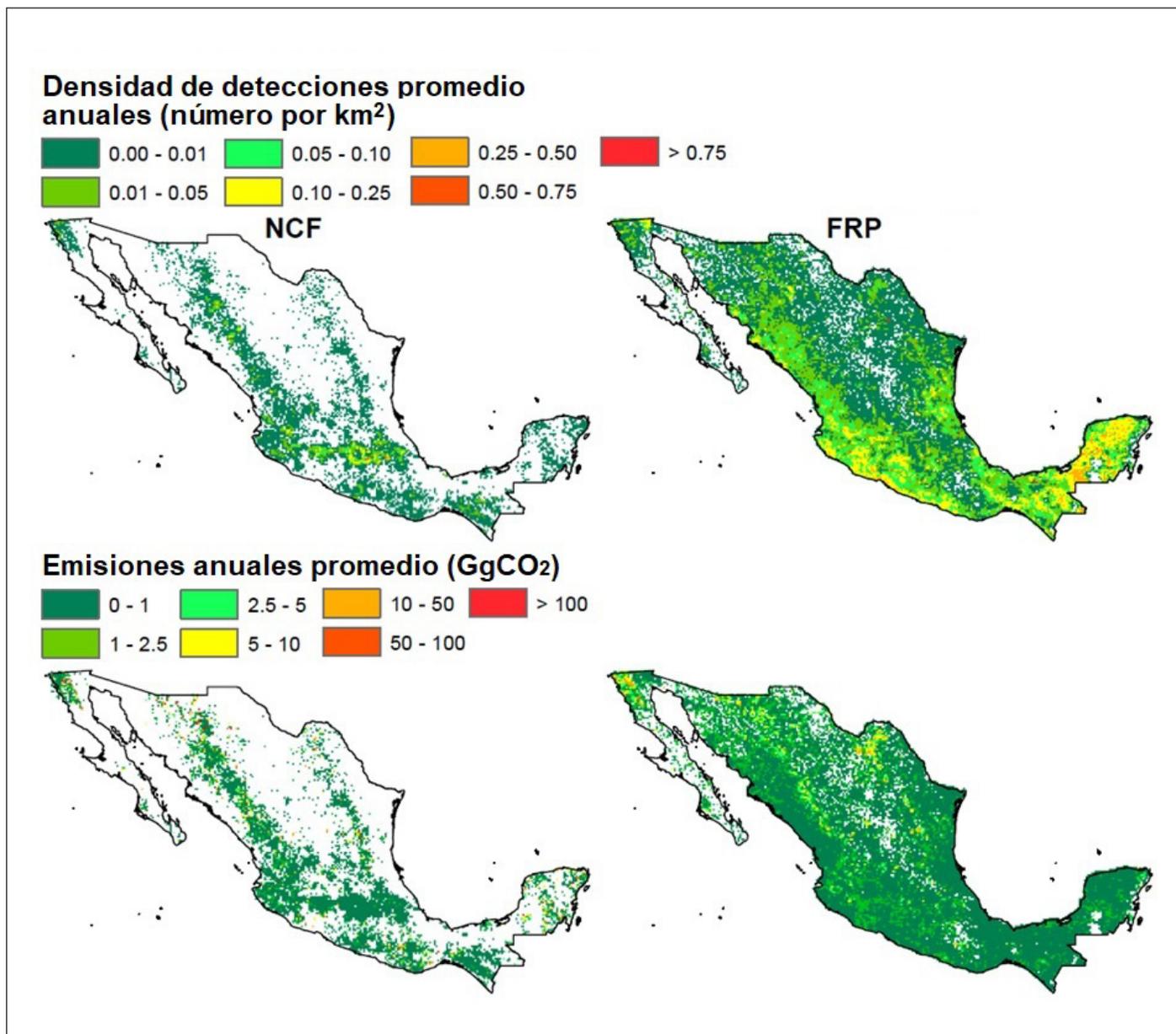


Figura 3. Distribución espacial de las densidades medias anuales de detección y las emisiones medias anuales de carbono de los incendios, durante el periodo 2011-2018, para el Censo Nacional de Incendios (NCF) y la base de datos de incendios activos sobre estimaciones de energía radiativa de incendios (FRP) agregadas en una resolución de 0,1°. El fondo blanco se refiere a NoData. ** Esta imagen fue tomada de Corona-Núñez *et al.* (2020).

baja severidad en la mayoría de los casos, resultando en una media de 7.0 ± 1.2 MgCO₂e- por hectárea.

Particularmente, México es considerado como una región propensa a incendios, debido a eventos climáticos (Krawchuk *et al.*, 2009). Bajo las condiciones climáticas futuras, se espera que aumenten las emisiones de C de los incendios, principalmente en los ecosistemas áridos y semiáridos. Por ejemplo, la variabilidad intraanual de las emisiones de C derivadas de los incendios se explica por cambios en factores

climáticos como la temperatura y la cantidad de lluvia. En México, específicamente al final de la estación seca (abril y mayo) es cuando se observan los registros más altos de temperatura y la reducción de precipitaciones, y se presenta una gran acumulación de hojarasca seca en bosques tropicales (Corona-Núñez *et al.*, 2018) y templados (Mendoza-Ponce, 2010). Es durante este período sin lluvia cuando encontramos el mayor número de incendios y emisiones de C. En tanto que las lluvias más frecuentes e intensas en México se observan

de julio a septiembre, asimismo, algunos eventos esporádicos de lluvias importantes hasta finales de noviembre. Esta temporada de lluvias se relaciona con los meses con menor número de incendios y emisiones de C.

La variabilidad interanual de las emisiones de C de los incendios está relacionada con los efectos climáticos retardados. En nuestro estudio encontramos que El Niño tiene un efecto retardado positivo en el número de incendios, las emisiones de C totales y las emisiones de C por incendio. En su contraparte, durante los años de La Niña se potencian las lluvias promoviendo un periodo prolongado de humedad en los ecosistemas mexicanos (Magaña *et al.*, 2003). Durante este período se esperan reducciones en el número e intensidad de los incendios, así como en las emisiones de C. Sin embargo, nuestros resultados sugieren que La Niña tiene un efecto retardado positivo sobre los incendios y las emisiones de C. Esto puede ser el resultado de un aumento de las cargas de biomasa muerta, en particular la hojarasca seca.

La cantidad de incendios y emisiones de C durante 2019 es incierta, y los estudios adicionales deberían analizar profundamente ciertos detalles. Parrington (2019) informó que durante 2019 la actividad global de incendios mostró una actividad inusual en ciertas regiones del mundo con incendios más intensos. No obstante, las declaraciones del gobierno contrastan con el conocimiento público: primero, los informes de incendios son recopilados por CONAFOR en el campo, por tanto, cualquier incendio real que no sea visitado por ningún cuerpo de bomberos, este se considera inexistente y, segundo, para diciembre de 2018 se impuso la reducción en un 30 % del presupuesto (~65 millones de dólares) a la Comisión Nacional Forestal de México, incluyendo la adquisición de equipo contra incendios y número de personal (Alcántara y Arvizu, 2019; Leyva, 2019). Esto reduce la capacidad de CONAFOR para registrar los incendios, y por consiguiente, el NCF subestima los registros de incendios. En este contexto, las emisiones de carbono de los incendios mexicanos están muy subestimadas, no obstante, representan una aportación importante de emisiones de C. Durante el período 2011-2018, México fue responsable de 4.9 a 5.3 % de las emisiones totales de C de las regiones tropicales (62.5 ± 32.0 TgCO₂e-). Además, las emisiones mexicanas de C derivadas de los incendios se están acelerando por encima del estándar mundial, posiblemente, como resultado del cambio climático (Pechony, & Shindell, 2010) y/o la reducción del presupuesto para mitigar los impactos de los incendios.

Las emisiones de carbono de los incendios son significativamente más relevantes que las de deforestación. Las emisiones de C de los incendios son ~5 veces más altas que

las de la deforestación, superando a las estimadas para Brasil e Indonesia. Además, los incendios en México representan el 19 y 7 % de los reportes nacionales de las emisiones totales de CO₂ para los años 2011 y 2015, respectivamente (INECC, 2018). En consecuencia, los incendios son una fuente destacada de emisiones de C, que actualmente las autoridades mexicanas subestiman y no se encuentran en ningún informe de inventario oficial. Este estudio demuestra la utilidad del método basado en FRP como un enfoque alternativo para estimar el potencial de mitigación que México puede implementar.

Conclusiones

Si bien se reconoce que los inventarios han ido mejorando constantemente, haciéndose más completos y con un mayor nivel de análisis, las actuales aproximaciones oficiales para estimar las emisiones por incendios están lejos de ser adecuadas. Durante el desarrollo de NCF y FRP para estimar las emisiones de C, pusimos mayor énfasis en la consistencia y el empleo de la información local más detallada para la calibración. A escala nacional, las emisiones medias de C son similares entre ambos enfoques y ambos indican aproximadamente la misma estacionalidad. Sin embargo, es importante resaltar que en México se subestima el número oficial de incendios y el área total afectada. Además, nuestra evaluación sugiere que las emisiones totales de carbono de México son mucho más altas que las reportadas oficialmente. Esta subestimación puede ser una de las razones por las cuales las acciones de gestión y mitigación del riesgo de incendios no se implementan adecuadamente y, en algunos casos, se minimizan sus impactos. Este estudio destaca la necesidad de desarrollar prácticas adecuadas de manejo de incendios al incluir planes de monitoreo de teledetección para acciones inmediatas y gestión de riesgos. Además, las estimaciones nacionales de las emisiones de carbono de los incendios no deben basarse únicamente en los inventarios forestales nacionales. Se debe implementar información más detallada, como la de sensores remotos, en particular, utilizando FRP, ya que tienen una alta resolución temporal. En consecuencia, estudios adicionales deberían evaluar la dinámica del fuego a partir de una fuente de información alternativa a las estadísticas oficiales. Nuestros datos demuestran que las emisiones de carbono de los incendios son significativamente más importantes que las de la deforestación en México. Esto destaca la oportunidad de reducir la huella de carbono del país, mediante la implementación de planes de prevención, particularmente en tierras agrícolas y ecosistemas de bosque tropical caducifolio. La severidad de El Niño y las precipitaciones influyen en la dinámica de los incendios. Además,

la prevención de incendios frente al cambio climático es un enorme desafío para los países tropicales, especialmente para aquellos ecosistemas propensos a incendios.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por la beca posdoctoral de CO-NACyT a ROCN. Para más detalles dirigirse a la publicación original en Corona-Núñez, R.O., Li, F., & Campo, J. E. (2020). Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles* 34, e2020GB006815, <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>

Referencias

- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmeyer, C., Alvarado, M.J., Reid, J. S., Karl, T., Crouse, J. D., & Wennberg, P.O. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 4039–4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Alcántara, S., y Arvizu, J. (2019). Gobierno quitó mil 229 millones de pesos a la Comisión Nacional Forestal (Federal government reduced one thousand 229 million pesos to the National Forestry Commission). *El Universal*, Ciudad de México, México. <https://www.eluniversal.com.mx/nacion/politica/gobierno-quito-mil-229-millones-de-pesos-la-comision-nacional-forestal>
- Andreae, M. O. (2019). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(13), 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Corona-Núñez, R.O., Campo, J., & Williams, M., (2018). Aboveground carbon storage in tropical dry forest plots in Oaxaca, Mexico. *Forest Ecology and Management*, (409), 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.014>
- Corona-Núñez, R.O., Li, F., & Campo, J.E., (2020). Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles*, (34), e2020GB006815. <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>
- INECC, 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M. A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K., (2009). Global pyrogeography: The current and future distribution of wildfire. *PLoS One*, 4(4), e5102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>
- Lasslop, G., Hantson, S., Harrison, S. P., Bachelet, D., Burton, C., Forkel, M., Forrest, M., Li, F., Melton, J. R., Yue, C., Archibald, S., Scheiter, S., Arneth, A., Hickler, T., & Sitch, S. (2020). Global ecosystems and fire: multi-model assessment of fire-induced tree cover and carbon storage reduction. *Global Change Biology*, 26(9), 5027–5041. <https://doi.org/10.1111/gcb.15160>
- Leyva, C., (2019). SEMARNAT reconoce recorte de presupuesto a brigadistas para evitar incendios (The Ministry of Environment and Natural Resources recognices a reduction of the fire-fighting-personnel budget). *Excelsior*, Ciudad de México, México. <https://www.excelsior.com.mx/nacional/semarnat-reconoce-recorte-de-presupuesto-a-brigadistas-para-evitar-incendios/1313055>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B., 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330.
- Mendoza-Ponce, A., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83(5), 497–506. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq032>
- Parrington, M. (2019). Did 2019 really bring us an unusual number of wildfires? In: Service/ECMWF, C.A.M. (Ed.).
- Pechony, O., & Shindell, D. (2010). Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107, 19167–19170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003669107>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., van Marle, M. J. E., Morton, D. C., Collatz, G. J., Yokelson, R. J., & Kasibhatla, P. S. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 9, 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Yin, Y., Bloom, A. A., Worden, J., Saatchi, S., Yang, Y., Williams, M., Liu, J., Jiang, Z., Worden, H., Bowman, K., Frankenberg, C., & Schimel, D. (2020). Fire decline in dry tropical ecosystems enhances decadal land carbon sink. *Nature Communications*, 11, 1900. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15852-2>

