



RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

Coordinadores:

Juan Manuel Rodríguez Esteves
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Ma. Lourdes Romo Aguilar
Ana Cecilia Travieso Bello

551.55 Rodríguez Esteves, Juan Manuel (coord.)
R63 Riesgo de desastres en México: eventos hidrometeorológicos y climáticos /
Juan Manuel Rodríguez Esteves... *et al.*, coordinadores. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano
de Tecnología del Agua, 2018.
440 p.

ISBN 978-607-8629-03-9 (Obra digital)

1. Hidrometeorología 2. Desastres naturales 3. Riesgos ambientales 4. México

Coordinadores:

Juan Manuel Rodríguez Esteves
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Ma. Lourdes Romo Aguilar
Ana Cecilia Travieso Bello

Edición:

Gema Alín Martínez Ocampo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Diseño:

Gema Alín Martínez Ocampo

Ilustración de portada:

Oscar Alonso Barrón

Primera edición: 2018

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México
www.imta.gob.mx

REDESClim

Centro de Ciencias de la Tierra
Calle Francisco J. Moreno 207
Col. E. Zapata
CP 91090, Xalapa, Ver.
México
<http://www.redesclim.org.mx/>

ISBN 978-607-8629-03-9 (Obra digital)

Fotografías de entrada de capítulo:

<https://pixabay.com/es/>

A excepción del capítulo 2: Tornado. Cortesía de Ivan Camilo Henao.

Las opiniones, datos y citas presentados en esta obra son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan, necesariamente, los puntos de vista de la institución que edita esta publicación.

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los coordinadores.

Hecho en México

CONTENIDO

PRÓLOGO	9
<i>Verónica Bunge Vivier</i>	
INTRODUCCIÓN	13
<i>Juan Manuel Rodríguez Esteves, Carlos Manuel Welsh Rodríguez, Ma. Lourdes Romo Aguilar y Ana Cecilia Travieso Bello</i>	
Sobre esta obra	20
Datos y Monitoreo	20
Diagnóstico, Vulnerabilidad y Riesgos	23
Referencias	26
1. Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades costeras: Playa del Carmen, caribe mexicano	29
<i>Oscar Frausto Martínez ; Aidé Beatriz Vázquez Sosa; Orlando Colín Olivares; María Luisa Hernández Aguilar ; Lucinda Arroyo Arcos; David Velázquez Torres</i>	
1.1. Resumen	29
1.2. Introducción	30
1.3. Los indicadores	31
1.4. Indicadores de resiliencia urbano costera	34
1.5. Materiales y métodos	36
1.6. Metodología	38
1.7. Resultados	40
1.8. Discusión	49
1.9. Conclusiones	52
1.10. Agradecimiento:	53
1.11. Referencias	53
2. Análisis espacio temporal y perspectivas de tornados en México	59
<i>José Francisco León-Cruz; Noel Carbajal; Luis Felipe Pineda-Martínez</i>	
2.1. Introducción	60
2.2. Los tornados en México	62
2.3. Resultados	64
2.4. Resultados	71
2.5. Conclusiones	78
2.6. Agradecimientos	79
2.7. Referencias	79
3. Desastres asociados a ciclones tropicales en la Costa Occidental de México: 2011-2015	83
<i>Luis M. Farfán; Blanca Natalia Castillo Bautista; Jorge Luis Vázquez Aguirre</i>	
3.1. Resumen	83
3.2. Introducción	84
3.3. Objetivo	87
3.4. Materiales y métodos	87
3.5. Resultados y discusión	89
3.6. Manuel (13-19 septiembre, 2013)	93
3.7. Odile (10-18 septiembre, 2014)	95
3.8. Patricia (20-24 de octubre, 2015)	98
3.9. Pronósticos oficiales	100
3.10. Conclusiones	102
3.11. Agradecimientos	104
3.12. Referencias	104

4. Métodos para la generación y organización de bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas de clima extremo, bioclima y cambio climático en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México	109
<i>Agustín Fernández Eguiarte; Carolina Ivonne Castelán Hernández; Ángel Valentín Bautista Durán; Rosa Irma Trejo Vázquez; Jorge Zavala Hidalgo; Rosario Romero Centeno</i>	
4.1. Resumen	109
4.2. Introducción	110
4.3. Estaciones climatológicas y control de calidad. Períodos 1921-2010 y 1961-2000	114
4.4. Bases de datos climáticas. Períodos 1921-2010 y 1961-2000	116
4.5. Parámetros bioclimáticos. Período 1921-2010	117
4.6. Climatología extrema en el período 1921-2010	118
4.7. Escenarios de cambio climático regionales	119
4.8. Forzamientos radiativos y horizontes a futuro	120
4.9. Promedios mensuales de escenarios de cambio climático. Horizonte 2015-2039	121
4.10. Porcentajes mensuales de cambio climático. Horizonte 2015-2039	122
4.11. Conclusiones	123
4.12. Agradecimientos	124
4.13. Referencias	124
5. El balanceo de las lluvias ¿mecanismo oscilatorio natural que explica las sequías en el altiplano mexicano y las lluvias abundantes en la costa de Nayarit?	127
<i>Luis Brito-Castillo; José Pablo Vega-Camarena; Luis M. Farfán; Luis Felipe Pineda-Martínez</i>	
5.1. Introducción	128
5.2. Ocurrencia de sequías	131
5.3. Índices climáticos asociados a sequías	132
5.4. Metodología	134
5.5. Divergencia y convergencia	136
5.6. Mapas compuestos de anomalías de viento, humedad específica y divergencia	137
5.7. Resultados	137
5.8. Modelo conceptual	144
5.9. Conclusiones	145
5.10. Agradecimientos	146
5.11. Referencias	146
6. Comparación del uso de datos meteorológicos observados y procesados en malla en la simulación hidrológica de eventos extremos en una cuenca en México	153
<i>Juan Alberto Velázquez Zapata; Edgar Talledos Sánchez</i>	
6.1. Resumen	153
6.2. Abstract	154
6.3. Introducción	155
6.4. Materiales y métodos	158
6.5. Resultados y Discusión	161
6.6. Conclusiones	168
6.7. Agradecimientos	169
6.8. Referencias	170
7. Modelación numérica para la prevención de riesgos meteorológicos en el estado de Veracruz	175
<i>Jorge Humberto Bravo Méndez; Saúl Miranda Alonso</i>	
7.1. Resumen	175
7.2. Introducción	176
7.3. Antecedentes	177
7.4. Objetivo	178
7.5. Metodología	178

7.6.	Visión general del sistema de pronóstico operativo	180
7.7.	Dominios del Modelo	181
7.8.	Arquitectura del sistema	182
7.9.	Implementación operativa	184
7.10.	Ejecución de la implementación	184
7.11.	Mantenimiento y soporte del sistema	185
7.12.	Resultados	185
7.13.	Huracán Categoría 1 Franklin 2017	187
7.14.	Huracán Categoría 1 Katia 2017	194
7.15.	Desarrollo actual y trabajo por hacer	202
7.16.	Separación del preproceso	202
7.17.	Aumento en tiempo de pronóstico	202
7.18.	Cómputo en la nube	202
7.19.	Conclusiones	203
7.20.	Referencias	203
ANEXO 1		204
8.	Variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta, Jal., México Surface temperature variability in Puerto Vallarta, Jal., Mexico	207
	<i>Fátima Maciel Carrillo-González; Antonio Velázquez-Ruiz;</i> <i>Julio Cesar Morales-Hernández; Virginia Martínez Hernández</i> <i>y Héctor Javier Rendón Contreras</i>	
8.1.	Resumen:	207
8.2.	Introducción	208
8.3.	Materiales y métodos	210
8.4.	Resultados y Discusiones	214
8.5.	Conclusiones	219
8.6.	Agradecimientos	219
8.7.	Referencias	220
9.	Evaluación de la concentración de partículas pm10 en la zona urbana de Puerto Vallarta, Jalisco, y su relación con los fenómenos atmosféricos Evaluation of the concentration of particles pm10 in the urban zone of Puerto Vallarta, Jalisco, and his relation with the atmospheric phenomena	223
	<i>Julio Cesar Morales Hernández; Fabiola Ponce Pelayo;</i> <i>Víctor Manuel Cornejo López; Fátima Maciel Carrillo González</i>	
9.1.	Resumen	223
9.2.	Abstrac	224
9.3.	Introducción	225
9.4.	Área de estudio	227
9.5.	Materiales y métodos	229
9.6.	Resultados	230
9.7.	Relación sistemas atmosféricos – concentración de PM10	233
9.8.	19 de febrero punto Ixtapa	233
9.9.	31 de marzo punto Aurora	236
9.10.	Conclusiones	238
9.11.	Recomendaciones	239
9.12.	Agradecimientos	240
9.13.	Referencias	240
10.	Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales el caso de dos ciudades del estado de yucatán	243
	<i>Marcelino García Benítez; Salvador Adame Martínez; Roberto A. Sánchez Rodríguez</i>	
10.1.	Resumen	243
10.2.	Introducción	245
10.3.	Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales	247
10.4.	Materiales y métodos	249
10.5.	Procesamiento de los indicadores	256

