

Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación

Recibido: 15 de agosto de 2011. Aceptado en versión final: 10 de enero de 2012.

Sofía Márdero*
Elsa Nickl**
Birgit Schmoock*
Laura Schneider***
John Rogan****
Zachary Christman***
Deborah Lawrence****

Resumen. Este estudio analiza la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en el sur de la península de Yucatán, a través de anomalías y tendencias de la precipitación anual y estacional y la ocurrencia de sequías meteorológicas, empleando datos de lluvia de nueve estaciones meteorológicas para el periodo de 1953-2007. Utilizando tendencias de regresión lineal anuales y estacionales se analizó el aumento o la disminución de las precipitaciones durante este periodo. Las anomalías de precipitación permitieron evaluar la estabilidad, el déficit o superávit de precipitación para cada año, y el método quintil permitió la clasificación de la intensidad de las sequías meteorológicas. Los resultados muestran una considerable variabilidad espacial y temporal, con mayores valores de precipitación y anomalías en la costa,

que van disminuyendo gradualmente hacia el Centro-Oeste del área en estudio. Durante este periodo hay una disminución de la precipitación anual y de la estación húmeda, en gran parte de la zona la cual alcanza una disminución de 12 mm anuales (estación Chachobben). Estaciones como Zoh Laguna Campeche muestran claramente un aumento en los años de sequía (desde leve hasta extrema) a partir de 1985 principalmente. Este estudio contribuye a un mejor conocimiento de la variación regional de la precipitación y sus posibles vínculos con el Cambio Climático a escala regional y global.

Palabras clave: Sequía meteorológica, precipitación, variabilidad, anomalías, tendencias, península de Yucatán.

Droughts in the Southern Yucatán Peninsula: analysis of the annual and seasonal precipitation variability

Abstract. This study analyzes the spatial and temporal variability of precipitation across the Southern Yucatán Peninsula in Mexico, addressing the anomalies and trends of annual and seasonal precipitation as well as the occurrence of meteorological droughts, using rainfall data from nine weather stations during the period 1953-2007. Linear regression in the annual and seasonal rainfall were used to analyze the increase or decrease in precipitation trends over

rence of meteorological droughts, using rainfall data from nine weather stations during the period 1953-2007. Linear regression in the annual and seasonal rainfall were used to analyze the increase or decrease in precipitation trends over

* El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal, Av. Centenario, Km 5.5, 77014, Chetumal, Quintana Roo, México. E-mail: sofia_mardero@hotmail.com

** Centro de Investigación Climática, Departamento de Geografía, Universidad de Delaware, 19716, Newark, Delaware.

*** Departamento de Geografía, Universidad de Rutgers, Avenida Joyce Kilmer, 08854, NJ, EUA.

**** Universidad de Clark, Escuela de Geografía, Worcester, MA 01610-1477. +216 Clark Hall de la Universidad de Virginia en Charlottesville, VA 22904-4123.

this period. Precipitation anomalies enabled the evaluation of the stability, deficit, or surplus of precipitation for each year or season, and a quintile method was used to classify the intensity of meteorological droughts.

The results exhibit considerable spatial and temporal variability, with higher values of precipitation and precipitation anomalies at the Caribbean coast, which gradually decrease towards the mid-west of the region. Results exhibit a significant decrease in annual and rainy-season precipitation in much of the area cover in this study, by as much as

12 mm less per year (Chachobben station). Other weather stations, such as Zoh Laguna, show an increase in years of drought (ranging from mild to extreme), especially since the early 1980's. We hope that the results of this study will contribute to a better understanding of regional precipitation variability, with links to broader-scale Climate Change.