Hacia un sector de transporte bajo en carbono en México¹

Jorge M. Islas-Samperio², Fabio Manzini³, Genice K. Grande-Acosta⁴

Resumen

A nivel mundial, el sector transporte es el segundo mayor contribuyente de emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) debido al uso de energía, por lo que es recomendable que todos los países implementen políticas públicas ambiciosas para descarbonizar este sector. En México, el sector transporte genera también la mayor parte de las emisiones de GEI (31 %). Se presentan dos escenarios para el sector transporte mexicano, un escenario tendencial (ET) y un escenario bajo en carbono (EBC). En el EBC se aplican 21 medidas de mitigación de GEI, lo que supera las propuestas de reducción de emisiones de GEI del sector transporte que México presentó en su Contribuciones Nacionales Determinadas. Como resultado, el EBC propuesto describe una trayectoria de transformación del sector transporte caracterizada por cambios estructurales en la movilidad de carga y pasajeros, nuevas tecnologías de motores eléctricos, uso biocombustibles, señales de precios reales, prácticas y regulaciones de transporte, así como estrategias de planeación urbana, que en conjunto logran una reducción acumulada de 3,166 MtCO_{2e} en un período de 25 años, generando un beneficio neto global de 240,772 millones de dólares y una reducción de emisiones de GEI del 56 % en 2035, con relación al ET.

Palabras clave: Cambio climático; escenario bajo en carbono; sector transporte; medidas de mitigación de GEI; análisis costo-beneficio

Abstract

Considering that the world transport sector is the second largest contributor of global greenhouse gas (GHG) emissions due to energy use and the least decarbonized sector, it is highly recommended that all countries implement ambitious public policies to decarbonize this sector. In Mexico transport sector generates the largest share of greenhouse gas emissions, in 2014 it contributed with 31.3 % of net emissions. Two original scenarios for the Mexican transport sector, a no-policy baseline scenario (BLS) and a low carbon scenario (LCS) are constructed. In the LCS are applied 21 GHG mitigation measures, which far exceeds the proposals for reducing transport sector GHG emissions that Mexico submitted in its National Determined Contributions. As a result, the proposed LCS describes a sector transformation path characterized by structural changes in freight and passenger mobility, new motor technologies for mobility, introduction of biofuels, price signals, transportation practices and regulations, as well as urban planning strategies, which altogether achieve an accumulated reduction of 3,166 MtCO_{2e} in a 25 years period, producing a global net benefit of 240,772 MUSD and a GHG emissions' reduction of 56 % in 2035 from BLS values.

Key words: Climate change; low-carbon scenario; transportation sector; GHG mitigation measures; cost-benefit analysis

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Islas-Samperio, J. M., Manzini, B., & Grande-Acosta, G. K. (2020). Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico. *Energies*, 13, 1-27. <https://doi.org/10.3390/en13010084>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Jorge Islas y que fue premiado dentro de la Categoría 3 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, México. Correo: jis@ier.unam.mx

³ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, México. Correo: fmp@ier.unam.mx

⁴ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, México. Correo: gkga@ier.unam.mx

Introducción

A escala global, el sector transporte es el segundo emisor de gases de efecto invernadero (GEI). En 2014, este sector contribuyó con el 21 % de las emisiones mundiales de GEI provenientes del uso de energía (World Research Institute [WRI], 2017). El rápido crecimiento de las emisiones de GEI del sector del transporte mundial ha sido impulsado por el autotransporte, que aumentó un 71 % entre 1990 y 2016, y representó el 75 % de las emisiones totales del sector en 2016 (International Energy Agency [IEA], 2016b). Se prevé que este sector generará 10,317 millones de toneladas de CO_{2e} (MtCO_{2e}) para el año 2040, lo que representaría un crecimiento del 38 % respecto a sus emisiones de GEI en 2014 (International Energy Agency [IEA], 2016a).

México se ubicó en el 2014 como el undécimo emisor en el mundo, debido a la quema de combustibles fósiles, generando el 1.6 % de las emisiones globales, equivalentes a 422 MtCO_{2e}, de los cuales el 78 % provienen de los sectores de transporte y energía (electricidad y combustibles fósiles) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018b). El sector transporte contribuyó con el 31.6 % de las emisiones totales de GEI, seguido de la generación eléctrica con el 23.1 %.

La preocupación por el problema de las crecientes emisiones del sector de transporte mexicano ha dado lugar a algunos estudios de reducción de emisiones de GEI en este sector (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2008; Johnson *et al.*, 2009; Solís & Sheinbaum, 2016; INECC, 2018a). Esos estudios consideran medidas de mitigación, tales como el uso de vehículos eléctricos e híbridos, biocombustibles como etanol y biodiésel, y medidas de gestión y prácticas para el uso eficiente de la energía, tales como la implementación de normas de eficiencia y el incremento del uso del ferrocarril para transporte de carga y de los sistemas de autobuses rápidos de transporte público.

En el año 2015, México firmó el Acuerdo de París (Gobierno de la República, 2014), en el cual nuestro país se obliga, teniendo el año 2030 como meta no condicionada, a reducir sus emisiones nacionales en 22 %, y como meta condicionada (lo que implica una mayor inversión foránea y transferencia de tecnología) de reducción de GEI el 36 %, en relación con una línea base oficial de emisiones de GEI. Con esta medida, en el año 2030 las emisiones de GEI podrían ser del orden de 762 MtCO_{2e}; adicionalmente, se alcanzaría en el año 2026 un pico máximo de emisiones. En las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) de México, el sector transporte está obligado a alcanzar el 18 % de reducción de emisiones de GEI en el año 2030 como una meta no condicionada, en torno a su línea base oficial de emisiones, la cual representa una reducción

de 48 MtCO_{2e}. En este trabajo se presenta la construcción de un escenario ambicioso, pero factible para establecer un sector transporte mexicano bajo en carbono, mediante la integración de 21 medidas de mitigación de GEI, mostrando con ello que es posible aumentar la ambición de las NDC en el sector de transporte.

Situación actual del sector transporte mexicano

El consumo de energía del sector transporte en México incrementó a una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 4.4 % entre 1965-2014, consumiendo 2,246 PJ en 2014, lo que representa el 45.9 % del consumo final de energía a nivel nacional. El transporte carretero representó el 91.3 % de todo el consumo de energía del sector; el transporte aéreo el 6 %, el marítimo el 1.3 %, el ferroviario el 1.2 % y el eléctrico el 0.2 %. Por tipo de combustible, la gasolina fue el energético más consumido, representando el 65 % de la energía total del sector transporte, seguido del diésel con el 27 %, el keroseno con el 6 %; mientras que el gas licuado de petróleo (GLP) con el 1.76 %, la electricidad con el 0.2 %, en tanto que el gas seco en conjunto con el combustóleo apenas el 0.04 % (Secretaría de Energía [SENER], 2015). El número de vehículos ha incrementado con una TMCA de 5.9 % entre 1995-2014, totalizando 38 millones de vehículos al final de ese periodo. Los vehículos privados contabilizaron el 67.2 % del total, seguido por los camiones de carga con el 26.9 %, las motocicletas con el 6 % y los autobuses de pasajeros con el 0.9 %, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018). Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes del transporte carretero han incrementado con una TMCA de 2.4 % entre 1990-2014, alcanzando 153.5 MtCO_{2e} al final del periodo, con 71.7 %, debido a la quema de gasolinas, el 25.5 % por el diésel y 2.5 % por el GLP. Por tanto, el transporte carretero a gasolina es responsable del 67 % de las emisiones de GEI del sector transporte, en el cual, específicamente, el transporte de pasajeros contribuye con el 38 % y los camiones de carga con el 29 % (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018b).

Metodología general

Con el objetivo de proyectar hacia el futuro las tendencias históricas encontradas en el parque de autotransporte carretero, de su consumo de combustibles y de sus emisiones de GEI, se asumió el año de 2010 como año de referencia, dado que para ese año fue posible obtener toda la información necesaria, en especial, los datos de la flota vehicular del transporte carretero por tipo de vehículo y su curva de supervivencia, lo cual facilitó la construcción del escenario tendencial (ET) a partir del 2011 hasta el año 2035. Para la estimación del consumo de gasolina y diésel, que son los

combustibles más utilizados, se utilizó un modelo de evolución del parque de vehículos de transporte de pasajeros y de carga por carretera, basado en datos de la flota vehicular y de su curva de supervivencia. Para el resto de los combustibles, queroseno, el combustóleo, electricidad, gas natural (GN) y gas licuado de petróleo (GLP), se utilizaron los supuestos con los que la Secretaría de Energía elaboró sus estudios prospectivos (Secretaría de Energía [SENER], 2011a, 2011b). Una vez estimado el consumo energético, mediante factores de emisión oficiales, se calculan las emisiones de GEI de cada uno de los combustibles.

Para la construcción de un escenario futuro alternativo, llamado *Escenario de Bajo Carbono (EBC)* se identificaron 21 medidas de mitigación que abarcan desde cambios tecnológicos, sustitución de combustibles, cambios estructurales, mejoras regulatorias, señales de precios reales hasta estrategias de planeación urbana. Cada escenario fue simulado primeramente en Excel y, más tarde, los resultados energéticos fueron exportados al *software Long-Range Energy Alternatives Planning System (LEAP)* (Heaps, 2008), para obtener la energía y las emisiones de GEI en ambos escenarios. Con el fin de comparar ambos escenarios se realizó un análisis costo-beneficio y se calculó la viabilidad económica del EBC asumiendo los precios nivelados de los combustibles representativos, durante el periodo 2010-2035.

Construcción del Escenario Tendencial (ET)

La Tabla 1 muestra la estructura de la flota vehicular del sector transporte carretero de México en el año de referencia 2010 y 2035, así como la evolución del rendimiento energético y los km recorridos anualmente por tipo de vehículo. La demanda de energía (gasolina o diésel) por tipo de vehículo se estimó considerando la estructura vehicular, la evolución de la edad del parque vehicular, las ventas anuales de vehículos nuevos nacionales e importados, la introducción de autos extranjeros usados, los factores de supervivencia del parque vehicular, el consumo de combustible de los vehículos y la distancia media anual recorrida por cada tipo de vehículo. El lector puede consultar los datos duros y los supuestos para la estimación de la evolución de estos parámetros en la siguiente referencia (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

En cuanto a otros combustibles que se utilizan para el transporte en México, como el GN, el GLP, el combustóleo, la turbosina y la electricidad, su consumo en el ET se estimó, como ya se mencionó, siguiendo las prospectivas oficiales de consumo de cada uno de estos combustibles en el sector transporte (Secretaría de Energía [SENER], 2011a, 2011b). Finalmente, las emisiones de CO₂ se estimaron considerando los siguientes factores de emisión en tCO_{2e} por TJ (Terajoule) para cada tipo de combustible (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2006): gasolina, 68.6; diésel, 73.3; GLP, 62.7; GN, 55.8; combustóleo, 72.5, y turbosina, 72.5.