10.6.	Escenarios de cambio climático en la península de Yucatán	258
10.7.	Resultados	260
10.8.	Discusión	264
10.9.	Conclusiones	267
10.10.	La gestión local ante la vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales	268
10.11.	Agradecimiento	269
10.12.	Referencias	269
11.	Vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal asociada a la variabilidad climática	275
	<i>Arturo Álvarez Bravo; Víctor Antonio Vidal Martínez; José Irán Bojórquez Serrano</i>	
11.1.	Resumen	275
11.2.	Abstract	276
11.3.	Introducción	277
11.4.	Materiales y métodos	280
11.5.	Resultados y discusión	283
11.6.	Caracterización de las fases del ENSO y el rendimiento	287
11.7.	La vulnerabilidad del maíz de temporal	288
11.8.	Conclusiones	288
11.9.	Agradecimientos	289
11.10.	Referencias	290
12.	Desastre y vulnerabilidad: el caso de dos localidades veracruzanas afectadas por el huracán Karl y la tormenta tropical Matthew	295
	<i>Ana Cecilia Travieso Bello ; Carlos Manuel Welsh Rodríguez ; Carolina Andrea Ochoa Martínez</i>	
12.1.	Resumen	295
12.2.	Introducción	296
12.3.	Huracán Karl y tormenta tropical Matthew	298
12.4.	Materiales y métodos	299
12.5.	Resultados y discusión	302
12.6.	Análisis de la vulnerabilidad	305
12.7.	Percepción sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos	308
12.8.	Conclusiones y recomendaciones	309
12.9.	Referencias	311
13.	La historia ambiental como herramienta en el manejo de riesgo de inundación: el caso de Ensenada, Baja California, México	315
	<i>Carlos Figueroa Beltrán; Alejandro García Gastelum</i>	
13.1.	Resumen	315
13.2.	Introducción	316
13.3.	El surgimiento de la historia ambiental	318
13.4.	Aportaciones de la historia ambiental	319
13.5.	La historia ambiental en el manejo integral del riesgo ambiental (mira)	320
13.6.	La historia ambiental en el manejo del riesgo por inundaciones	321
13.7.	Materiales y métodos	322
13.8.	Resultados	324
13.9.	Conclusiones	327
13.10.	Agradecimientos	328
13.11.	Referencias	328
14.	Caracterización hidrogeomorfológica de geofomas kársticas epigeas y amenaza de inundación en el estado de Campeche	331
	<i>A. Gerardo Palacio Aponte; Óscar Frausto Martínez</i>	
14.1.	Resumen	331
14.2.	Introducción	332
14.3.	Antecedentes	334

14.4.	Tipología e intensidad inferida de la susceptibilidad a la inundación	338
14.5.	Materiales y métodos	340
14.6.	Resultados	345
14.7.	Conclusiones para la prevención de riesgos y desastres	350
14.8.	Referencias	352
15.	El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas	355
	Daniel González Correa; Rocío Becerril-Piña; Carlos A. Mastchi-Loza;	
	<i>Mónica Cervantes Jiménez; Aurelio Guevara Escobar; Ma. de Lourdes Romo Aguilar;</i>	
	<i>Enrique González Sosa</i>	
15.1.	Introducción	356
15.2.	Marco teórico, modelo Shetran	357
15.3.	Materiales y métodos	358
15.4.	Evaluación de los cambios de uso del suelo	361
15.5.	La precipitación y el escurrimiento en las cuencas	362
15.6.	Análisis de sensibilidad de parámetros	364
15.7.	Simulación de escenarios futuros	366
15.8.	Resultados y discusión	367
15.9.	Importancia de la resolución tamaño de pixel en la modelación hidrológica	368
15.10.	Modelación de escenarios retrospectivos con los eventos del 01, 10 y 17 de septiembre de 2015	370
15.11.	Reconstrucción del escenario 1986 y 2001 en la microcuenca San José	370
15.12.	Reconstrucción del escenario 1986 y 2015 en la microcuenca Amazcala	372
15.13.	El escenario en 2050 de las cuencas periurbanas de San José y Amazcala	374
15.14.	Conclusiones y recomendaciones	376
15.15.	Referencias	378
16.	La problemática de las casas anglo-caribeñas en Chetumal, Quintana Roo, frente a las amenazas climáticas	381
	<i>Joel Francis Audefroy; Bertha Nelly Cabrera Sánchez; Edith Montesinos Pedro</i>	
16.1.	Resumen	381
16.2.	Introducción	382
16.3.	La historia de la población de Payo Obispo.(Chetumal).	383
16.4.	Los riesgos hidrometeorológicos en una ciudad costera: Huracanes, inundaciones y hundimientos.	389
16.5.	Tipología de las casas anglo-caribeñas, patrimonio cultural de Chetumal	396
16.6.	Discusión	400
16.7.	Agradecimientos:	402
16.8.	Referencias	402
17.	Comportamiento de los índices de vegetación del cultivo de vid para producción de vino de mesa y los periodos de sequía en el Valle de Guadalupe, B. C.	405
	<i>Magdaleno Esquer Sheila Soraya; García Gastélum Alejandro;</i>	
	<i>Hallack Alegría Michelle; Seingier Georges</i>	
17.1.	Resumen	405
17.2.	Introducción	406
17.3.	Materiales y Métodos	410
17.4.	Resultados y discusión	413
17.5.	Conclusión	420
17.6.	Referencias	421
18.	CONCLUSIONES	423
	Índice Figuras	429
	Índice Cuadros	437

EL BALANCEO DE LAS LLUVIAS ¿MECANISMO OSCILATORIO NATURAL QUE EXPLICA LAS SEQUÍAS EN EL ALTIPLANO MEXICANO Y LAS LLUVIAS ABUNDANTES EN LA COSTA DE NAYARIT?

Luis Brito-Castillo^{1*}; José Pablo Vega-Camarena^{2*}; Luis M. Farfán³; Luis Felipe Pineda-Martínez⁴

Resumen

El Altiplano Mexicano (AM) y la costa occidental del Pacífico mexicano (COPM), son regiones conectadas mediante un mecanismo de balanceo donde intervienen las lluvias. Lluvias abundantes en el AM corresponden a lluvias deficientes en la COPM y viceversa. Una circulación anti-ciclónica posicionada sobre el continente en la troposfera media, con centro en el sur de Estados Unidos y norte de México, se asocia a condiciones secas sobre el AM, al mismo tiempo que se asocia a entrada de humedad a nivel del mar y formación de tormentas en la COPM donde se observan lluvias por arriba de lo normal. Por el contrario, una circulación ciclónica en la troposfera media sobre el norte de México se asocia a lluvias abundantes en el AM y a lluvias deficientes en la COPM. El patrón de flujo atmosférico a su vez está relacionado a la convergencia y divergencia de humedad. Por ejemplo, la convergencia de humedad en la troposfera media sobre el AM, se asocia a divergencia a nivel de la superficie que favorece días soleados y secos. Este arreglo de convergencia en altura-divergencia en superficie de humedad en el AM (indicador de sequía) se acompaña de un arreglo opuesto en la COPM, es decir de divergencia en altura-convergencia en superficie (indicador de con-

1 E-mail: lbrito04@cibnor.mx

2 E-mail: jcamarena@pg.cibnor.mx

3 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, La Paz, B.C.S., México, E-mail: farfan@cicese.edu

4 Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México, E-mail: luisfpm23@gmail.com

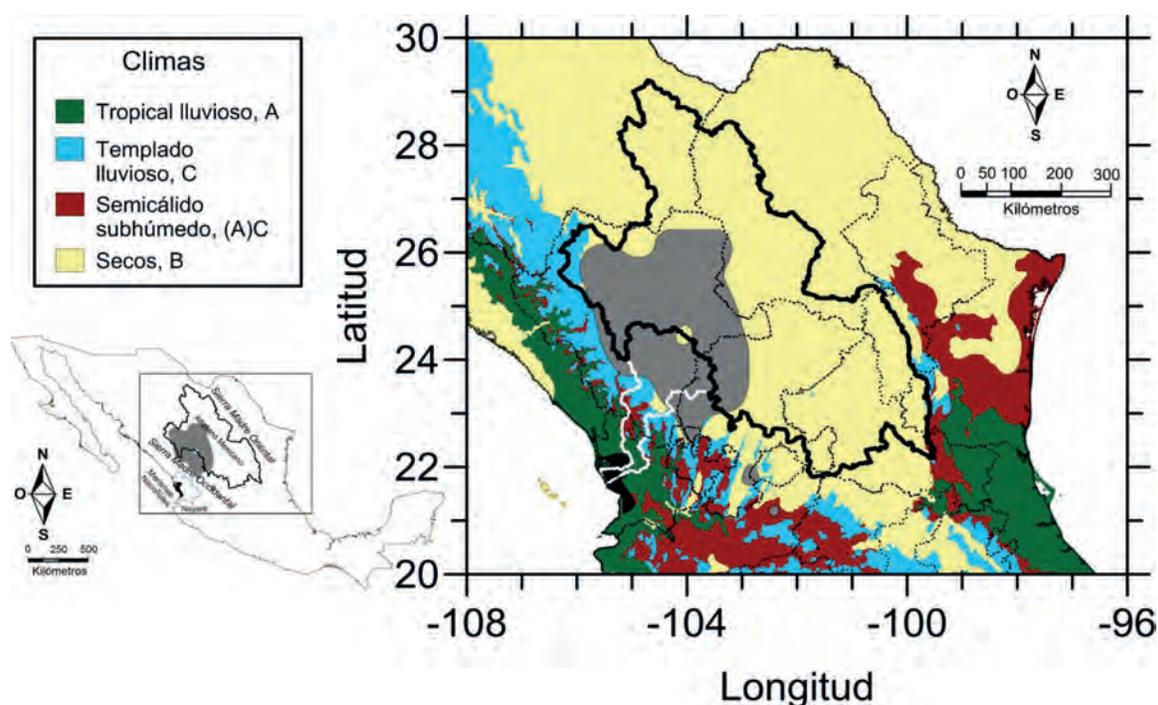
* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Guaymas, Sonora, México.

diciones favorables para la convección en superficie y lluvias en exceso). En este trabajo describimos con mayor detalle estas configuraciones para explicar si las sequías en el AM tienen relación con las lluvias abundantes en la COPM y viceversa.

Palabras clave: Altiplano, sequía, anomalía climática, convergencia, divergencia

5.1. Introducción

El Altiplano Mexicano (AM) es una región flanqueada por dos macizos montañosos orientados en dirección NO-SE, la Sierra Madre Oriental hacia el este y la Sierra Madre Occidental hacia el oeste en un recorrido perimetral que alcanza cerca de 4,670 km de extensión (Gráfica 5.1).