Key words: Meteorological drought, precipitation, variability, anomalies, trends, Yucatán Peninsula.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, a la variabilidad natural del clima se ha sumado la influencia de las actividades antropogénicas en el cambio del clima con diversos efectos ambientales y socioeconómicos (Hare, 2003). El Cuarto Informe de Evaluación de Cambio Climático (CC) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) reporta que algunos de los efectos del CC se traducirán en cambios en la distribución de las precipitaciones y en la ocurrencia e intensidad de los huracanes y las sequías. La comparación entre los promedios de precipitación anual y estacional del periodo 1980-1999 y los promedios de precipitación proyectados a cien años (periodo 2080-2099) indican una disminución de la precipitación anual para toda la región de Centro América. Las proyecciones para la península de Yucatán, específicamente, reportan una reducción de precipitación anual del 10 al 15% y más del 30% durante la estación seca y lluviosa con respecto al promedio del periodo 1980-1999 (Bárcena *et al.*, 2010). En adición, de acuerdo con Magrin *et al.* (2007), para la zona Maya (Quintana Roo, Campeche, Chiapas, Tabasco y Yucatán en México, y los países Centroamericanos de Belice, Guatemala, Honduras y El Salvador) se predice un incremento en la temperatura promedio de 2 al 3.5° C para el 2090, así como una disminución en la precipitación anual del 10 al 22% para ese mismo periodo (2090), con épocas de estiaje que podrían alcanzar hasta una reducción del 48%. Este decremento en las lluvias podría provocar el aumento de periodos intensos de sequía, disminución en la productividad de las actividades agropecuarias con una consecuente reducción en la producción de alimentos, así como una mayor frecuencia de incendios forestales (Galindo, 2007).

La sequía es considerada la anomalía climática más preocupante a escala mundial (Sauchyn, 2004; Hagman, 1984), sin embargo, carece de un consenso en su definición debido a la multiplicidad de causas y a la gran variedad de formas en que puede presentarse (Martín y Barriendos, 1995).

De acuerdo con algunos investigadores, la sequía no es una anomalía climática, sino parte del sistema climático global (Hernández *et al.*, 2007). Resulta normal entonces que exista un gran número de definiciones sobre la sequía, dependiendo generalmente de la disciplina que la aborda. Wilhite y Glantz (1985) recopilaron más de 150 definiciones de sequía, categorizándola en cuatro grupos: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica. En este texto nos referiremos a la sequía meteorológica que, de acuerdo con el Vocabulario Meteorológico Internacional de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), es "la ausencia prolongada o déficit notable de precipitación". Con base en esta definición, la sequía meteorológica es entendida como un fenómeno meteorológico que se presenta cuando la lluvia o el escurrimiento natural en un periodo dado es menor al valor normal (Russell *et al.*, 1970; Hernández *et al.*, 2000).

Para determinar el inicio de una sequía meteorológica, los objetivos y enfoque del estudio especifican el grado de partida del promedio de precipitación o alguna otra variable climática en un periodo de tiempo, y es obtenido al comparar la situación actual con el promedio histórico, y a menudo está basado en un periodo de registro de al menos 30 años (Valiente, 2001).

El interés de estudiar la variabilidad climática en el sur de la península de Yucatán (sur de los estados de Quintana Roo y Campeche), surge debido a que esta zona se encuentra doblemente expuesta a los

embates de la variabilidad climática: la ocurrencia de huracanes y sequías (Orellana *et al.*, 2009).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, la mayor parte de la península de Yucatán presenta un clima cálido sub-húmedo con temperatura promedio anual de 25.8 a 26.3° C y ocurrencia de lluvias en verano y otoño (junio-noviembre), con un gradiente de precipitación general de seco hacia el noroeste (600 mm) y más húmedo hacia el sureste (1 400 mm), clasificado como Aw (García, 1988; Strahler, 2008; Orellana *et al.*, 2009). Las precipitaciones que se presentan son principalmente convectivas y por influencia de los vientos alisios que traen humedad del Atlántico (Strahler y Merali, 2008; Orellana *et al.*, 2007). Durante la época de verano, la presencia de huracanes en el Atlántico genera lluvias en la costa al aproximarse a ésta, y su influencia se va debilitando gradualmente a medida que el centro de baja presión avanza hacia el interior.