Tabla 1. Estructura del parque vehicular por tipo de combustible en 2010 y evolución de la eficiencia energética y kilómetros recorridos por tipo de vehículo 2010-2035 (Islas-Samperio *et al.*, 2020)

Tipo de vehículo	Número de vehículos en 2010	Rendimiento energético		Kilómetros recorridos	
		2010	2035	2010	2035
	Millones	(km/lit)		(km/año)	
Compactos (gasolina)	5.7	7.0	9.0	11,290	14,964
Subcompactos (gasolina)	4	9.6	15.1	11,052	15,626
Lujo y deportivos (gasolina)	2.1	6.7	8.7	11,964	15,631
SUV (gasolina)	2.2	5.5	7.1	12,378	15,804
Camionetas (gasolina)	7	5.5	5.9	12,218	15,229
Vehículos pesados de carga (VP-C) (diésel)	0.5	3.3	7.7	65,557	49,977
Vehículos pesados de pasajeros (VP-P) (diésel)	0.3	3.3	7.4	55,438	41,096
Total	21.8	--	--	--	--

Construcción del Escenario de Bajo Carbono (EBC)

En la Tabla 2 se presentan las 21 medidas de mitigación propuestas en el EBC. Estas medidas se clasifican en tres importantes grupos: las que favorecen el aumento de la eficiencia energética, las que utilizan biocombustibles y las que

introducen nuevas tecnologías utilizando motores eléctricos. El lector puede encontrar mayor información sobre la descripción, datos duros técnicos y económicos, así como de los supuestos más específicos para las 21 medidas de mitigación en Islas-Samperio *et al.* (2020).

Tabla 2. Descripción y supuestos de las opciones de mitigación del EBC para el sector transporte en México (tabla de elaboración propia).

Opción de mitigación	Descripción y supuestos
Eficiencia energética	
Normas de rendimiento de combustible en vehículos ligeros	Considera la implementación de normas de eficiencia energética para los vehículos ligeros nuevos que aumenta el rendimiento de combustible en un 5 % anual, a partir del tercer año hasta el séptimo. En años posteriores se asume como mejora inercial un crecimiento de desempeño promedio anual de 2.3 %
Normas de rendimiento de combustible en vehículos pesados de carga (VP-C)	Se propone un estándar de eficiencia que mejora el rendimiento energético de los VP-C en un 20 % al quinto año, asumiendo un incremento anual de 4 % a partir del 4°. al 8°. año. Se asume como mejora inercial anual promedio del 2.5 % a partir del octavo.
Precio de gasolina sin subvenciones	Con el propósito de alcanzar un precio de gasolina que refleje costos reales, se asumen incrementos anuales precio de la gasolina del 5 % sobre la inflación durante los primeros once años, entre 2011 y 2022, luego el precio de la gasolina se mantiene constante hasta el último año del período analizado. Bajo este supuesto, se logra una reducción del 17 % en la intensidad energética.
Verificación y restricción de la circulación en las principales 20 zonas metropolitanas y 5 zonas metropolitanas fronterizas	El objetivo de esta medida es la implementación de programas de inspección y mantenimiento, con restricción de tránsito para vehículos altamente contaminantes en las 20 ciudades mexicanas con mayor flota vehicular y también en las cinco zonas metropolitanas de la frontera con Estados Unidos de América.
Aduana vehicular ambiental en la frontera	Esta medida tiene como objetivo establecer un programa de inspección vehicular en la frontera para evitar la importación de aquellos vehículos que no cumplan con la regulación nacional de emisiones.
Optimización de rutas de transporte público en zonas urbanas	La medida consiste, de acuerdo al Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFO-NAVIT, 2011), en que la optimización de las rutas del transporte público se traduce, por un lado, en una reducción del 20 % de la flota de autobuses urbanos en las grandes ciudades (superior a un millón de habitantes (Secretaría de Desarrollo Social [SEDESOL], 2012)); este proceso se inicia en el segundo año del periodo de análisis y la meta se alcanza paulatinamente en el año 2030. Y, por otro lado, en una reducción del transporte público en un 44 % en las ciudades medianas, entre 500 mil y 1 millón de habitantes (SEDESOL, 2012) para el 2030.
Introducción de autobuses híbridos	Se considera el objetivo de que los autobuses híbridos sean el 15 % del parque vehicular total de autobuses de pasajeros en ciudades medianas y grandes para el 2035, así como el 30 % de los nuevos autobuses para el año 2035 (Centro de Transporte Sustentable [CTS], 2013). Se asume que el rendimiento de combustible será un 30 % superior al de los autobuses convencionales (Macías <i>et al.</i> , 2007).
Sistemas eléctricos de transporte público	Esta medida promueve los sistemas de transporte público eléctrico (metro y tranvía) para reducir las emisiones y el ruido. De acuerdo al Centro de Transporte Sustentable (CTS, 2013), en las ciudades más grandes y más contaminadas de México: Guadalajara, Monterrey y el Área Metropolitana de la Ciudad de México se desarrollan los trenes subterráneos, y en el resto del país se promueve la extensión de la red de tranvías. Se estima que a partir del segundo año se construirían un total de 2.6 km por año en las tres ciudades mencionadas. En el caso de los tranvías, se inicia con 89 vagones en 2012 llegando a 960 en 2035 (CTS, 2013).

Sistema de bicicletas públicas	Esta medida consiste en que el 0.6% de los viajes anuales realizados por autos privados, autobuses, taxis y nuevos viajes, se realizan en bicicleta. Comienza en el segundo año y progresivamente se incrementará hasta alcanzar el 3% en el sexto año, a partir del cual se mantendrá un 3% de estos viajes totales anuales a viajes en bicicleta por el resto del período (CTS, 2013).
Sistemas de transporte rápido confinado (BRT)	Esta medida consiste en la inclusión de autobuses de gran capacidad (100 pasajeros) que circulan en corredores con carriles confinados en las avenidas de las principales ciudades del país. Se propone un aumento gradual de la extensión de los corredores BRT, de 130 km en el año de referencia a 650 km en 2035. El 15% de los pasajeros del sistema BRT dejó de usar su vehículo privado y el otro 85% cambió de usar el transporte público convencional a BRT que es más eficiente.
Programa federal de transporte de carga limpio	Se propone que, a nivel federal, todos los vehículos de carga nuevos estén obligados, a través de una norma, a incorporar tres tecnologías para mejorar el rendimiento de los vehículos (Environmental Protection Agency [EPA], 2010): i) mejora en la aerodinámica para lograr un aumento de eficiencia del 6.9%; ii) mejora en la tecnología de inflado de neumáticos, con lo que se logra un aumento de eficiencia del 2%; y iii) la instalación de una unidad de potencia auxiliar para aire acondicionado cuando el vehículo no está en movimiento (energía independiente del motor del camión), lo que reduce en un 75% el consumo de energía para este uso.
Desarrollo urbano orientado al transporte sustentable (DOTS)	Se asume que las políticas de desarrollo urbano pueden lograr una mejora promedio del 30% en cada uno de los siguientes cuatro indicadores urbanos aplicados a los nuevos desarrollos urbanos: densidad de población, índice de usos mixtos del suelo, empleos por vivienda y balance empleo-trabajadores, de acuerdo a un estudio realizado para tres ciudades de México (CTS, 2011). También se asume que las nuevas políticas urbanas afectan solo a las nuevas viviendas y los nuevos patrones de viaje de la población.
Sistemas ferroviarios de carga	Esta medida supone el fomento de trenes y la reducción del uso de otros modos de transporte por carretera menos eficientes. Se asume que la red ferroviaria crece a razón de 450 km/año con base en datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT, 2007).
Integración de empresas de transporte de carga	En esta medida se emprenden dos acciones: en primer lugar, se integran las empresas de transporte para mejorar la logística de los viajes, considerando que el 36.8% del total de viajes de carga son en vacío (CTS, 2013). En segundo lugar, se supone que los programas de formación en conducción ecológica para conductores ahorran combustible en los viajes (una reducción del 15% en el consumo de diésel en 10 años, debido a la capacitación de los conductores (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010).
Biocombustibles líquidos	
Etanol de caña de azúcar	Esta opción considera al etanol, producido a partir de la caña de azúcar, como un sustituto parcial de la gasolina mezclando hasta un 10% (en volumen) de la gasolina, que es un etanol ampliamente utilizado para mezclas en todo el mundo (Chen <i>et al.</i> , 2012).
Etanol de sorgo grano	Esta medida considera la sustitución parcial de gasolina por etanol producido a partir de sorgo en grano, a través de mezclas de gasolina y etanol.
Biodiésel de Jatropha curcas	Esta medida considera la sustitución parcial del diésel por biodiésel producido a partir del aceite de Jatropha curcas.
Biodiésel de palma de aceite	Esta medida considera la sustitución parcial de diésel por biodiésel de palma de aceite, a través de mezclas diésel-biodiésel.
Nuevas tecnologías de motores eléctricos	
Vehículos híbridos eléctricos (VHE)	Esta medida promueve el uso de vehículos híbridos eléctricos (VHE), lo que aumenta la eficiencia del uso de combustible hasta en un 50%, según McKinsey Global Institute (2011). Los VHE, en México, alcanzarán el 35% de las ventas de vehículos nuevos para el año 2035.
Vehículos híbridos eléctricos enchufables (VHEE)	Esta medida considera una penetración de vehículos híbridos eléctricos enchufables (VHEE), a partir de una función logística llegando al 40% de saturación en el número de vehículos ligeros vendidos en 2035.
Vehículos eléctricos a baterías (VEB)	Esta medida consiste en que la penetración de vehículos eléctricos alimentados por baterías (VEB) llega al 10% de saturación del número de vehículos ligeros nuevos vendidos en 2035.

Resultados

Escenario Tendencial (ET)

La Figura 1 muestra los resultados de la proyección del parque vehicular mexicano en el ET, como puede verse, se triplica para el año 2035, alcanzando 67.3 millones de vehículos (MV): las camionetas pasan de 6.8 MV en 2010 a 18.3 MV; los autos compactos pasan de 5.5 a 17.4 MV; los SUV van de 1.9 a 11.9 MV; los subcompactos van de 4.1 a 9.9 MV y los autos de lujo van de 1.9 a 9.8 MV. Los autobuses de pasajeros aumentan de 0.2 a 2.6 MV y los camiones pesados de carga de 0.3 a 3.6 MV.

El consumo de energía continúa con el predominio de la gasolina y el diésel, que representan el 65 % y el 27 %, respectivamente, del consumo total de energía en este sector; y los requerimientos de energía suman 5,879 PJ en 2035, lo que representa un aumento del 253 % en comparación con 2010. En tanto que las emisiones de GEI alcanzarán un total de 415.1 MtCO_{2e} al 2035, un aumento del 259 % con respecto al 2010, de las cuales el 63 % y el 28 % provienen de gasolina y diésel, respectivamente.

Escenario de Bajo Carbono (EBC)

La Figura 2 muestra la evolución del stock de vehículos en la EBC, como se puede observar el volumen total alcanza casi los 70 millones de vehículos en el año 2035, 3.7 millones de vehículos menos que en el ET.

Además, existe un cambio tecnológico importante en el EBC, hacia el año 2035 el 29 % (20.1 millones de vehículos) son a base de nuevas tecnologías (electricidad), el 44 % (30.7 millones de vehículos) utilizan mezclas con biocombustibles,

y el resto, el 27 % (18.9 millones vehículos), permanecen con tecnologías convencionales.