Gráfica 5.1. Localización del Altiplano Mexicano (AM) y la Costa Occidental del Pacífico Mexicano (COPM), frente a las costas de Nayarit (mapa pequeño), y tipos de climas presentes en toda el área (mapa grande). En el mapa grande, las líneas cortadas indican los límites estatales y en línea blanca se muestra el contorno de la cuenca del río San Pedro Mezquital. Las áreas sombreadas en ambos mapas son representativas del AM (gris) y la COPM (negro) resultado de un análisis de Funciones Empíricas Ortogonales aplicado a 174 series de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

La presencia de ambos macizos montañosos actúan como barreras físicas que bloquean gran parte de la humedad que proviene del Pacífico y del Golfo de México por lo que los climas predominantes en esta región son del tipo B, secos y semisecos, con una precipitación media anual de unos 500 mm. En el norte y en el extremo suroriental de la región las condiciones son semicálidas con temperaturas medias entre 18 y 22 °C, mientras que en el resto del AM son templadas con temperaturas medias entre 12 y 18 °C con excepción del extremo occidental, en lo alto de la SMOc, donde las condiciones son semifrías, con temperaturas medias entre 5 y 12 °C. La elevación media del terreno en esta llanura es de unos 1600 m.s.n.m. La mayoría de los escurrimientos en esta región son intermitentes y drenan hacia el interior del continente en una superficie que abarca los 243,500 Km². En toda su extensión el AM comprende porciones de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Jalisco.

En los estados de Durango y Zacatecas, existen extensas áreas de cultivo de granos como el frijol (INEGI, 2013) y el maíz (SAGARPA, 2003, 2014), por lo que forman parte de la principal región de producción de frijol en México, que incluye además a los estados de Aguascalientes y Chihuahua en el Centro-Norte del País cuya producción en su conjunto representa el 47% de la producción nacional. En esta región, casi toda la cosecha se cultiva durante la primavera y el verano, que dura de abril a septiembre (Rincón *et. al.*, 2004). Ledesma-Mares y Ramírez-Miranda (1994) consideran que esta región tiene importancia internacional en términos de provisión de alimentos nacionales e internacionales. Por lo tanto, un evento de sequía intenso o muy prolongado sobre esta región se traduce en altos costos a la economía nacional (Acosta-Díaz *et. al.*, 2009; Pineda-Martínez *et. al.*, 2007).

La costa occidental del Pacífico Mexicano (COPM), situada en la boca del Golfo y que cubre gran parte del norte de Nayarit y sur de Sinaloa, es una región húmeda y calurosa que presenta un clima del tipo A, tropical lluvioso, donde la precipitación media anual supera los 1000 mm y las temperaturas medias anuales se encuentran en un rango de 22 a 26 °C con una pequeña porción frente a las Islas Marías donde las temperaturas medias anuales superan los 26 °C. Esta región es particularmente interesante debido a la ocurrencia de tormentas entre los meses de junio y septiembre

favorecida por un mar cálido y somero frente a las costas de Nayarit, y viento superficial del oeste suroeste que arrastra la humedad hacia el interior. El máximo de lluvia en esta región se presenta en el mes de agosto y se observa en una amplia región hacia el interior del continente (Brito-Castillo *et. al.*, 2010), lo que hace suponer que las fuerzas que propician el desarrollo de las tormentas en la costa también favorecen las lluvias hacia el interior transportando la humedad incluso hasta la región del AM. Se ha sugerido que la posible ruta para este transporte, por donde la humedad debe atravesar cañones de gran profundidad, llegar hasta la cima del macizo montañoso y cruzarlo hacia el AM aún en forma de lluvia, se encuentra dentro de la cuenca del río San Pedro-Mezquital (Brito-Castillo *et. al.*, 2010) que domina y conecta la costa con el AM (Gráfica 5.1). Los estados de Durango, Zacatecas y Nayarit comparten la cuenca del río San Pedro-Mezquital, el séptimo río más caudaloso de México cuyas aguas fluyen de manera natural ya que no existen presas que regulen su tránsito. Este río nace en la Sierra del Mezquital, donde debe su nombre inicial, en el sur de Durango; desciende hacia el sureste atravesando una gran porción del AM para después cruzar las montañas de la SMOc hacia el suroeste irrigando los valles tropicales de Nayarit y desembocando en el Océano Pacífico tras 540 km de recorrido. El cauce principal con sus numerosos afluentes, las laderas y todo el territorio cuyas aguas escurren hacia el cauce principal forman una inmensa cuenca que cubre una extensión de 25,800 km². Las elevaciones de la cuenca van desde el nivel del mar en la desembocadura hasta picos de cerca de 3 km de altura en la zona montañosa y cañones que superan los 2 km de profundidad en la parte media. Lo interesante de este río, como ya se dijo, es que se origina en la región del AM y en su curso atraviesa la SMOc. En su desembocadura aporta el mayor volumen de agua dulce a la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, compuesta de lagunas costeras salobres, bosques de mangle, pantanos, deltas y marismas que en su conjunto representan entre 15 y 20 % del total de ecosistemas de manglares existente en México (CONANP, 2013).

En la región del AM hay frecuentes periodos de sequía, gran variabilidad estacional de la precipitación (Seager *et. al.*, 2009), y tendencia hacia una menor oscilación diurna de la temperatura (Brito-Castillo *et. al.*, 2009). Aquí subsiste una agricultura de temporal en la que Durango y Zacatecas contribuyen con el mayor valor comercial de frijol en México (INEGI, 2013). Como en otras regiones semiáridas del mundo la variabilidad

de las lluvias en el AM es alta pero su falta prolongada puede llegar a causar efectos negativos en la economía nacional. Uno de los rasgos de esa variabilidad se refleja en una respuesta opuesta en la costa, donde períodos de lluvias cuantiosas se corresponden con períodos intensos o prolongados de sequía en el AM y viceversa. En este trabajo describimos el mecanismo que produce el balanceo en las lluvias entre el AM y la COPM. Este conocimiento puede resultar muy útil para mejorar el pronóstico estacional de las lluvias en el AM, lo que a su vez puede ayudar a reducir el riesgo de pérdidas económicas en esta región, asociadas principalmente a las sequías.

5.2. Ocurrencia de sequías

La sequía es un evento que se caracteriza por un déficit muy marcado en las condiciones de humedad, donde la oferta de agua es menor a la demanda (procesos biológicos, actividades productivas, abastecimiento a la población). Es considerado el desastre natural más costoso en la historia causando pérdidas anuales a nivel global de unos 6-8 mil millones de dólares americanos (Wilhite, 2000). Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2012) en el período 2000-2012, los registros de declaratoria por desastres relacionadas con sequía en México ocuparon el tercer puesto después de las declaratorias relacionadas con lluvias intensas y ciclones tropicales causando cientos de millones de pesos en pérdidas. En la literatura se reconocen 4 tipos de sequía: (1) la meteorológica, relacionada con la falta prolongada de precipitación; (2) la hidrológica, que describe una deficiencia en el volumen de abastecimiento de agua (de ríos, presas, acuíferos); (3) la agrícola, que relaciona las deficiencias de humedad disponible en el suelo para el crecimiento de las plantas y (4) la socioeconómica, que se define en términos monetarios como consecuencia de uno o más de los 3 tipos de sequía mencionados. Recientemente, se ha propuesto el término 'sequía repentina', que se refiere al rápido deterioro de los cultivos provocados por los efectos adversos de una onda de calor severa y una falta de humedad de corta duración (Mo y Lettenmaier, 2016).

La sequía meteorológica, en particular, es un fenómeno recurrente e irregular causado por movimientos descendentes de aire seco en la atmósfera que a su vez es resultado

de la ocurrencia de movimientos anticiclónicos (vórtices atmosféricos colosales que giran en sentido de las manecillas del reloj). Es particularmente desastrosa cuando estos movimientos permanecen durante días, semanas, meses e incluso años en un sitio y cubren una amplia región del continente. En los últimos casos las pérdidas a la economía nacional son cuantiosas y están vinculadas a impactos negativos en el suministro de agua y la producción de alimentos (Liverman, 1999). Sus impactos en la sociedad han sido fuertemente implicados en algunos de los casos más difíciles de la historia política de nuestra nación (Stahle, *et al.*, 2016; Wolfe, 2017) y se sugiere, por ejemplo que las causas de la desaparición de la cultura maya se debió a una sequía muy prolongada (Haug, *et al.*, 2003; Medina-Elizalde y Rohling, 2012). Existen diversos índices para cuantificar las sequías (Keyantash y Dracup, 2002) pero la investigación de su ocurrencia continúa (Núñez *et al.*, 2016; Stahle *et al.*, 2016). En un esfuerzo trinacional entre Canadá, Estados Unidos y México se creó el programa Monitor de Sequía de América del Norte (MSAN, Lawrimore *et al.*, 2002) para mejorar el monitoreo de la sequía en el continente. El cual tuvo su motivación debido al caso de éxito del Programa Monitor de Sequía de los Estados Unidos creado en 1999, y como tal, se está desarrollando para proporcionar una evaluación continua e integral de la sequía en Canadá, Estados Unidos y México. Recientemente, el Instituto de Geofísica de la UNAM propuso el nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México (Mosemm), para monitorear la intensidad y magnitud de una sequía que contribuye a los esfuerzos del MSAN (Mosemm, 2017)

5.3. Índices climáticos asociados a sequías

Muchos estudios han examinado el papel que desempeña la atmósfera y su interacción con los océanos en las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) (i.e Kushnir *et al.*, 2002; Namias *et al.*, 1988; Seager *et al.*, 2000), y como estas variaciones afectan el clima regional (Hu *et al.*, 2011; Palmer y Sun, 1985; Ting y Peng, 1995; Trenberth *et al.*, 1998; Venzke *et al.*, 1999). Nuestro conocimiento sobre el entendimiento de los mecanismos que afectan el clima en México a diferentes escalas, desde la variabilidad interanual hasta la decenal ha progresado recientemente. Por ejemplo, en lo que respecta a la variabilidad interanual se ha establecido que El Niño/Oscilación

del Sur (ENOS), modifica los patrones de precipitación en México (Ropelewski y Halpert, 1996; Seager *et al.*, 2005) y ocasiona sequías en el sur del país en la mitad cálida del año. Este fenómeno tiene que ver con los cambios en la temperatura superficial del mar al norte del Ecuador y los patrones de flujo atmosférico a lo largo del Pacífico Ecuatorial. Durante la fase de El Niño, aguas inusualmente cálidas coinciden con un debilitamiento de los vientos alisios y una profundización de la termoclina que se traduce en un empobrecimiento de los nutrientes en el agua. Es notable el hecho de que pesquerías comerciales como la sardina manifiestan una disminución importante durante el Niño, mientras que en superficie las lluvias se intensifican en zonas inusualmente áridas. Por el contrario, en la fase de La Niña, las aguas frente a las costas de Perú son inusualmente frías acentuando las condiciones de aridez en la zona. En México, situado a una distancia considerable del Ecuador, el efecto de este fenómeno se transporta a través de la atmósfera y del océano. Las TSM juegan un papel importante en la producción de sequías. Se ha descubierto, por ejemplo, que cuando las aguas del Atlántico norte son inusualmente cálidas, fenómeno conocido como fase positiva de la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO), aparecen sequías de gran magnitud en América del Norte (Hu y Feng, 2012; Méndez y Magaña, 2010). Por su lado, si las aguas del Pacífico Norte son inusualmente cálidas a lo largo de las costas de América, fenómeno conocido como fase positiva de la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO), se favorece la ocurrencia de sequías al sur de México (Méndez-González *et al.*, 2010). Los efectos de las TSM en los patrones de distribución de precipitación en México varían dependiendo de la estación del año aunque cabe mencionar que si bien más de la mitad de la agricultura mexicana se basa en la lluvia de la estación cálida (Conde *et al.*, 2006), las sequías de invierno pueden ser igualmente preocupantes porque de ellas depende la vegetación natural que las aprovecha mejor por ser estas más extendidas, menos intensas y de mayor duración que las de verano, además de que contribuyen al llenado de las presas. Por su complejidad y falta de entendimiento, el fenómeno de la sequía es un problema muy difícil de resolver en la ciencia, pero se han logrado algunos avances importantes en su monitoreo con la creación de programas como el MSAN, la propuesta de la UNAM y esfuerzos aislados de investigadores interesados en el tema, por ejemplo Tereshchenko *et al.* (2012). Los registros hidroclimáticos instrumentales, han permitido examinar con mucho detalle los últimos 150 años de historial de sequías en el suroeste de los Estados Unidos

(Seager *et al.*, 2007) mientras que los estudios de anillos de árboles han permitido reconstruir las sequías de los últimos 600 años en México (Stahle *et al.*, 2016). En años recientes la modelación numérica del clima se ha convertido en una forma de avanzar en el entendimiento de las causas de las sequías (Seager *et al.*, 2007, 2009).

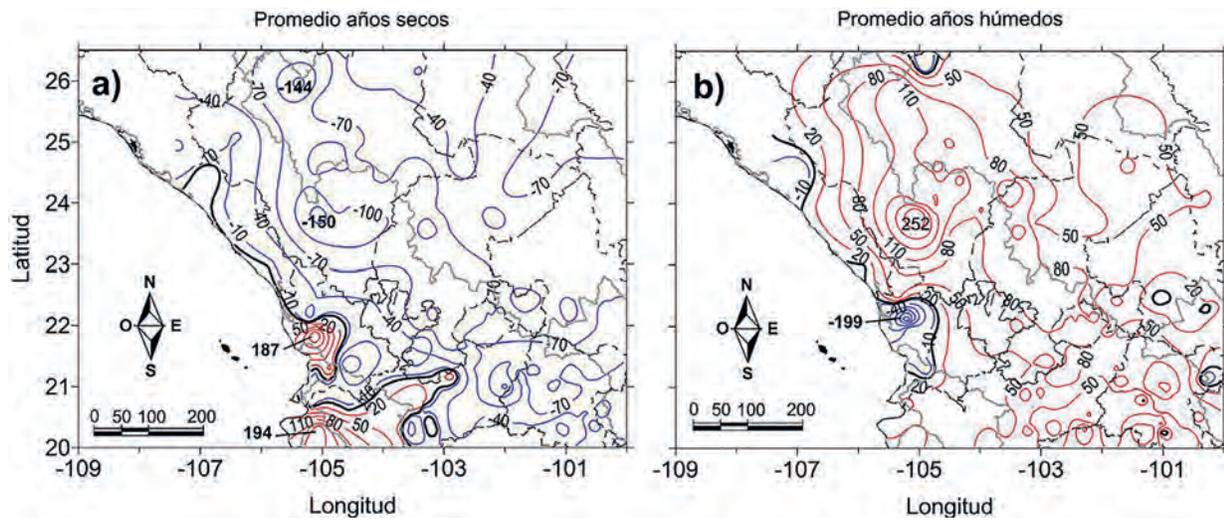
5.4. Metodología

En un estudio previo, Vega-Camarena *et al.* (2018), a partir de un análisis estadístico multivariado de Funciones Empíricas Ortogonales, aplicado a 174 series históricas de precipitación para el período 1970-2000, identificó dos modos de variación que por su cobertura y extensión son representativos de las regiones AM y COPM (Gráfica 5.1). Este análisis permitió hacer comparaciones entre el AM y la COPM (Gráfica 5.2) sobre la variabilidad de las precipitaciones. Por ejemplo, para el período 1970-2012, al calcular la diferencia entre la media de los 10 años más secos (estos fueron: 1979; 1980; 1982; 1989; 1992; 1995; 1997; 1998; 1999 y 2011, Gráfica 5.2a) y de los 10 años más húmedos (1973; 1984; 1986; 1987; 1988; 1990; 1991; 1993; 1994 y 2010, Gráfica 5.2b), menos la media de precipitación de todo el período, para cada estación individual localizada en el área de estudio, fue notable el contraste observado en la variabilidad de las precipitaciones entre el AM y la COPM. Este contraste indica que cuando hay sequía en el AM (anomalías negativas, Gráfica 5.2a), se observan lluvias abundantes en la COPM (anomalías positivas, Gráfica 5.2a) y viceversa (Gráfica 5.2b). Los diez años más húmedos y secos se identificaron a partir de la serie regional del AM (ver Vega-Camarena *et al.*, 2018). En la Gráfica 5.3, se muestran las series que resultan de sumar los valores estandarizados de manera consecutiva, que fueron estimados a partir de las series originales del AM y de la COPM, es decir:

$$\sum_{i=1}^n Z_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma},$$

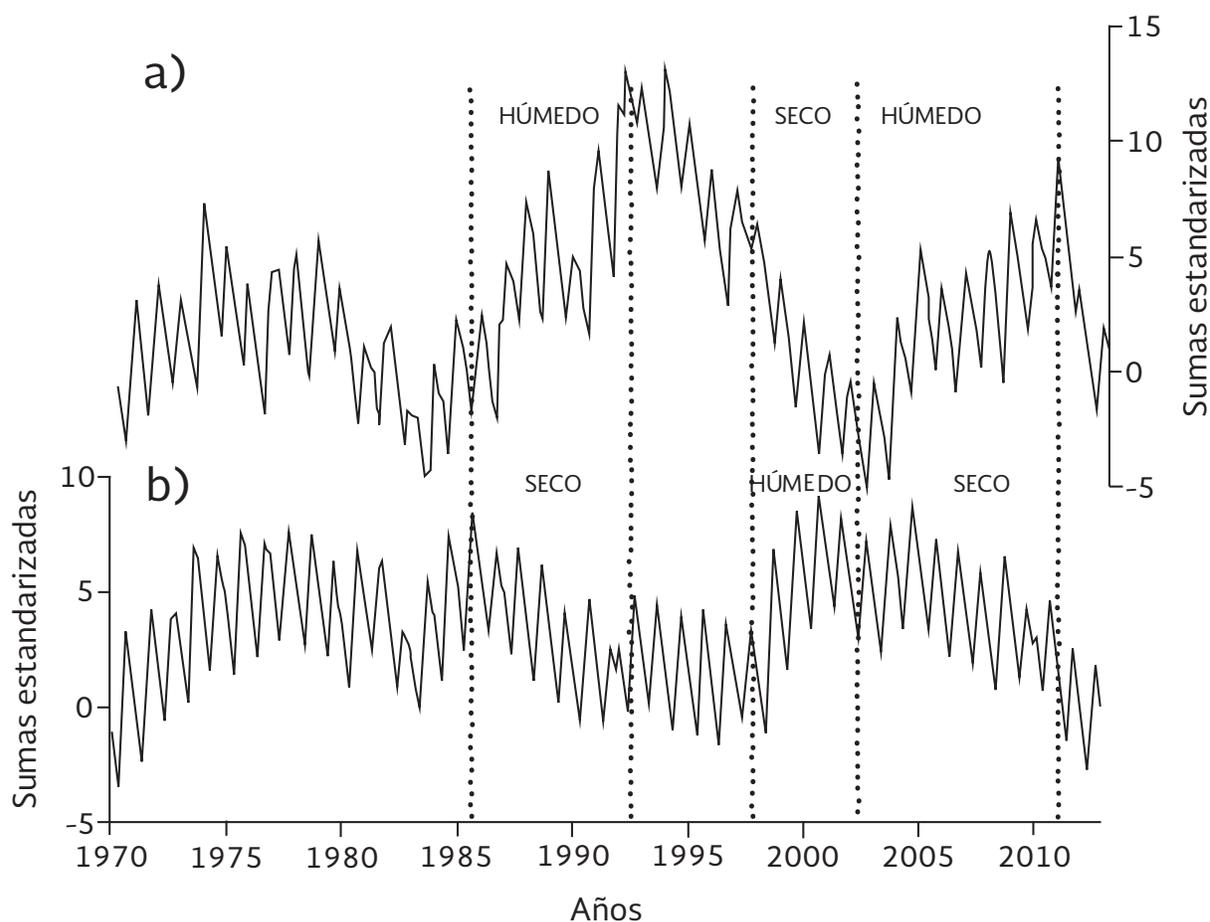
donde Z_i y x_i son el valor estandarizado y la precipitación del i -ésimo mes, respectivamente; \bar{x} y σ son la media y la desviación estándar de la serie;

EL BALANCEO DE LAS LLUVIAS ¿MECANISMO OSCILATORIO NATURAL QUE
EXPLICA LAS SEQUÍAS EN EL ALTIPLANO MEXICANO Y LAS LLUVIAS ABUNDANTES
EN LA COSTA DE NAYARIT?