Con respecto al consumo de energía del EBC, la gasolina y el diésel aportan el 51.4 % y el 16.4 % del consumo total de energía, respectivamente, seguidos en menor medida por la turbosina con un 11.1 %; el etanol de caña de azúcar con 9.8 %; la energía eléctrica con 3.3 %; el GLP con el 3.1 %; etanol de sorgo con 1.2 %; y el biodiésel de Jatropha con 1.0 %. El combustóleo y el GN aportan 0.18 % y 0.04 %, respectivamente. Para el año 2035, los requerimientos energéticos del sector transporte suman 3,468 PJ en el EBC, lo que representa una reducción del 41 % con respecto al ET.

La Figura 3 muestra los resultados de las reducciones en todo el periodo de análisis de GEI en el escenario EBC. En cuanto a las medidas de eficiencia energética, las señales de precios reales de la gasolina es el que más contribuye con 571 MtCO_{2e}, seguido de la integración de las empresas de transporte con 415 MtCO_{2e}; la aduana ambiental vehicular en la frontera con 259 MtCO_{2e}; sistemas ferroviarios de carga con 236 MtCO_{2e}; programa federal de transporte limpio con 226 MtCO_{2e}; DOTS con 210 MtCO_{2e}; norma de rendimiento para vehículos ligeros con 120 MtCO_{2e}; estándar de desempeño para vehículos de carga con 116 MtCO_{2e}; optimización de rutas de transporte público con 98 MtCO_{2e}; verificación y restricción de tráfico en las principales 20 zonas metropolitanas y cinco zonas metropolitanas fronterizas con 17 MtCO_{2e}; sistema de bicicletas públicas con 9 MtCO_{2e}; BRT con 5 MtCO_{2e}; introducción de autobuses híbridos con 5 MtCO_{2e} y, finalmente, sistemas eléctricos de transporte público con 3 MtCO_{2e}.

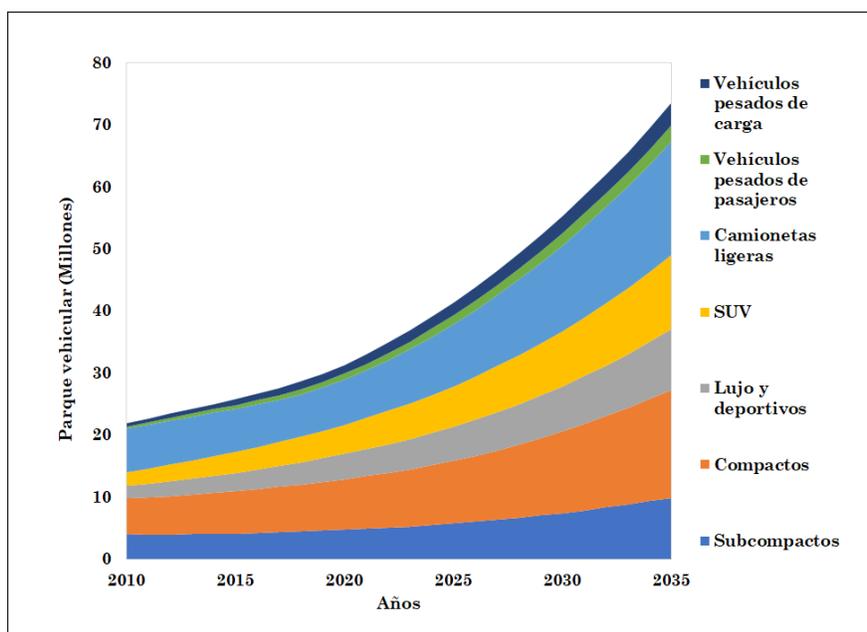


Figura 1. Evolución del parque vehicular mexicano en el ET (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

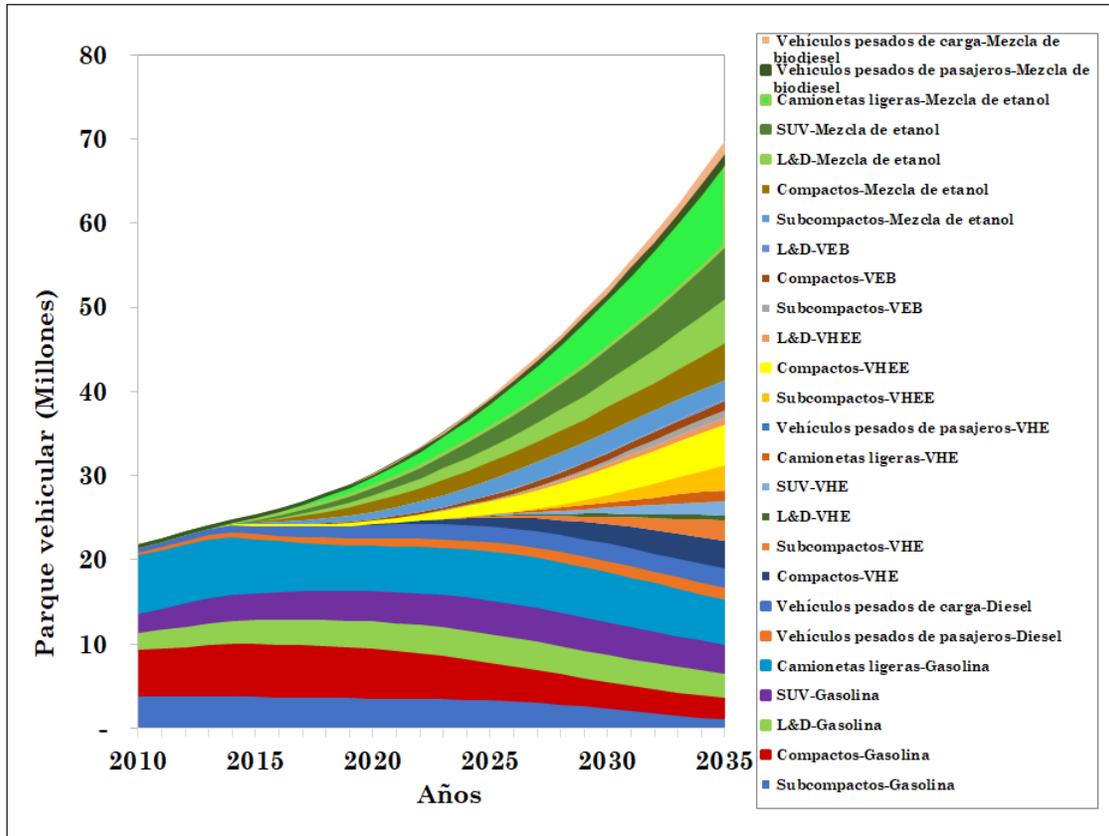


Figura 2. Evolución del parque vehicular mexicano en el Escenario Bajo en Carbono (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

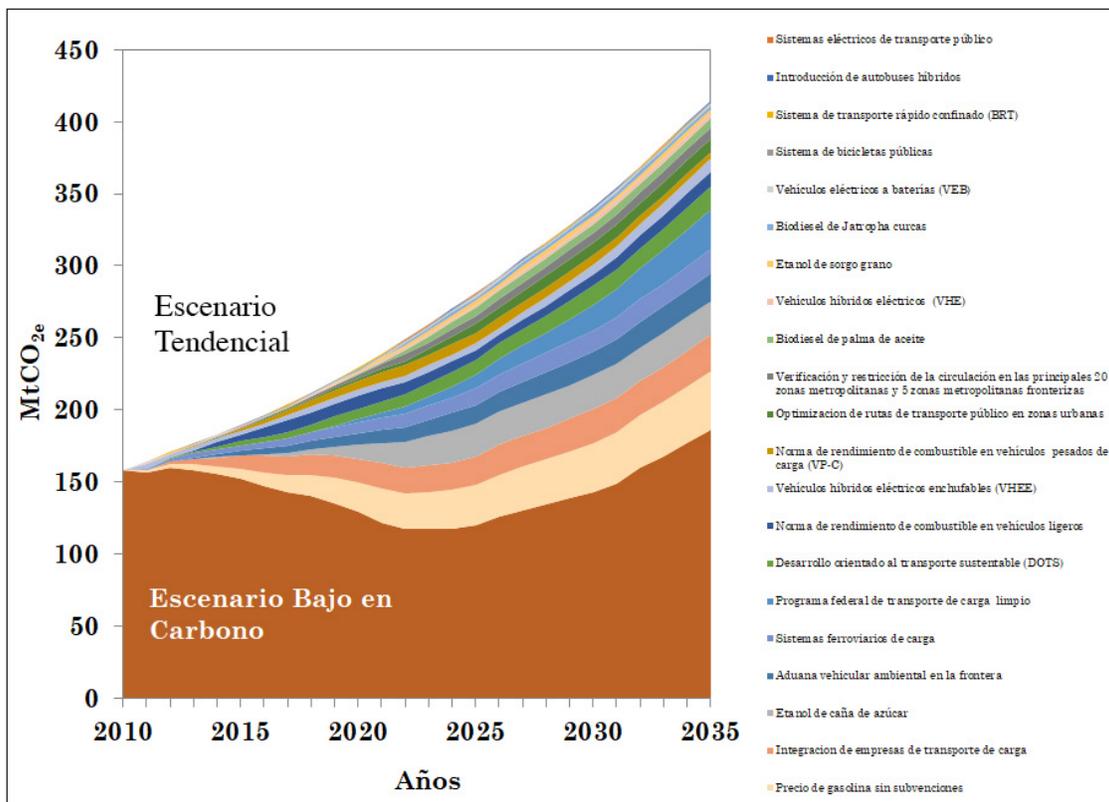


Figura 3. Reducción anual en las emisiones de GEI por opción de mitigación en el EBC (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

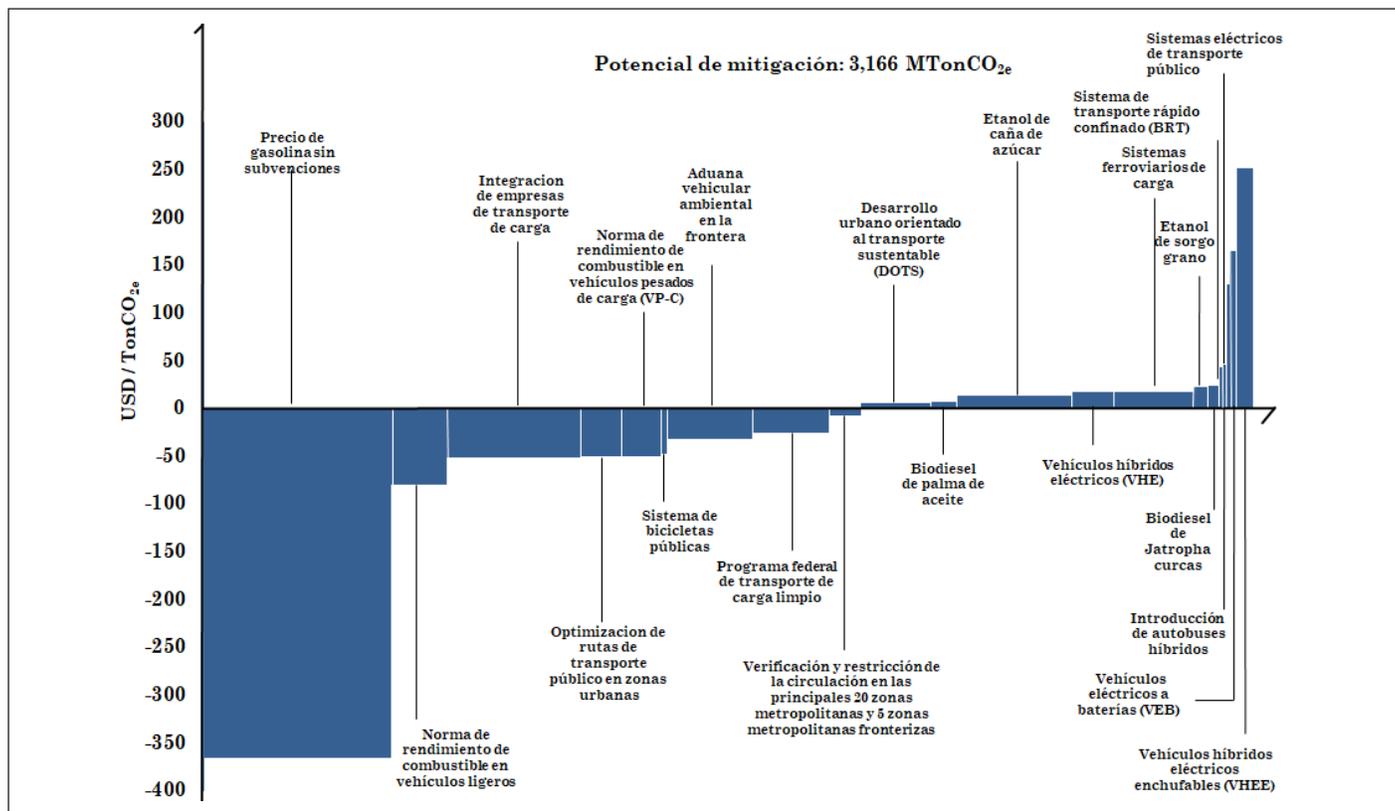


Figura 4. Curva de costos de reducción de GEI para el sector transporte en México (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

En cuanto al uso de biocombustibles, el que más reduce GEI es el etanol de caña de azúcar con 355 MtCO_{2e}, seguido del biodiésel de palma de aceite con 82 MtCO_{2e}; etanol de grano de sorgo con 43 MtCO_{2e}; y biodiésel de Jatropha curcas con 35 MtCO_{2e}.