Fuente: modificado de Vega-Camarena *et. al.*, 2018.

La técnica de sumar de manera consecutiva los valores estandarizados de la serie permite identificar los déficits de precipitación, cuando la tendencia es hacia el descenso, y los excesos, cuando la tendencia es hacia el ascenso. De este modo, las series muestran que el balanceo en las lluvias (húmedo en el AM y seco en la COPM y viceversa) es muy irregular y no siempre coincide en amplitud y duración (Gráfica 5.3). Sin embargo, cuando las sequías en el AM son muy intensas o prolongadas, las condiciones en la COPM son opuestas.



Gráfica 5.3. Series de sumas estandarizadas de precipitación mensual entre 1970 y 2012 estimadas a partir de las series regionales del Altiplano Mexicano (a) y la costa occidental del Pacífico Mexicano (b). En cada caso, cuando la tendencia de la serie va en aumento es indicación de un período húmedo. Por el contrario, si va en descenso es indicación de un período seco. Obsérvese como hay períodos húmedos y secos en el Altiplano que coinciden con períodos opuestos en la costa, aunque su duración no necesariamente coincide.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Divergencia y convergencia

Se entiende por divergencia la expansión o dispersión de un campo vectorial mientras que la convergencia es la contracción o confluencia del campo vectorial. La divergencia horizontal en las capas cercanas a la superficie resulta en subsidencia de aire (flujo descendente) desde capas más elevadas. Por el contrario, la convergencia horizontal en capas superiores resulta en movimientos ascendentes de aire desde capas inferiores. La subsidencia, se asocia a tiempo seco mientras que, por el contrario, el movi-

miento ascendente de aire, cuando hay suficiente humedad en la atmósfera se asocia con formación de nubes, y lluvia.

En cálculos matemáticos, la convergencia es divergencia negativa. En meteorología, debido a la dominancia de los movimientos horizontales, la divergencia usualmente se refiere a divergencia horizontal del campo de velocidades en dos dimensiones:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

donde u y v son los componentes de velocidad del viento en los ejes x y y , respectivamente. Las unidades de divergencia son s^{-1} .

5.6. Mapas compuestos de anomalías de viento, humedad específica y divergencia

Con base en datos provenientes de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>), se construyeron mapas compuestos del viento promedio y anomalías de humedad específica a 500 hPa (aproximadamente 5 km de altura) y 700 hPa (3 km), así como de anomalías de divergencia a dos niveles sigma (a) 0.2101 (aproximadamente a 11 km de altura) y (b) 0.995 (en superficie) para los 10 años más húmedos y los 10 años más secos.

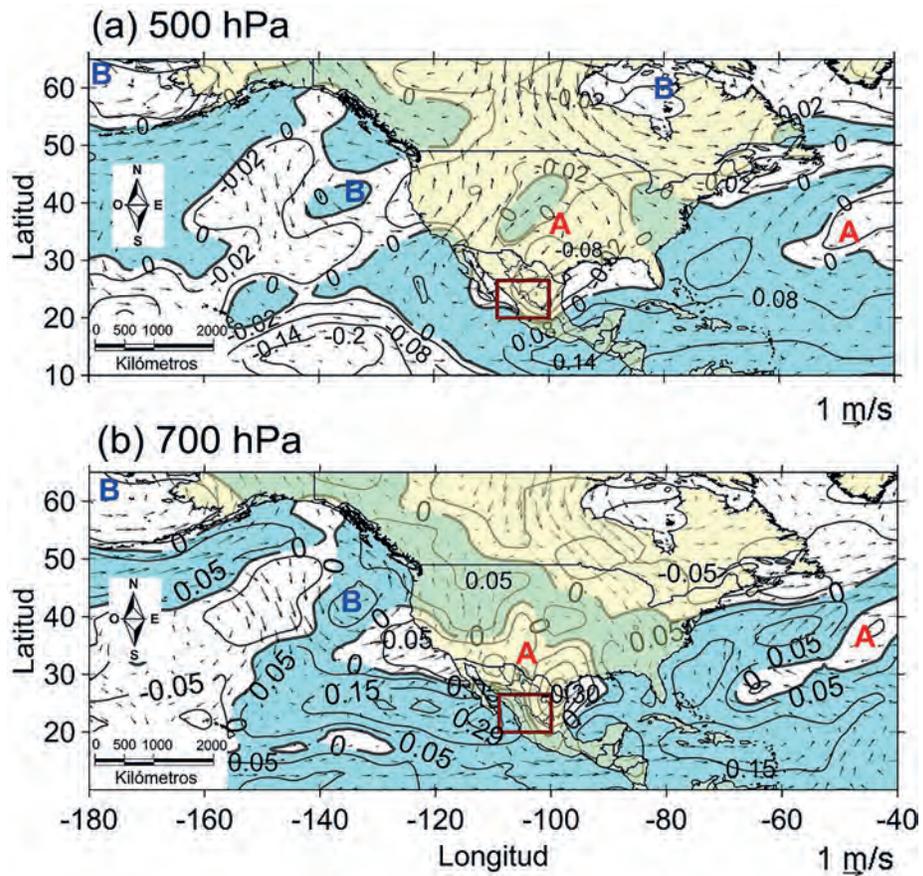
5.7. Resultados

En las Gráfica 5.4 y Gráfica 5.5 se muestran los mapas compuestos de viento promedio y anomalías de humedad específica para los diez años secos y diez años húmedos identificados en la región del AM. Como se observa en la Gráfica 5.4 el patrón de flujo de viento y la humedad específica promedios durante los 10 años secos indican que el mecanismo oscilatorio natural que por un lado propició sequía en el AM y por el otro, condiciones húmedas en la COPM está relacionado con una circulación anti-ci-

clónica posicionada sobre el continente en la troposfera media (entre 3000 y 5000 m de altura), con centro en el sur de Estados Unidos y norte de México. A estos niveles los déficits de humedad son dominantes sobre el AM, el norte de México y el sur de los Estados Unidos mientras que los excesos de humedad (mucho más concentrados a 3000 m de altura) tienen su núcleo en la boca del Golfo de California pero se observan en el sureste de México y a lo largo de las costas del Pacífico Mexicano, con excepción del extremo noroccidental de la Península de Baja California. Debido a la posición de la circulación anticiclónica y a su gran cobertura, vientos del norte, fríos y secos invaden al AM produciendo los déficits de humedad mientras que vientos del este, del lado del Pacífico, arrastran la humedad que se genera en las costas, principalmente en la boca del Golfo de California.

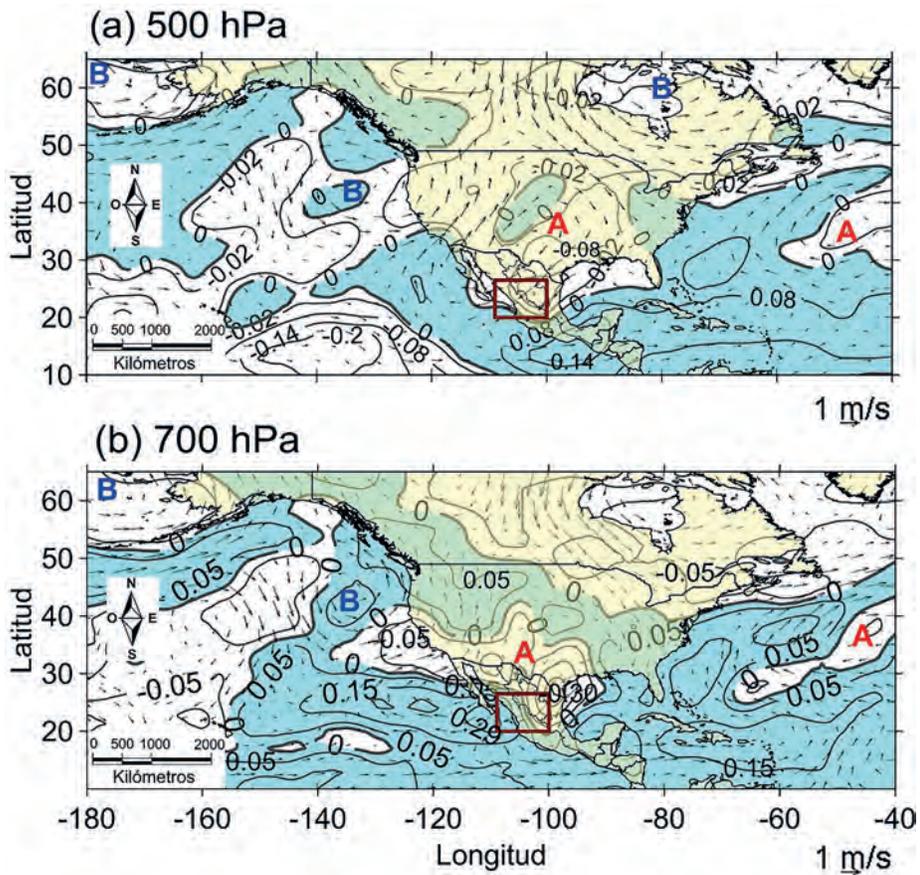
Por su parte, los diez años más húmedos identificados en el AM corresponden con condiciones secas en la COPM y están asociados a un patrón de flujo atmosférico en la troposfera media que es opuesto a las condiciones anteriores (Gráfica 5.5). En este caso, el flujo atmosférico está dominado por una circulación ciclónica con centro en el noroeste de México, que favorece la concentración de humedad en el AM debido al flujo proveniente del sur-suroeste en su sector sur-oriental que arrastra la humedad desde el Pacífico tropical, mientras que el déficit de humedad que se observa en la costa está dominado por un flujo seco proveniente del norte-noroeste del sector sur-occidental de la circulación ciclónica.

EL BALANCEO DE LAS LLUVIAS ¿MECANISMO OSCILATORIO NATURAL QUE EXPLICA LAS SEQUÍAS EN EL ALTIPLANO MEXICANO Y LAS LLUVIAS ABUNDANTES EN LA COSTA DE NAYARIT?



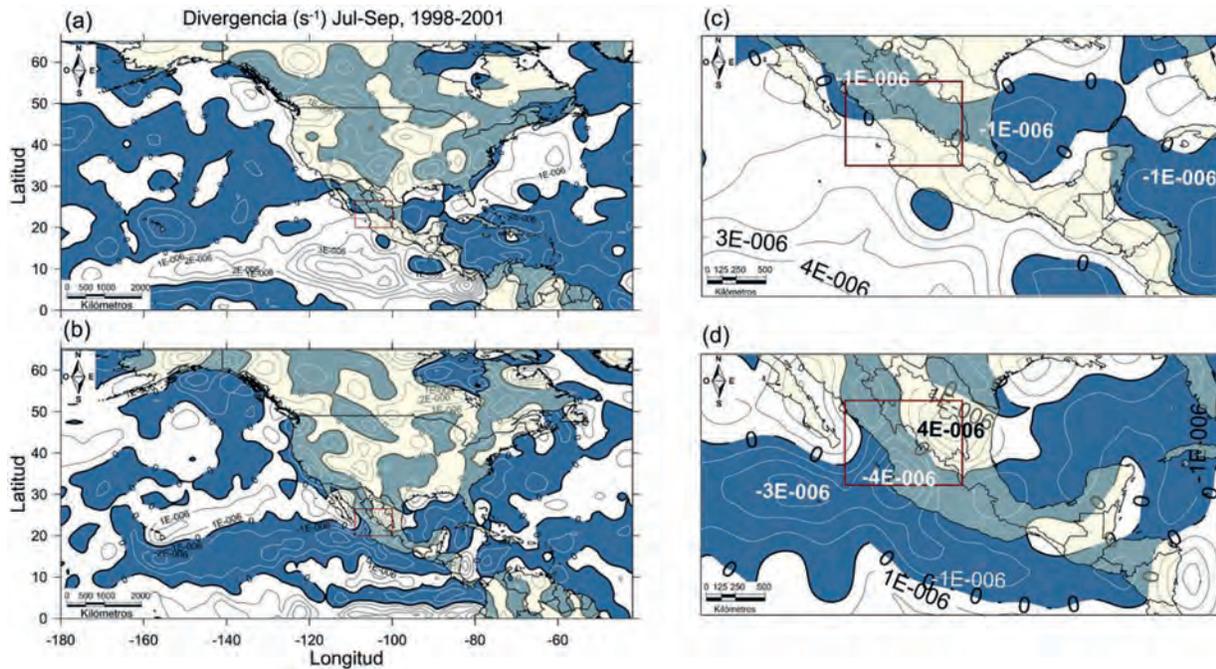
Gráfica 5.4. Mapas compuestos de vectores de viento promedio (m s^{-1}) y anomalías de contornos de humedad específica (g kg^{-1}) a 500 hPa (≈ 5000 m) (a) y 700 hPa (≈ 3000 m) durante 10 años secos en el Altiplano Mexicano. El contorno = 0 g kg^{-1} se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5.5. Mapas compuestos de vectores de viento promedio ($m\ s^{-1}$) y anomalías de contornos de humedad específica ($g\ kg^{-1}$) a 500 hPa ($\approx 5000\ m$) (a) y 700 hPa ($\approx 3000\ m$) durante 10 años húmedos en el Altiplano Mexicano. El contorno = $0\ g\ kg^{-1}$ se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés. Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la divergencia horizontal a 11 km de altura y al nivel del mar, entre 1998-2001 que correspondió a condiciones secas en el AM (Gráfica 5.3a), se muestra en la Gráfica 5.6, mientras que para el período 1990-1992, que correspondió a condiciones húmedas en el AM (Gráfica 5.3a), se muestra en la Gráfica 5.7. En las Gráfica 5.6 y Gráfica 5.7, los valores negativos de la divergencia horizontal equivalen a convergencia horizontal.

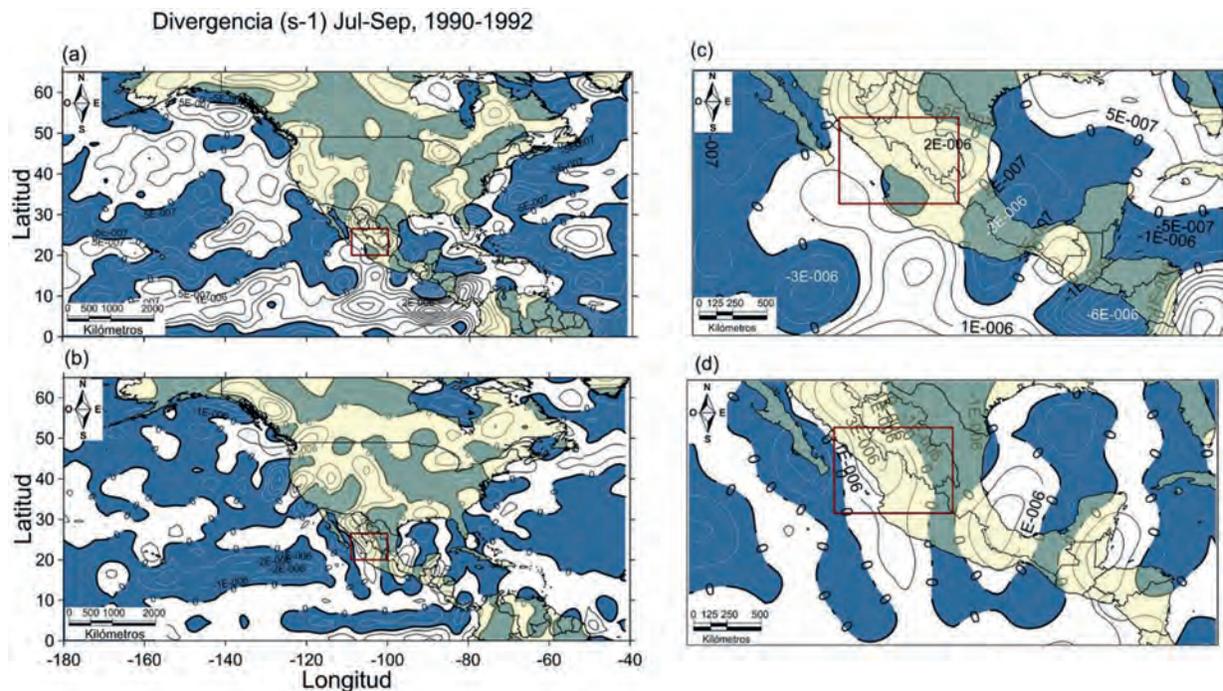


Gráfica 5.6. Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período seco registrado en el Altiplano Mexicano entre 1998 y 2001. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el período seco, en la región del AM, domina la convergencia en altura (Gráfica 5.6a) y la divergencia en superficie (Gráfica 5.6b). La divergencia horizontal en superficie del lado del AM resulta en subsidencia de aire desde capas más elevadas, lo que a su vez se fortalece por la convergencia en altura. Este proceso hace que el aire pierda humedad mientras desciende puesto que se va comprimiendo y calentando por compresión, lo que resulta en déficit de humedad sobre el AM (Gráfica 5.4a).

Por el contrario, durante este mismo período en la COPM, domina la divergencia en altura (Gráfica 5.6a) y la convergencia en superficie (Gráfica 5.6b). Este patrón promedio resulta en ascenso de aire desde la superficie hacia capas más elevadas que arrastra la humedad generada en el Pacífico por convección, incrementando su contenido sobre la COPM, dando como resultado que el período 1998-2001 de lado de la costa haya sido húmedo.

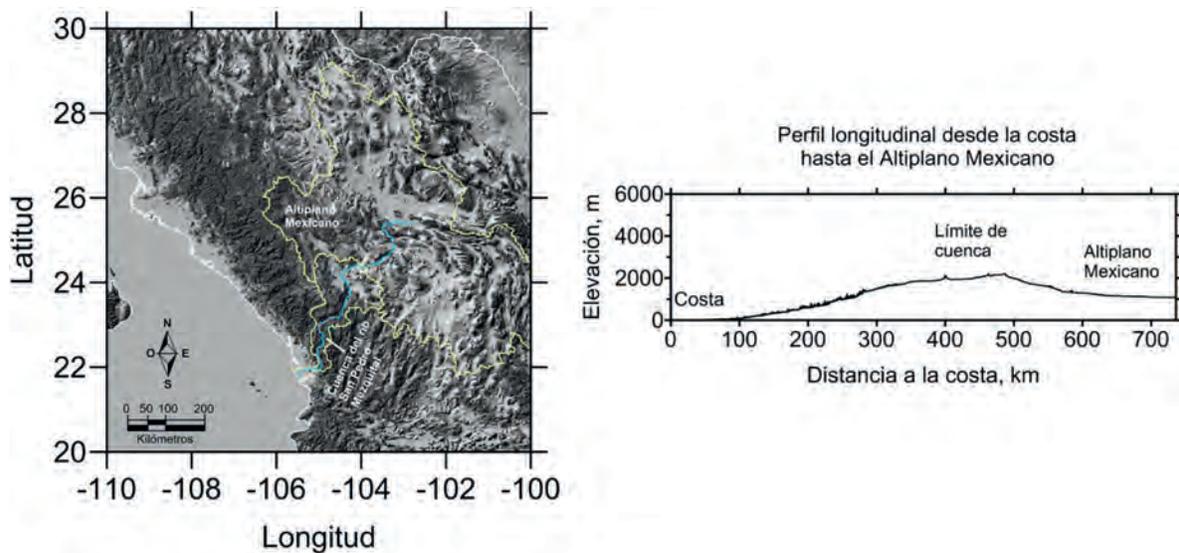


Gráfica 5.7. Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período húmedo registrado en el Altiplano Mexicano entre 1990 y 1992. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul.