En relación con las nuevas tecnologías de motores eléctricos, el VHE reduce las emisiones de GEI en 127 MtCO_{2e}, seguido del VHEE con 45 MtCO_{2e}; y, finalmente, el VEB con 23 MtCO_{2e}.

En resumen, el total acumulado de las emisiones evitadas en el período de análisis asciende a 3,165.9 MtCO_{2e} en el EBC, lo que representa un potencial de mitigación total del 46.3 %, en comparación con las emisiones del ET. En 2035, se mitigan 229 MtCO_{2e}, lo que corresponde a una reducción de emisiones de GEI del 59.3 % con respecto al ET.

Las 21 medidas estudiadas representan de acuerdo al análisis costo-beneficio, un costo de inversión de 64,504 millones de dólares (MUSD), un costo de mantenimiento de 42,817 MUSD y un ahorro de combustible de 173,376 MUSD. Se deduce un ahorro importante estimado en 240,772 MUSD y costos de mitigación de -366 a 252 USD/tCO_{2e}. Finalmente, el potencial de mitigación acumulado es de 3,166 MtCO_{2e}.

La Figura 4 presenta la curva de costo de reducción de las opciones de mitigación analizadas y, a su vez, indica

una ruta a seguir para la implementación de dichas medidas basadas, principalmente, en aquellas que no tienen costos, pero sí un gran potencial de reducción de emisiones de GEI, lo que podría indicar una ruta viable de una transición hacia un sector de transporte bajo en carbono.

Conclusiones

En este trabajo se propuso un Escenario Bajo en Carbono (EBC) para el sector transporte mexicano a través de la integración de 21 medidas de mitigación de GEI. Como resultado, tenemos un EBC que describe un camino de transformación de tal sector caracterizado por cambios estructurales en la movilidad de pasajeros y carga, uso de nuevas tecnologías de movilidad con motores eléctricos, introducción de biocombustibles, señales de precios reales y cambios en las prácticas de transporte, regulaciones de emisiones y planeación urbana.

El análisis económico y ambiental de la implementación conjunta y paralela de las medidas de mitigación seleccionadas muestra, en el año 2035, beneficios acumulados por -240,772 MUSD, un costo promedio de mitigación de -76.0 USD/tCO_{2e}, y un valor acumulado de reducción de emisiones de GEI de 3,166 MtCO_{2e} (equivalente a una reducción de emisiones de GEI acumuladas de 46.3 %, en comparación con

el ET, una reducción anual promedio de 126.7 MtCO₂ y una reducción de emisiones de GEI del 59.3 %, en relación con ET en el año 2035). Creemos que el portafolio de medidas de mitigación de GEI, analizado en este artículo, ayudará a México y a otros países del mundo a establecer transiciones energéticas más robustas, ambiciosas y rápidas, con el fin de limitar las emisiones de GEI en este sector clave, y así contener el cambio climático global. Sin embargo, este artículo muestra que el gran desafío es el costo de inversión que se requiere para lograr esta transición energética en un sector muy intensivo en capital como es el de transporte, como lo demuestra el caso mexicano, donde se necesita una inversión acumulada de 64,326 MUSD, para establecer un sector de transporte bajo en carbono que contribuya a frenar el cambio climático.

Agradecimientos

Ma. de Jesús Pérez Orozco por el apoyo técnico en la simulación de escenarios utilizando el modelo LEAP.

Referencias

- Centro de Transporte Sustentable (CTS) e Instituto de Energías Renovables (IER). (2013). Sector Transporte: Identificación de acciones y medidas de mitigación de GEI. Ciudad de México, México.
- Centro de Transporte Sustentable (CTS). (2011). Hacia ciudades competitivas bajas en carbono. Ciudad de México, Mexico.
- Chen, L., Stone, R., & Richardson, D. (2012). A study of mixture preparation and PM emissions using a direct injection engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends. *Fuel*, 96, 120–130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.070>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2010). Draft Regulatory Impact Analysis: Proposed Rulemaking to Establish Green-house Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles. <http://www.epa.gov/otaq/climate/regulations/420d10901.pdf>
- Gobierno de la República. (2014). Intended Nationally Determined Contribution. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162973/2015_indc_ing.pdf
- Heaps C. (2008). Long-range energy alternatives planning (LEAP) system. [Software version 2008.0.0.33]. Environment Institute: Stockholm, Sweden.
- Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) (2011). Resultados y perspectivas. Programas y acciones de financiamiento al sector de la vivienda. http://www.shcp.gob.mx/ApartadosHaciendaParaTodos/banca_desarrollo/vivienda/5_infonavit_11012011_perspectivas_sector_vivienda.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018a). *Costos de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas de México. Medidas Sectoriales no Condicionadas*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/330857/Costos_de_las_contribuciones_nacionalmente_determinadas_de_Mexico_dobles_p_ginas_.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018b). Inventario nacional de gases y compuestos de efecto invernadero. Tabla del INEGYCEI 1990 - 2015. http://www.inecc.gob.mx/descargas/climatico/INEGCI_2014_EMISIONES_QUEMA_COMBUSTIBLES_FOSILES_1.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Vehículos de motor registrados en circulación. <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est#>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Chapter 2: Stationary combustion. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf
- International Energy Agency (IEA) (2016a). Statistics. Key CO Emissions Trends. Excerpt from: CO₂ Emissions From fuel Combustion. <http://www.iea.org/publications/freepublications/>
- International Energy Agency (IEA). (2016b). World Energy Outlook 2016. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/680c05c8-1d6e-42ae-b953-68e0420d46d5/WEO2016.pdf>
- Islas-Samperio, J. M., Manzini, F., & Grande-Acosta, G. K. (2020). Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico. *Energies*, 13(84), 1–27. <https://doi.org/doi:10.3390/en13010084>
- Johnson, T., Alatorre, C., Romo, Z. & Liu, F. (2009). *México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Macías, J., Martínez, H., & Unal, A. (2007). Bus Technology Analysis. CTS-EMBARQ: Mexico City, Mexico.
- McKinsey Global Institute (2011). Resource Revolution: Meeting the World's Energy, Materials, Food, and Water Needs. [https://www.mckinsey.com/~%7B%7D/media/McKinsey/BusinessFunctions/Sustainability/Our Insights/Resource revolution/MGI_Resource_revolution_full_report.aspx](https://www.mckinsey.com/~%7B%7D/media/McKinsey/BusinessFunctions/Sustainability/Our%20Insights/Resource%20revolution/MGI_Resource_revolution_full_report.aspx)
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) (2007). Programa Nacional de Infraestructura 2007- 2012. <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/ProgramaNacional/pni.pdf>
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2012). Catálogo. Sistema Urbano Nacional 2012. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112772/Catalogo_Sistema_Urbano_Nacional_2012.pdf
- Secretaría de Energía (SENER) (2015). Balance Nacional de Energía 2014. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf
- Secretaría de Energía (SENER) (2011a). Prospectiva de Petrolíferos 2010 - 2025.
- Secretaría de Energía (SENER) (2011b). Prospectiva del Sector Eléctrico 2010-2025.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). *El Cambio Climático en México y el Potencial de Reducción de Emisiones por Sectores*.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2010). Guía del Taller Transportista Eficiente (Cómo ahorrar diésel en el autotransporte). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/210345/Transportista_eficiente.pdf

Solís Ávila, J.C. & Sheinbaum Pardo, C. (2016). Consumo de Energía y Emisiones de CO₂ del Autotransporte en México y Escenarios de Mitigación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 7–23. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v32n1/0188-4999-rica-32-01-00007.pdf>

World Research Institute (WRI) (2017). CAIT Climate Data Explorer 2015. <http://cait.wri.org>

Factores de corrección de metano para estimar emisiones de plantas aerobias de tratamiento de aguas residuales en México¹

Adalberto Noyola Robles²

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es una fuente importante de metano (CH_4), tanto del agua como de los lodos. Entre las metodologías para estimar los inventarios de emisiones de CH_4 de este origen, las más adoptadas son las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), que recomienda factores de emisión por defecto (Tier 1) dependiendo de los sistemas de tratamiento. Las instalaciones de tratamiento pueden emitir CH_4 , debido al gas disuelto en el influente. Este aspecto, no considerado en las directrices del IPCC de 2006, se agregó en la nueva edición de 2019. El objetivo de este trabajo es proponer factores de corrección de metano (MCF) modificados (y nuevos) para estimar las emisiones de CH_4 del tratamiento aerobio, con y sin digestores anaerobios de lodos, enfocados a países intertropicales. Las modificaciones se sustentan en la evaluación *in situ* de las emisiones fugitivas de CH_4 en dos instalaciones en México y en datos de la literatura. Para una planta de tratamiento aerobio centralizada (PTAR) bien operada, se propone un MCF de 0.06. Finalmente, se plantea un cálculo de un solo paso para PTAR con digestores anaerobios, que evita confusiones al seleccionar el MCF, según las pautas del IPCC, Tier 1.

Palabras clave: Biogás; digestión anaerobia; emisiones fugitivas; lodos activados; metano disuelto

Abstract

Wastewater treatment (WWT) may be an important source of methane (CH_4), either from water or from sludge process lines. Among the methodologies for estimating CH_4 emissions inventories from WWT, the more adopted are the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which recommends default emission factors (Tier 1) depending on WWT systems. It has been reported that well managed treatment facilities may emit CH_4 , due to dissolved CH_4 in the influent wastewater. This item, not considered in the IPCC 2006 guidelines, has been added in the refinement of 2019. The aim of this work is to propose modified (and new) methane correction factors (MCF) regarding the current Tier 1 IPCC guidelines for emissions from aerobic treatment systems, with and without anaerobic sludge digesters, focusing on intertropical countries. The modifications are supported on *in situ* assessment of fugitive CH_4 emissions in two facilities in Mexico and on relevant literature data. In the case of well-managed centralized aerobic treatment plant, a MCF of 0.06 is proposed. Finally, a one-step straightforward calculation is proposed for centralized aerobic treatment plants with anaerobic digesters that avoids confusion when selecting the appropriate default MCF based on the Tier 1 IPCC guidelines.