Fuente: Elaboración propia.

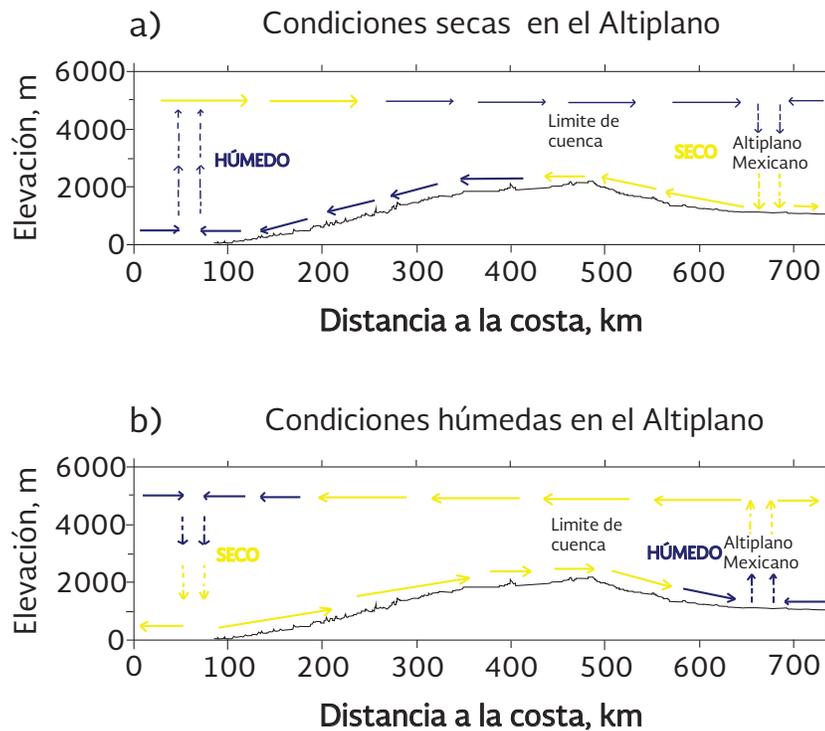
Las condiciones húmedas observadas en el AM durante 1990-1992, resultaron en condiciones secas en la COPM (Gráfica 5.3b). En este caso, el patrón promedio de divergencia-convergencia en el AM y la COPM es opuesto al descrito anteriormente. Del lado del AM, por ejemplo, se observa divergencia en altura (Gráfica 5.7a) y convergencia en superficie (Gráfica 5.7b), aunque más concentrada del lado de la vertiente del Golfo de México, lo que coincide con la presencia de humedad sobre el AM (Gráfica 5.5)

Por el contrario, del lado de la COPM, se observa convergencia en altura (Gráfica 5.7a), si bien en una región muy reducida y con valores bajos, y divergencia en superficie (Gráfica 5.7b), aunque mucho más concentrada hacia el norte, del lado de la vertiente del Pacífico. Estas condiciones coinciden con el déficit de humedad observado sobre la COPM en condiciones secas (Gráfica 5.5).



Gráfica 5.8. Mapa donde se muestran en color amarillo los polígonos de las cuencas del río San Pedro Mezquital, que desemboca en el Pacífico, y del Altiplano Mexicano cuyo drenaje es hacia el interior del continente (Izquierda). En línea azul se muestra la trayectoria del río San Pedro Mezquital y del río Aguanaval unidos arbitrariamente en los límites de sus cuencas adyacentes para hacer continua la línea que sirve de base para construir el perfil longitudinal desde la costa hasta el interior del Altiplano (Derecha).

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5.9. Modelo conceptual de flujos de viento en condiciones secas (a) y húmedas (b) identificadas en el Altiplano Mexicano con base en los resultados del análisis de divergencia y contenido de humedad en la atmósfera el perfil longitudinal a lo largo de los cauces de los ríos San Pedro-Mezquital y Aguanaval. Fuente: Elaboración propia.

5.8. Modelo conceptual

En la Gráfica 5.8 se muestra la zona de estudio y los polígonos de las cuencas del río San Pedro-Mezquital y el AM. Se muestra también un perfil longitudinal desde la costa hacia interior del Altiplano el cual sigue el curso de los ríos San Pedro-Mezquital y Aguanaval que se unieron en los límites de sus cuencas adyacentes para hacer continua la línea. Este perfil sirve de base para proponer un modelo conceptual del flujo de viento que explica las corrientes asociadas a condiciones húmedas y secas entre el AM y la COPM y el balanceo en las lluvias entre ambas regiones (Gráfica 5.9). Como se puede apreciar, las condiciones secas en el AM que coinciden con condiciones húmedas en la COPM (Gráfica 5.9a), están caracterizadas por divergencia en superficie y convergencia en altura del lado del AM mientras que, por el contrario, por convergencia en superficie y divergencia en altura del lado de la COPM, tal como sugiere

el análisis de la Gráfica 5.6. La humedad bajo estas condiciones se concentra en la COPM como sugiere la Gráfica 5.4. Por el contrario, las condiciones húmedas en el AM que coinciden con condiciones secas en la COPM (Gráfica 5.9b), se caracterizan por convergencia en superficie y divergencia en altura del lado del AM mientras que por divergencia en superficie y convergencia en altura de lado de la COPM, tal como sugiere el análisis de la Gráfica 5.7. La humedad bajo estas condiciones se concentra en el AM (Gráfica 5.5).

5.9. Conclusiones

Las sequías pueden afectar cualquier territorio. En la historia reciente de nuestro país la sequía meteorológica del 2011-2012 afectó al centro y norte de México, fue la más prolongada en los últimos 70 años, y fue catalogada como excepcional afectando los sectores agrícola y pecuario de la región del AM. Estas condiciones de sequía estuvieron asociadas con un período relativamente normal en la COPM. Otro evento de sequía en el AM fue el ocurrido entre 1998 y 2001 que coincidió con un período húmedo en la COPM. Los diez años con condiciones secas identificados en el AM coinciden con condiciones húmedas en la COPM. En todos estos casos, se observa un balanceo en las lluvias entre el AM y la COPM que indica que condiciones secas en el AM por lo general coinciden con condiciones húmedas en la COPM y viceversa. Al parecer este balanceo no se observa siempre. Los resultados indican que solo aparece cuando las condiciones secas o húmedas son muy intensas o muy persistentes en el AM como sugiere la Gráfica 5.3. Sabemos que la propagación de las lluvias de verano desde el sur hacia el noroeste de México se ve afectada por la entrada de humedad que de manera local fomenta la producción de tormentas recurrentes en Nayarit entre los meses de julio y septiembre, época en que el sistema del monzón de Norteamérica modula la variabilidad de las lluvias en esta región del país. Ahora se sabe que su afectación se extiende muy profundo en el continente llegando incluso a afectar al Altiplano Mexicano (Brito-Castillo *et. al.*, 2010). El Altiplano y la costa se conectan a través de la cuenca del río San Pedro-Mezquital. Por lo tanto la existencia del balanceo en las lluvias entre ambas regiones resulta relevante para entender la ocurrencia de sequías sobre estas zonas. Este conocimiento puede ser muy útil para mejorar los pronósticos estacionales o

de largo plazo, que a su vez ayuden a los tomadores de decisión a proponer acciones preventivas para evitar pérdidas económicas considerables, principalmente durante períodos de sequía muy intensos o prolongados.

5.10. Agradecimientos

Se agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. y a la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos de CONACYT el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

5.11. Referencias

- Acosta-Díaz, E. J., A. Acosta-Gallegos, M. D. Amador-Ramírez, J. S. Padilla-Ramírez (2009), 'Efecto del riego suplementario en la producción de biomasa y grano de frijol de temporal en Zacatecas, México', *Agricultura Técnica en México*, vol. 35, núm. 2, pp. 157–167. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_issueto-c&pid=0568-251720090002&lng=es&nrm=iso
- Brito-Castillo, L., E.R. Vivoni, D. J. Gochis, A. Filonov, I. Tereshchenko, C. Monzon (2010), 'An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico', *Journal of Arid Environments*, vol. 74, núm. 5, pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.10.014. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0140196309003449/1-s2.0-S0140196309003449-main.pdf?_tid=5671fa8e-29ba-43e7-bb55-61366e574f0e&acdnat=1529524833_fe7b16681cc546216c5cd8330916479e
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2013), 'Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit', 204 pp. Disponible en: (http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2013/MARISMAS.pdf) (consultado el 20 de octubre de 2017)
- Conde, C., R., Ferrer, S. Orozco (2006), 'Climate change and climate variability impacts on rain-fed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study', *Atmósfera*, vol. 19, núm. 3, pp. 181–194. Disponible en: <http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8559/8029>