Key words: Biogas; anaerobic digestion; fugitive emissions; muds activated; dissolved methane

¹ Este texto corresponde a una versión resumida de Noyola, A., Paredes, M. G., Güereca, L. P., Molina, L. T., & Zavala, M. (2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review. *Science or the Total Environment*, 639, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>

Esta contribución está basada en el artículo presentado por Adalberto Noyola y que fue premiado dentro de la Categoría 3 del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. Correo: noyola@pumas.ii.unam.mx

Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un elemento indispensable en el control de la contaminación ambiental, la protección de la salud pública y el reúso del agua. Sin embargo, en algunos casos, dependiendo de la tecnología seleccionada y de las prácticas operativas, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pueden ser una fuente importante de gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones de GEI en una PTAR están asociadas al consumo de electricidad cuando esta es producida con combustibles fósiles (se les llama emisiones indirectas de dióxido de carbono, CO_2) y a la producción *in situ* de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O); los dos GEI generados en los procesos biológicos que se llevan a cabo en las PTAR, a pesar de que el metano es el gas que se emite mayormente en ese tipo de instalaciones. El metano es un importante contaminante climático de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés), con un potencial de calentamiento global (GWP) de 29.8 (Forster *et al.*, 2021), siendo 1 el valor de referencia, correspondiente al CO_2 . Por su parte, el óxido nitroso, con un GWP de 273, se presenta solo en sistemas que eliminan nitrógeno (procesos de desnitrificación, los cuales aún son escasos en México). Con base en lo anterior, es de gran relevancia cuantificar las emisiones de CH_4 de las PTAR de forma más precisa, con el fin de evaluar diferentes escenarios y establecer estrategias de mitigación adecuadas para el sector del agua.

Las fuentes de emisiones de CH_4 , en una PTAR, se ubican tanto en la línea de tratamiento de agua como en la de los lodos. En los procesos aerobios convencionales, se asume que la primera no es importante, a menos que la instalación de tratamiento sea mal operada. Sin embargo, existen suficientes datos en la literatura científica que cuantifican emisiones significativas de CH_4 en la etapa de pretratamiento y en los tanques de aeración de PTAR operando adecuadamente. El origen de estas emisiones es el CH_4 disuelto en el agua residual cruda que ingresa a la instalación, además del manejo de lodos, un residuo inevitable del proceso de tratamiento de aguas residuales, que si se estabilizan en digestores anaerobios, se convierten en una importante fuente potencial de emisiones de metano. Los lodos residuales representan entre 20 a 40 % de la materia orgánica que ingresa a una PTAR, dependiendo de las variantes del proceso y la carga orgánica a la que opera el sistema.

En la mayoría de las instalaciones de tratamiento a gran escala, el biogás producido se utiliza en sistemas de cogeneración para provocar calor y electricidad, reduciendo así la energía convencional basada en combustibles fósiles y, al mismo tiempo, evitando las emisiones de CH_4 a la atmósfera, minimizando la huella de carbono del subsector de aguas residuales. El biogás tiene una composición típica

en el intervalo de 60 a 65 % para CH_4 y 35 a 40 % para CO_2 . En toda instalación que maneje biogás, pueden producirse emisiones fugitivas (no intencionales) de CH_4 , como fugas en los digestores anaerobios y en el quemado del gas. Estas emisiones fugitivas representan entre 2 a 10 % de las emisiones totales de metano, además de una pérdida de energía potencial y calor.

Ante la dificultad de realizar mediciones *in situ*, y así estimar las emisiones de CH_4 de las PTAR en los inventarios nacionales de GEI, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) recomienda utilizar factores de emisión predeterminados (Tier 1) cuando se dispone de datos limitados, como en México y la mayoría de los países en desarrollo. Sin embargo, estas estimaciones pueden ser altamente inciertas, debido principalmente a la falta de información confiable sobre la operación del proceso de tratamiento y las condiciones ambientales locales. México, como la mayoría de las economías emergentes, no cuenta con factores de emisión de metano medidos en sus PTAR y, en consecuencia, no se logran estimaciones precisas. En tal situación, la confiabilidad de las estimaciones de emisiones nacionales basadas en las directrices del IPCC para el tratamiento y descarga de aguas residuales de Tier 1 (vol. 5, capítulo 6; IPCC, 2006) está limitada por diferentes aspectos. Al respecto, el IPCC publicó recientemente un nuevo documento que atiende algunas limitantes de la versión anterior (IPCC, 2019). En este caso ya se considera una emisión base de metano, diferente de cero, aún en plantas aerobias bien operadas.

El objetivo de este trabajo fue proponer ajustes a las directrices del IPCC (2006), específicamente para el procedimiento Tier 1, para estimar las emisiones de CH_4 de los sistemas de tratamiento aerobios, con y sin digestores anaerobios de lodos, con énfasis en los países intertropicales.

Metodología

Se realizaron mediciones de emisiones de metano en dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Dulces Nombres en Monterrey (MTY) y Cerro de la Estrella en la Ciudad de México (CDMX). La planta MTY (5,500 L/s; demanda química de oxígeno [DQO] influente 1,116 mg/L; demanda bioquímica de oxígeno [DBO] influente 322 mg/L; eficiencia de remoción de DBO 97 %) está ubicada en el estado de Nuevo León, México (25°44'19"N. 100°4'6"O). La planta de tratamiento CDMX (2,300 L/s; DQO afluente 370 mg/L; DBO 180 mg/L; eficiencia de remoción de DBO del 85 %), está ubicada en la Ciudad de México (19°20'12"N. 99°4'42"W). Ambas PTAR se basan en un arreglo de proceso de lodos activados convencional (tratamiento preliminar, sedimentación primaria, tratamiento secundario, desinfección

de efluentes), pero aplican diferentes prácticas de manejo de lodos. En la planta MTY, el lodo excedente (primario y secundario: 117.300 kg/d de sólidos totales (TS) con 0,64 de fracción volátil) se trata en 5 digestores anaerobios mesófilos (32 °C) (12.300 m³ de volumen cada uno) con 31 % de remoción de sólidos volátiles (SV); el biogás producido (39.608 ± 1.642 N-m³/d, 66 % CH₄) se quema en antorcha, sin recuperación de energía. En la instalación de CDMX, el lodo se descarga (crudo, sin tratar) de regreso al sistema de alcantarillado municipal. El GWP utilizado para convertir metano a CO₂ equivalente fue de 35, de acuerdo a datos de Myhre *et al.* (2013).

La campaña de medición se basó en el Aerodyne Mobile Laboratory (AML), (Aerodyne Research Inc. Billerica, MA, EUA). La campaña de muestreo se limitó a un día por sitio: en MTY (12 de febrero de 2013) y CDMX (1 de marzo de 2013). A pesar de eso, los datos obtenidos *in situ* por otros medios (bitácora) coincidieron adecuadamente con los resultados usando el método de trazador.

Para atender los objetivos de este estudio, el muestreo en campo se centró en las emisiones de metano no contabilizadas (fugas y otras fuentes no controladas). El día del muestreo en el sitio MTY, las condiciones climáticas (viento) no eran favorables, así que las mediciones se centraron en los digestores anaerobios. En este caso, se muestreó un digestor de cinco, ya que este se encontraba a una distancia conveniente del resto de los digestores, lo que permitía una mejor determinación. Este digestor #5, construido más tarde que el resto, pero con un volumen y condiciones de carga orgánica similares, tenía su propia antorcha. En la planta de tratamiento CDMX se muestrearon las emisiones de toda la PTAR, dividiendo el análisis en dos módulos (norte y sur).

Los compuestos gaseosos emitidos se determinaron utilizando el método de trazador, en el que la tasa de emisión de la fuente objetivo se obtiene mediante la medición simultánea en tiempo real de las concentraciones de las especies de interés, y de un trazador de gas seleccionado con una tasa de liberación conocida ubicada en la fuente de emisión. Se utilizó acetileno (C₂H₂) como trazador, debido a su baja reactividad atmosférica y su larga vida atmosférica. El trazador se ubicó cerca de la fuente de emisión seleccionada, y se liberó a un caudal constante determinado con un controlador de caudal másico MKS, previamente calibrado.

Los contaminantes objetivo y el trazador liberado se midieron simultáneamente a favor del viento por los instrumentos a bordo del laboratorio Aerodyne Mobile (AML), utilizando un espectrómetro de absorción diferencial de láser infrarrojo sintonizable (TILDAS) para medir N₂O, CH₄ y un instrumento infrarrojo no dispersivo (NDIR) LiCor 6262 para medir el CO₂. Las calibraciones de estos instrumentos

se realizaron utilizando estándares de gas certificados. Las mediciones se obtuvieron en tiempo real con una frecuencia de muestreo de 1 segundo. Los instrumentos adicionales a bordo del AML incluían un sistema de posicionamiento global (GPS), un anemómetro de viento sónico y una cámara de video.

Resultados y discusión

Evaluación de las emisiones fugitivas de CH₄

El digestor anaeróbico #5 de la PTAR MTY tenía fugas de CH₄, las cuales fueron registradas junto al CO₂ asociado al biogás. Las “plumas contaminantes” detectadas exhibieron tasas de emisión de 192 N-m³CH₄/d y una cantidad muy pequeña de N₂O. La emisión de CH₄ se atribuyó a varias fugas provenientes de juntas en el domo del digestor. Al muestrear el digestor y la antorcha correspondiente, la tasa de emisión de CH₄ se duplica (426 N-m³CH₄/d), debido a la eficiencia de combustión del equipo. Considerando la producción media de CH₄ de este digestor (5220 m³/d, datos extraídos de la bitácora de la instalación), aparentemente, el equipo no quemó el 4.5 % de este gas (95.5 % de eficiencia). Como era de esperar, las emisiones de CO₂ aumentaron considerablemente, a causa de la quema de CH₄, al igual que la aparición de SO₂ y N₂O. Con base en el promedio diario de producción de CH₄, la emisión de CO₂ correspondiente a la quema sería de 4985 m³/d (95.5 % de eficiencia de quema) que, sumado al CO₂ propio del biogás (2690 m³/d), da como resultado un total de 7675 m³/d de emisión biogénica de CO₂ (no contabilizada como GEI) en este punto, muy próxima al valor medio medido *in situ*.

Las emisiones fugitivas de CH₄ (fugas y antorcha) del digestor #5 fueron de 0.111 Gg CH₄/año. Si este resultado se extrapola a los otros 4 digestores (mismo volumen y similares condiciones de operación), aproximadamente el 8 % del metano capturado se emitiría como fugas, de acuerdo al intervalo encontrado en la literatura (2 – 10 %). Estas emisiones fugitivas representan el 1 % de la DBO eliminada por la planta de tratamiento de MTY (0.01 kg CH₄/kg DBO). Si bien es un valor relativamente bajo, destaca la oportunidad de disminuir este porcentaje mediante mejoras de eficiencia en el quemador de biogás, y un mejor mantenimiento en el domo y accesorios relacionados que limiten las fugas al mínimo. Esta acción, además, incrementaría la recuperación de energía y minimizaría el impacto ambiental.

En cuanto a la evaluación de las emisiones fugitivas de CH₄ en la instalación de CDMX, estas se centraron en la línea de agua, puesto que no se cuenta con un digestor anaerobio para tratar los lodos de desecho, los cuales van directamente al drenaje. El CH₄ disuelto que ingresa al sistema se cuantificó en 3.6 a 3.9 mg/L. A esta aportación debe añadirse el

metano producido en las unidades de proceso aguas arriba, principalmente los sedimentadores primarios (CH_4 disuelto al final de un tanque de sedimentación rectangular: 5.0 a 5.2 mg/L).

Con base en el método de trazador, las tasas de emisión se determinaron como 624 y 1154 $\text{N}\cdot\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$ desde los módulos norte y sur, respectivamente. El valor del módulo sur se correlaciona bien con la estimación basada en las emisiones de CH_4 de dos decantadores primarios (cuantificado mediante cámaras estáticas) y en el CH_4 disuelto también en esos tanques ($1071 \text{N}\cdot\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$), suponiendo que el 100 % se desorbe en los tanques de aireación. Considerando ambas cifras, la emisión total de CH_4 de los decantadores primarios y tanques de aireación en la instalación de CDMX fue de 0.464 $\text{Gg CH}_4/\text{año}$ (16 CO_2 eq $\text{Gg}/\text{año}$). Esto da como resultado un factor de emisión de 6.4 $\text{g CH}_4/\text{m}^3$, tratado para esta instalación específica, que corresponde al 1.7 % de la DQO entrante o al 3.6 %, si se expresa como DBO entrante (4.2 % de DBO eliminada).

El factor de emisión de metano obtenido para CDMX (6.4 $\text{g CH}_4/\text{m}^3$) es superior al resultante de aplicar las directrices más recientes del IPCC (IPCC, 2019), que recomiendan (Tier 1) para una planta de tratamiento de lodos activados convencionales bien gestionada, un factor de corrección de metano (MCF, por sus siglas en inglés) de 0.03 (en la edición anterior el valor era cero). Este valor resulta en 4.5 $\text{g CH}_4/\text{m}^3$ (suponiendo una DBO de entrada de 250 g/m^3). Con ello, el IPCC reconoce la aportación del metano disuelto en el influente de la PTAR, un postulado que este trabajo propuso con antelación a la publicación de las nuevas directrices del IPCC.

El mayor factor de emisión registrado en la PTAR CDMX se debe, fundamentalmente, a la aportación adicional de metano que representa la mala operación de los sedimentadores primarios que, al no retirarle los lodos con la frecuencia debida, estos inician su descomposición en el fondo, con la consecuente producción de metano que se suma al que introduce el agua residual cruda.

Propuesta de factores de corrección de metano para PTAR de lodos activados en México y regiones intertropicales

Los inventarios nacionales oficiales de emisiones de efecto invernadero de México, como en muchos otros países, se estiman utilizando las directrices del IPCC con base en valores predeterminados (Tier 1), debido a la falta de datos de actividad específicos. En particular, antes del inventario del 2019, en los inventarios mexicanos se suponía que las plantas de tratamiento aerobio (y como tales, los procesos

de lodos activados) funcionaban de manera eficiente, por lo que el MCF se tomaba como cero (sin emisiones de CH_4). Además, no se hacía distinción entre los procesos de lodos activados por aireación extendida y los convencionales, con o sin digestores anaerobios de lodos. Este enfoque resultaría en una subestimación de las emisiones reales de metano de los procesos de lodos activados, ya que muchas de esas instalaciones no funcionan con el rendimiento esperado (Morgan-Sagastume, 2016).

Un aspecto fundamental para establecer factores de emisión de metano más representativos en aguas residuales, es considerar el CH_4 disuelto como fuente de emisiones en las instalaciones de tratamiento. Diversos estudios de campo han demostrado que la suposición de las directrices del IPCC del 2006 de que los drenajes abovedados (cerrados) no son una fuente de CH_4 no es correcta. Eijó-Río *et al.* (2015) publicaron una revisión de estudios recientes sobre CH_4 , N_2O y H_2S disueltos en sistemas de alcantarillado.

Con base en estas evidencias *in situ*, no se sustenta la suposición de una planta de tratamiento neutra en CH_4 , según lo establecido en la metodología del IPCC en el caso de una planta de tratamiento aeróbico centralizada bien operada (IPCC, 2006). El CH_4 exógeno disuelto que ingresa a la PTAR, se desorberá del desarenador aireado y del tanque de aireación, independientemente de eventuales zonas anaerobias que producirían metano en el sitio.

Factores de corrección de metano de PTAR basados en procesos de lodos activados sin digestión anaerobia de lodos

Para las plantas aerobias centralizadas, la metodología del IPCC del 2006 recomienda un MCF de 0.0 (bien operadas), y de 0.1 en caso de que se produzcan emisiones limitadas producidas en el sitio. Considerando regiones de la zona intertropical, y sustentado en los datos propios y de revisión bibliográfica, la concentración de metano disuelto puede variar entre 1.5 a 30 mg/L, valor que depende, como se mencionó, de la temperatura de las aguas residuales, la concentración de materia orgánica y el tipo de alcantarillado. Se puede fijar un rango conservador entre 5 a 10 mg/L, que se vincula a una concentración de DBO afluente de 244 mg/L (representativa para América Latina, Noyola *et al.* 2012) con un 20 % de remoción de lodo en exceso (S) y R igual a cero (ya que no se consideran digestores) resultará (usando la Ec) en un MCF entre 0.04 y 0.08, si todo el CH_4 entrante se desorbe en la instalación. Por tanto, un MCF de 0.06 puede ser un valor realista para plantas aerobias bien operadas y sin digestión anaerobia de lodos en México y otros países intertropicales, en lugar del 0.0 recomendado por el IPCC

de 2006 basado en el juicio de expertos. Al respecto, en la versión actualizada del 2019, el IPCC reconoce este limitante y actualiza el MCF a 0.03 para estos casos.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = B_o * \text{MCF} (\text{TOW} - S) - R \quad \text{Ec. 1}$$

En esta ecuación B_o es la capacidad máxima de producción de CH_4 ($\text{kg CH}_4/\text{kg DBO}$) de las aguas residuales o lodos (valor por defecto: 0.6); MCF es el factor de corrección de CH_4 (valor predeterminado recomendado); TOW es el total de materia orgánica en las aguas residuales que ingresan a la instalación de tratamiento por año (kg DBO/año); S es el componente orgánico eliminado como lodo por año (kg DBO/año); R es la cantidad de CH_4 recuperada (o quemada) por año ($\text{kg CH}_4/\text{año}$).

Factores de corrección de metano de PTAR basados en procesos de lodos activados con digestión anaerobia de lodos

La metodología del IPCC no es del todo clara en el análisis cuando se consideran lodos de PTAR. La nueva versión introduce una nueva ecuación (ecuación 6.3B en IPCC, 2019) para calcular el parámetro S, que representa la materia orgánica (expresada en DBO) retirada del sistema en forma de lodo en un año. En esta ecuación se incorpora el factor Krem para convertir la masa de lodo en base seca a masa de DBO. Sin embargo, los valores recomendados para Krem, por el IPCC, son 0.8 y 1.16 kg DBO/kg ST para lodos activados convencionales y aireación extendida, respectivamente. Estos representan una importante imprecisión (valores excedidos) y, por ende, conducen a una subestimación de las emisiones de metano. El valor Krem debe situarse entre 0.3 (aeración extendida) y 0.5 (lodos activados convencionales).

Para simplificar el proceso de cuantificación de emisiones de metano en PTAR aerobias con digestión anaerobia de lodos, se propone un cálculo único y no separado por agua y lodos, como suele realizarse en la actualidad. Este procedimiento integrado debe ser una nueva entrada en la Tabla 6.3 de las directrices del IPCC, tanto del 2006 como del 2019, con el MCF correspondiente, sustituyendo la entrada del sistema “Digestor anaerobio para lodos” y el confuso MCF (0.8). Esta nueva entrada representaría a las “Plantas de tratamiento aerobias centralizado con digestión anaerobia de lodos”. El MCF correspondiente se integra considerando dos fuentes: las emisiones del tratamiento de aguas residuales y las de la digestión anaerobia de lodos, y un cálculo de un solo paso, utilizando la misma Ec. 1 existente. El primero (MCFw) ya ha sido presentado (0.06) para instalaciones aerobias centralizadas bien manejadas y sin digestores anaerobios en México y otros países intertropicales. El MCFL

correspondiente a la digestión anaerobia de lodos puede proponerse a partir de los datos reales de la instalación MTY, considerando factores de conversión de 1.42 kg COD/kg VS y 2.4 kg COD/kg DBO , lo que da como resultado un 20 % de TOW como lodo digerido eliminado y una R congruente con el dato de que el 95 % del CH_4 colectado se quema. A esto se le adicionan las emisiones previamente determinadas de los digestores (0.01 $\text{kg CH}_4/\text{kg DBO}$, en relación con la DBO influente). Con estos datos determinados en sitio, el MCFL resultante es 0.26, valor que, sumado al MCFw, integra el MCF propuesto (0.32) para instalaciones aerobias centralizadas y bien operadas con digestores anaerobios de lodos (Tabla 1).

Las modificaciones propuestas al vol. 5, capítulo 6 “Tratamiento y descarga de aguas residuales” (IPCC, 2006 y 2019) deben considerarse como una contribución para mejorar los inventarios nacionales de emisiones de los países intertropicales, cuando se utilizan las directrices de Tier 1 para los procesos de lodos activados por aireación extendida y convencionales con y sin digestión anaerobia de lodos residuales. Como resultado, se puede reducir la incertidumbre en los inventarios de emisiones correspondientes, por lo que se pueden lograr evaluaciones técnicas más respaldadas para identificar acciones de mitigación efectivas en el sector del agua.

Paredes *et al.* (2015) proponen un factor de emisión para “laguna anaerobia profunda” de 0.43 $\text{kg CH}_4/\text{kg DBO}$

Tabla 1. Ajuste propuesto a la Tabla 6.3 de las directrices del IPCC 2006 y 2019 para emisiones de metano PTAR. Las modificaciones se escriben en negrita y cursiva.

Tipo de tratamiento	Comentario	MCF aquí propuesto	IPCC's MCF 2006 2019
Tratamiento aerobio centralizado	La emisión de metano es exógena (entra disuelto en el influente); en plantas mal operadas puede provenir de los sedimentadores primarios.	0.06	0.0 0.03
Tratamiento aerobio centralizado, con digestión anaerobia de lodos	Cálculo en un solo paso. Las emisiones fugitivas de metano están consideradas.	0.32	No existe. Debe ser una nueva entrada en Tabla 6.3.

removido (0.32 – 0.58), como valor representativo para sistemas lagunares municipales en México adecuadamente operados. Con base en las aportaciones de Paredes *et al.* (2015) y Noyola *et al.* (2018) es posible aplicar el Tier 2 en PTAR aerobias en México (responsables del 55 al 70 % del caudal tratado en México) y de sistemas lagunares (10 % del caudal tratado). De esta forma, se aplicaría el Tier 2 a las emisiones de entre 65 y 80 % de las aguas residuales municipales tratadas en México. Este procedimiento lo ha aplicado el INECC para sus inventarios 2019.

Conclusiones

Las mediciones de campo de las emisiones fugitivas de metano mostraron que el 8 % del metano capturado se emitió como fugas de los digestores anaerobios de lodos (incluida la antorcha), lo que representa el 1 % de la DBO eliminada por la instalación de tratamiento aerobio MTY. Con base en la misma evaluación, una instalación de lodos activados (CDMX) sin digestores anaerobios, pero aplicando malas prácticas, emitió el 4.2 % de la DBO removida.

El CH₄ exógeno disuelto en el influente que ingresa a la PTAR, será desorbido del desarenador aireado y del tanque de aireación, lo que invalida la suposición de una planta de tratamiento neutra en CH₄, incluso bien operada. En tales sistemas, se propone un MCF de 0.06, centrándose en los países intertropicales.

Con el fin de simplificar el procedimiento para determinar la emisión de CH₄ del tratamiento aerobio de aguas residuales con digestión anaerobia de lodos, este proceso integrado debería ser una nueva entrada en las directrices del IPCC, con el MCF correspondiente (0.32) presentado en este trabajo.

Finalmente, los MCF propuestos pueden considerarse relevantes tomando en cuenta que la mayoría de los países en desarrollo utilizan valores recomendados en las directrices del IPCC (Tier 1), por lo que sus inventarios nacionales están sesgados con respecto a las emisiones de CH₄ de las instalaciones de tratamiento aerobio.

Referencias

Eijo -Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda M., Marin, D., Amores, M., Aldea, X., & Rieradevall, X. (2015). Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 2084-2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, & H. Zhang (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In 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, and B. Zhou (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 923–1054.

IPCC (International panel on climate change) (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan.

IPCC (International panel on climate change) (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan.