- Haug, G. H., D. Gunther, L. C. Peterson, D. M. Sigman, K. A. Hughen, B. Aeschlimann (2003), 'Climate and the collapse of Maya civilization', *Science*, vol. 299, núm. 5613, pp. 1731-1735. DOI: 10.1126/science.1080444. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/299/5613/1731/tab-pdf>
- Hu, Q., S. Feng, R. J. Oglesby (2011), 'Variations in North American summer precipitation driven by the Atlantic multidecadal oscillation', *Journal of Climate*, vol. 24, núm. 21, pp. 5555-5570. DOI.org/10.1175/2011JCLI4060.1. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2011JCLI4060.1>
- Hu, Q., S. Feng (2012), 'AMO- and ENSO-driven summertime circulation and precipitation variations in North America', *Journal of Climate*, vol. 25, núm. 19, pp. 6477-6495. DOI.org/10.1175/JCLI-D-11-00520.1. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI-D-11-00520.1>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2013), 'Censo agropecuario 2007', El cultivo del frijol en Zacatecas. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Agro/ca2007/Resultados_Agricola/
- Keyantash, J., J. Dracup (2002), 'The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, núm. 8, pp. 1167-1180. DOI.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1191:TQODAE>2.3.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477-83.8.1167>
- Kushnir, Y., W.A. Robinson, I. Blade, N.M.J. Hall, S. Peng, R. Sutton (2002), 'Atmospheric GCM responses to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation', *Journal of Climate*, vol. 15, núm. 16, pp. 2233-2256. DOI.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2233:AGRTE5>2.0.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C2233%3AAGRTE5%3E2.0.CO%3B2>
- Lawrimore, J., R.R. Heim Jr., M. Svoboda, V. Swail, P.J. Englehart Beginning a new era of drought monitoring across North America Bull. Am. Meteor. Soc., 83 (2002), pp. 1191-1192
- Ledesma-Mares, J. C., C. Ramírez-Miranda (1994), 'La producción de frijol en México y sus perspectivas ante el Tratado de Libre Comercio. In: *El TLC y sus repercusiones en el sector agropecuario del centro-norte de México*, Schwentesius R, M. G. Gómez, J. C. Ledesma, C. Gallegos, pp. 39-61. Universidad Autónoma Chapingo: Texcoco, Mexico.
- Liverman, D. M. (1999), 'Vulnerability and adaptation to drought in Mexico', *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 99-115. Disponible en: https://www.jstor.org/stable/24888469?seq=1#page_scan_tab_contents

- Medina-Elizalde, M., E. J. Rohling (2012), 'Collapse of classic maya civilization related to modest reduction in precipitation', *Science*, vol. 335, núm. 6071, pp. 956-959. DOI: 10.1126/science.1216629. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/sci/335/6071/956.full.pdf>
- Méndez, M., V. Magaña (2010), 'Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America', *Journal of Climate*, vol. 23, núm. 5, pp. 1175–1188. DOI.org/10.1175/2009JCL3080.1. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JCLI3080.1>
- Méndez-González, J., A. Ramírez-Leyva, E. Cornejo-Oviedo, A. Zárate-Lupercio, T. Cavazos-Pérez (2010), 'Teleconexiones de la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México', *Investigaciones Geográficas*, núm. 73, pp. 57–70. Disponible en: <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59450/52673>
- Mo, K. y D. P. Lettenamier (2016), 'Precipitation Deficit Flash Droughts over the United States', *Journal of Hydrometeorology*, vol. 17, núm. 4, pp. 1169-1184. DOI.org/10.1175/JHM-D-15-0158.1. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JHM-D-15-0158.1>
- Mosemm (2017), 'Monitor de Sequía Multivariado en México', disponible en <<http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/16402-crean-nuevo-monitor-sequia-multivariado-mexico>> (consultado el 12 de septiembre de 2017).
- Namias, J., X. Yuan, D. R. Cayan (1988), 'Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmospheric flow patterns', *Journal of Climate*, vol. 1, núm. 7, pp. 682–703. DOI.org/10.1175/1520-0442(1998)001<0682:PONPSS>2.0.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281988%29001%3C0682%3APONPSS%3E2.0.CO%3B2>
- Núñez, J., M. Hallack-Alegría, M. Cadena (2016), 'Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: the Latin America and the Caribbean drought atlas', *Journal of Hydrology*, vol. 538, pp. 515–538. DOI.org/10.1016/j.hydro.2016.04.025. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0022169416302062/1-s2.0-S0022169416302062-main.pdf?_tid=509a6c68-7c8f-4b29-adf2-b86f9b179ed0&acdnat=1529529360_bc0f28504f08a4f49ef367f476e407a7
- Ropelewski, C. F., M. S. Halper (1996), 'Quantifying southern oscillation-precipitation relationships', *Journal of Climate*, vol. 9, núm. 5, pp.1043-1049. DOI.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSO>2.0.CO;2. Disponible en: [https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1043:QSO>2.0.CO;2](https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSO>2.0.CO;2)

g/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281996%29009%3C1043%3A-QSOPR%3E2.0.CO%3B2>

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación) (2003), 'Base de datos de PROCAMPO', Delegación Zacatecas: Zacatecas, Mexico. Disponible en: (<http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Programas/proagro/procampo/Paginas/procampo.aspx>)

(consultado el 20 de octubre de 2017)

SAGARPA (2014), 'Balanza-disponibilidad-consumo', Mexico City. Disponible en: (<http://www.siap.gob.mx/>)

(consultado el 20 de octubre de 2017).

Palmer, T. N., Z. Sun (1985), 'A modeling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general circulation', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 111, núm. 470, pp. 947–975. DOI.10.1002/qj.49711147003. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49711147003>

Pineda-Martínez, L. F., N. Carbajal, E. Medina-Roldán (2007), 'Regionalization and classification of bioclimatic zones applying principal components analysis (PCA) in the central-northeastern region of México', *Atmósfera*, vol. 20, núm. 2, pp. 133–146. Disponible en: <http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8576/8046>

Rincón-Valdez, F., F. G. Echavarría-Cháirez, F. A. Rumayor-Rodríguez, J. M. Covarrubias, A. G. Bravo-Lozano, E. Acosta-Díaz, J. L. Gallo-Dávila, H. Salinas-González (2004), 'Cadenas de sistemas agroalimentarios de chile seco, durazno y frijol en el estado de Zacatecas: una aplicación de la metodología ISNAR', INIFAP-Zacatecas, publicación especial núm. 14, Mexico City. 158 p. Disponible en: (<http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2038/Cadenas%20de%20sistemas%20agroalimentarios%20de%20chile%20seco,%20durazno%20y%20frijol%20en%20el%20estado%20de%20zacatecas.%20Una%20aplicacion%20a%20la%20metodologia%20ISNAR.pdf?sequence=1>) (consultado el 20 de octubre de 2017)

Seager, R., Y. Kushnir, M. Visbeck, N. Naik, J. Miller, G. Krahnemann, H. Cullen (2000), 'Causes of Atlantic Ocean climate variability between 1958 and 1998', *Journal of Climate*, vol. 13, núm. 16, pp. 2845–2862. DOI.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2845:COACV>2.0.CO;2. Disponi-

- ble en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282000%29013%-3C2845%3ACOAOCV%3E2.0.CO%3B2>
- Seager, R., N. Harnik, W. A. Robinson, Y. Kushnir, M. Ting, H. P. Huang, J. Vélez (2005), 'Mechanisms of ENSO-forcing of hemispherically symmetric precipitation variability', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 131, núm. 608, pp. 1501-1527. DOI:10.1256/qj.04.96. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1256/qj.04.96>
- Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H. P. Huang, N. Hamik, A. Leetmaa, N. C. Lau, C. Li, J. Velez, N. Naik (2007), 'Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America', *Science*, vol. 316, núm. 5828, pp.1181-1184. DOI: 10.1126/science.1139601. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/sci/316/5828/1181.full.pdf>
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Came, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, D. W. Stahle (2009), 'Mexican drought: an observational modelling and tree ring study of variability and climate change', *Atmosfera*, vol. 22, núm. 1, pp. 1-31. Disponible en: <http://www.revis-tascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8616/8086>
- Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J. N. Burns, D. Griffin, B. I. Cook, R. Acuña, M. C. A. Torbenson, P. Szejner, I. M. Howard (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*, vol. 149, pp. 34-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0277379116302244/1-s2.0-S0277379116302244-main.pdf?_tid=a1154240-b3d9-4afd-8f75-cd5f2e7b-07b8&acdnat=1529531459_cb6c26e1e7d2ad62aab824d11b903ee5
- Tereshchenko, I., A. Zolotokrylin, E. Titkova, L. Brito-Castillo, C. Monzón (2012), 'Seasonal Variation of surface temperature-modulating factors in the Sonoran Desert in Northwestern Mexico', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 51, núm. 8, pp. 1519-1530. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAMC-D-11-0160.1>
- Ting, M., S. Peng (1995), 'Dynamics of early and middle winter atmospheric responses to northwest Atlantic SST anomalies', *Journal of Climate*, vol. 8, núm. 9, pp. 2239-2254. DOI.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2239:DOTEAM>2.0.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281995%29008%3C2239%3ADOTEAM%3E2.0.CO%3B2>

- Trenberth, K. E., G. W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N. C. Lau, Ch. Ropelewski (1998), 'Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures', *Journal of Geophysical Research Oceans*, vol. 103, núm. C7, pp. 14291–14324. Doi.10.1029/97JC01444. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/97JC01444>
- Venzke, S., M. R. Allen, R. T. Sutton, D. P. Rowell (1999), 'The atmospheric response over the North Atlantic to decadal changes in sea surface temperature', *Journal of Climate*, vol. 12, núm. 8, pp. 2562–2584. DOI.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2562:TAROTN>2.0.CO;2. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281999%29012%3C2562%3ATAROTN%3E2.0.CO%3B2>
- Vega-Camarena, J.P., L. Brito-Castillo, L. M., L. M. Farfán, D.J. Gochis, L. F. Pineda-Martinez, S.C. Díaz (2018). Ocean-atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. *Int. J. Climatol*, vol. 38: pp. 853- 866. doi:[10.1002/joc.5215](https://doi.org/10.1002/joc.5215).
- Wilhite, D. A. (2000), 'Drought as a natural hazard: Concepts and definitions, Drought: A Global Assessment, D. Wilhite, Ed., vol. 1, pp. 3–18.
- Wolfe, E. (2017), 'Drought and the origins of the Mexican revolution', *Oxford Research Encyclopedia of Latin American History*. Oxford University Press, USA, pp. 1-18.