Morgan-Sagastume, J. M. (2016). Evaluación de plantas de tratamiento municipal en México, *Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM México*, 116(1), 12-13. www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Documents/GacetaEnero2016.pdf

Myrhe, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J. F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Noyola A., Padilla A., Morgan J. M., Güereca P., & Hernández F. (2012). Typology of wastewater treatment technologies in Latin America, *CLEAN Soil, Air, Water*, 40(9), 926-932. <https://doi.org/10.1002/clean.201100707>

Noyola A., Paredes M. G., Güereca L. P., Molina L. T., & Zavala M. (2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review, *Science or the Total Environment*, 639, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>

Paredes M. G., Güereca L. P., Molina L. T., & Noyola A. (2015). Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12(2), 179-194. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2015.1110185>

Miembros del jurado del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático



El jurado de cada categoría estuvo integrado por expertos en cambio climático propuestos por los responsables de distintas dependencias de la UNAM. El jurado quedó conformado de la siguiente forma:

Categoría 1: *Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la respuesta del sistema climático a forzantes externos de origen natural y/o antropogénico. Esta categoría incluye clima del pasado, periodo observado y escenarios para el futuro.*

- Dra. Lucía Capra Pedol, *Centro de Geociencias*
- Dra. Telma Castro Romero, *Centro de Ciencias de la Atmósfera*
- Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza, *Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*
- Dr. Eric Morales Casique, *Instituto de Geología*
- Dr. Carlos Gay García, *Centro de Ciencias de la Atmósfera*
- Dr. Francisco Estrada Porrúa, *Programa de Investigación en Cambio Climático*

Categoría 2: *Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sobre los impactos observados o proyectados de este fenómeno y sobre opciones de adaptación al mismo.*

- Dra. Yosune Miquelajáuregui Graf, *Instituto de Ecología*
- Dr. Erick de la Barrera Montpellier, *Instituto de Ecosistemas y Sustentabilidad*
- Dr. Andrés García Aguayo, *Instituto de Biología*
- Dr. Michael McCall, *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental*
- M. V. Z. Carlos Labastida Villegas, *Programa Universitario de Alimentos*
- Dra. María Alejandra Fonseca Salazar, *Coordinación Universitaria para la Sustentabilidad*

Categoría 3: *Estudios teóricos, empíricos o de modelación que hayan contribuido a mejorar el conocimiento sobre emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero, descarbonización, transición energética, política climática y gobernanza.*

- Dra. Rosalía Ibarra Sarlat, *Instituto de Investigaciones Jurídicas*
- Dra. Norma Patricia López Acosta, *Instituto de Ingeniería*
- Dra. Nadia Silvana Santini González, *Instituto de Ecología*
- Dr. Michael McCall, *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental*
- Dr. Erick de la Barrera Montpellier, *Instituto de Ecosistemas y Sustentabilidad*

Sobre las y los autores premiados



Itxaso Odériz Martínez

Es investigadora en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. Es Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Cantabria y obtuvo su máster y doctorado en esta misma disciplina en la Universidad Nacional Autónoma de México. Fue investigadora invitada en el Disaster Prevention Research Institute de la Universidad de Kioto, donde se centró en las proyecciones del oleaje para finales de este siglo.

Su línea de investigación relaciona las dinámicas de clima a gran escala con los procesos costeros en la escala regional y local, analizando variabilidad natural y cambio climático. Su investigación ha sido premiada en varias ocasiones.

Juan Pablo Bernal Uruchurtu

Químico por la Facultad de Química de la UNAM, donde también obtuvo el grado de Maestro en Ciencias – Química Analítica. Obtuvo el doctorado en ciencias de la Tierra por la Universidad Nacional de Australia. Desde el 2003 se incorporó al Instituto de Geología de la UNAM, a partir del 2010 al Centro de Geociencias Campus UNAM – Juriquilla, donde actualmente es Investigador Titular B y co-responsable del laboratorio de estudios isotópicos de dicho Centro. Su línea de investigación está centrada en el uso de estalagmitas para la reconstrucción de la dinámica climática pasada utilizando diversos indicadores geoquímicos, lo que involucra el diseño de metodologías analíticas de alta precisión y exactitud. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II.

Christian Domínguez Sarmiento

Licenciada en ciencias atmosféricas, maestra y doctora en Ciencias de la Tierra. Ha realizado estancias de investigación en la Universidad de Sao Paulo, el Centro de Modelaje Ambiental (EMC, por sus siglas en inglés) de NCEP de la NOAA y en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés) de USA. Actualmente es investigadora del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Su principal interés científico se enfoca en la meteorología tropical, los riesgos hidrometeorológicos y en el uso de modelos numéricos regionales y globales para elaborar pronósticos estacionales y escenarios de cambio climático, considerando la dinámica de los ciclones tropicales y las ondas del este.

Margarita Caballero Miranda

Es egresada de la licenciatura en Biología de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Posteriormente realizó un doctorado en estudios del Cuaternario en Inglaterra y desde 1995 se incorporó como investigadora en el Instituto de Geofísica de la UNAM donde desarrolló el Laboratorio de Paleolimnología. Su línea de investigación se enfoca en el estudio de diatomeas fósiles preservadas en sedimentos lacustres y su uso como indicadores paleoambientales para el estudio del cambio climático durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. En sus trabajos analiza las interacciones entre el cambio climático, las poblaciones humanas, la evolución del paisaje y los ecosistemas acuáticos. Con este fin se ha especializado en el estudio de la taxonomía y ecología de las diatomeas en ambientes lacustres actuales para usar este conocimiento en la interpretación paleoambiental con un enfoque cuantitativo.

Priyadarsi D. Roy

Cursó su licenciatura en Geología en la Universidad de Utkal (India), con mención honorífica en 1997. Posteriormente cursó dos maestrías, una en Geología Aplicada en el Instituto Indio de Tecnología de Roorkee, con mención honorífica, así como la Medalla de la Universidad en 1999; y otra en Ingeniería Geológica, en el mismo instituto en su sede de Kanpur en 2001. Desarrolló su tesis en la Universidad de Karlsruhe como becario del DAAD y allí continuó su formación científica, obteniendo el grado de doctor en Ciencias Naturales con mención honorífica en 2004. Después de las estancias posdoctorales en el Laboratorio de Investigación en Física (India) y en el Instituto de Geofísica (UNAM), actualmente se desempeña como Investigador Titular en el Instituto de Geología de la UNAM y ha sido galardonado en 2016 con el Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos en Investigación en Ciencias Naturales de la UNAM.

Gemma Abisay Ortiz Haro

Actualmente es Candidata a Doctora en Ciencias de la Sostenibilidad, por la UNAM. Es Licenciada en Biología por la Facultad de Estudios Superiores Iztacala de la UNAM. Maestra en Ciencias en el Instituto de Biología de UNAM. Cuenta con un Diplomado en Derecho y Gestión Ambiental en el Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales, A.C. Cuenta con siete años de experiencia en administración y ejecución de proyectos de monitoreo y evaluación ambiental en sistemas acuáticos y terrestres. En los últimos años ha desarrollado y evaluado proyectos con enfoque social y en desarrollo sostenible en socioecosistemas del sur del país. Actualmente participa en proyectos vinculados al desarrollo de herramientas y propuestas de vías de adaptación sostenible ante efectos del cambio climático. Su línea de investigación se enfoca a entender los procesos de vulnerabilidad y adaptación históricos, actuales y futuros de las comunidades rurales y de los

sistema agrícolas ante efectos de variabilidad y cambio climático, a través de un enfoque participativo con las poblaciones de las comunidades.

Alma Virgen Mendoza Ponce

Bióloga por la Universidad Nacional Autónoma de México, con maestría en ciencias biológicas en esa misma universidad. Ella posee un Máster en Conservación y Manejo de Especies en Tratado Internacional (CITES) por la Universidad Internacional de Andalucía y un doctorado en Ciencias Ambientales y Atmosféricas por la Universidad de Edimburgo. Además, realizó una estancia postdoctoral en el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) y finalizó una segunda estancia posdoctoral en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Actualmente, ella participa en un proyecto PRONACES del Programa de Investigación sobre Cambio Climático (PINCC) de la UNAM.

Ek del Val de Gortari

Es investigadora del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM en Morelia. Estudió biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM y el doctorado en ecología en el Imperial College of Science en Reino Unido. Sus intereses de investigación buscan entender cómo se modifican las interacciones bióticas por las actividades antropogénicas, proponer estrategias de restauración ecológica que consideren las interacciones bióticas y contribuir con soluciones agroecológicas para la producción de alimentos. Está muy interesada en la divulgación de la ciencia, en particular en compartir con la sociedad la importancia de los insectos.

Julián A. Velasco

Julián Velasco es Investigador Asociado nivel C del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México. Su investigación está enfocada en entender el papel del clima actual y del pasado en la generación de biodiversidad usando diferentes enfoques de modelación ecológica a diferentes escalas espaciales y temporales. En particular está interesado en evaluar cómo los gradientes geográficos de diferentes facetas de la biodiversidad están siendo afectados por el cambio climático y políticas de acción climática. Hasta la fecha ha publicado 49 artículos científicos, siete capítulos de libro y ocho libros. Es miembro del SNI, nivel 1, desde el 2017.

David A. Prieto Torres

Es biólogo, especializado en estudios de macro-ecología y biogeografía de la conservación de los ecosistemas en el Neotrópico. Obtuvo su título de Doctor en el Instituto de Ecología (INECOL, A.C.) y actualmente es Profesor Asociado "C"

de T.C. en la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (FESI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Angela Nava Bolaños

Es bióloga por la UNAM. Durante sus estudios de posgrado investigó, en la maestría, los patrones de evolución genital de libélulas, y en el doctorado, la hibridación como consecuencia del cambio climático. El artículo reseñado en este capítulo nace de su tesis doctoral. Ha realizado dos posdoctorados, en la Universidad de Kansas y en la Facultad de Ciencias de la UNAM, investigando los patrones de biodiversidad de los polinizadores de México y del mundo, el impacto del cambio climático en dichos patrones, e identificando áreas prioritarias para su conservación. Ha impartido el curso de Evolución y Ecología Evolutiva. Cuenta con 16 publicaciones científicas y ha dirigido tesis de licenciatura y posgrado. Con su investigación desea salvaguardar a las especies de los principales riesgos antropogénicos que enfrentan en la actualidad.

Rogelio Omar Corona Núñez

Es Postdoctor en el Instituto de Ecología de la UNAM, Doctor en Ciencias Atmosféricas y Cambio Global por la Universidad de Edimburgo, UK, y Maestro en Ciencias Biológicas por la Universidad Nacional Autónoma de México. Después de una estancia en Suiza en el WSL se enfocó en rubros ambientales así como en la modelación matemática del manejo de recursos naturales. Su especialidad por la Biología Ambiental así como su preparación continua sobre temas ambientales, consultoría ambiental y gestión de recursos han facilitado su desarrollo en el campo del desarrollo sustentable, planificación territorial y evaluación de servicios ecosistémicos. Tiene experiencia coordinando amplios grupos de profesionales, investigadores y comunidades como parte de los diversos trabajos de consultoría e investigación realizados en los últimos años. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Jorge Marcial Islas Samperio

Es Físico y Maestro en Ingeniería Energética por la UNAM y Doctor en Economía Aplicada por la Universidad Pierre Mendès France. Es investigador Titular B, Coordinador del Grupo de Planeación Energética en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER UNAM) y Consejero Social de la Coordinación de Evaluación de la Política Nacional de Cambio Climático y miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2. Fue Gestor Científico del Área de Energía del Programa Iberoamericano CYTED así como Jefe del Departamento de Sistemas Energéticos, Secretario Académico y Coordinador de Posgrado en el IER UNAM. Su investigación se centra en la Transición Energética, Energía y Mitigación del Cambio Climático y Economía de las Energías Renovables.

Adalberto Noyola Robles

Ingeniero Ambiental por la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (1976-1980). Maestría y doctorado en Ingeniería (tratamiento de aguas residuales) en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (INSA) de Toulouse, Francia (1981-1985). Actualmente es investigador titular C en el Instituto de Ingeniería UNAM y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel 3. Durante 8 años (2008-2016) fue director del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ha sido presidente de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A.C de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C. y de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Se le ha otorgado la Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos (UNAM) 1991 y el Premio Universidad Nacional (UNAM) 2020, entre varios reconocimientos. Actualmente es el Director del Centro de Estudios Mexicanos UNAM-China.

Convocatoria apoyada por:



Centro de Geociencias
Una visión interdisciplinaria y moderna de las Ciencias de la Tierra