También es importante mencionar que en la mayor parte de la península, incluida nuestra zona en estudio, se presentan dos periodos de sequía: la pre-estival o de primavera, que abarca un periodo de dos a cuatro meses (entre enero y abril), y la intra-estival o canícula que se presenta durante julio y agosto (Orellana *et al.*, 2009). Esta última se debe a perturbaciones en los vientos alisios. En verano se presenta un sobrecalentamiento del mar en la porción tropical del Pacífico oriental, por debajo de la zona intertropical de convergencia, lo cual debilita el gradiente barométrico y, por ende, disminuye la intensidad de los alisios. Lo anterior trae como consecuencia una disminución en la frecuencia y cantidad de lluvia, así como un patrón bimodal del régimen pluvial en los territorios que afecta (Magaña *et al.*, 1999).

Los huracanes y las sequías son una constante de la variabilidad de las precipitaciones en la península. De acuerdo con el Índice de Severidad (IS)¹ de

¹ El cálculo del índice de severidad para cada año en el periodo estudiado (1950-1980), se realizó con los datos de precipitación, comparados con sus respectivas medias y se clasificó en siete grados: extremadamente severo (mayor de 0.8), muy severo (0.6 a 0.8), severo (0.5 a 0.6), muy fuerte (0.4 a 0.5), fuerte (0.35 a 0.4), leve (0.2 a 0.35) y ausente (<0.2), (Sancho *et al.*, 1980).

áreas de México vulnerables a la sequía meteorológica² (Hernández *et al.*, 2000), la península de Yucatán actualmente está catalogada como una de las cinco zonas del país con sequía severa (región noroeste) y con sequía fuerte (zona sur). Quintana Roo y Campeche son de los estados más vulnerables a la sequía meteorológica donde más del 75% de su territorio se ve afectado (99.77 y 75.22%, respectivamente) y esta situación tiende a empeorar (*Ibid.*).

El interés por realizar este estudio deriva de los resultados obtenidos por el proyecto “New Knowledge About Ecosystem Level Response to Increased Frequency of Large-Scale Natural Disturbance Driven by Climate Change (EDGY)”, realizado por las Universidades de Rutgers, la de Clark, la de Virginia y por el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). El proyecto EDGY tuvo como objetivo recopilar y analizar información sobre los efectos del Huracán Dean –ocurrido en agosto de 2007– en el entorno natural y social del sur de la península de Yucatán. Este estudio arrojó diversos resultados muy interesantes, parte de ellos derivados de las 350 entrevistas a campesinos en la zona de estudio. El análisis de estas entrevistas mostró –entre otros resultados– que, si bien los huracanes son un fenómeno considerado como peligroso y dañino para los modos de vida de los campesinos, hay otro fenómeno natural que los preocupa y afecta también: las sequías. Por ello, se consideró importante realizar una evaluación cuantitativa de la sequía meteorológica en la zona a partir del análisis de la variabilidad interanual de las lluvias, aspecto no abordado hasta el momento, pese a su impacto en las vidas y actividades productivas de los campesinos del sur de la península de Yucatán. Vale la pena señalar que se ha abordado ya el tema de las sequías en la zona a través de sus efectos en la agricultura, como lo hacen García Acosta *et al.* (2004), pero no se ha evaluado cuantitativamente la sequía meteorológica, objetivo de este estudio.

Por lo que respecta a la selección de las estaciones meteorológicas para esta investigación, es importante señalar que la misma se llevó a cabo

² Se refiere como “sequía meteorológica” a una disminución en la precipitación de acuerdo con la media registrada a lo largo de los años 1950-1980.

tomando en cuenta la calidad y temporalidad de los datos. Inicialmente se ubicaron 25 estaciones meteorológicas de la Red de Estaciones Climáticas de la CONAGUA en la zona en estudio, sin embargo, algunas sólo contaban con datos de periodos de tiempo muy cortos o tenían muchos años sin registros, lo que hacía imposible su análisis. Fueron únicamente nueve las estaciones que presentaban series de tiempo de al menos 30 años y menor ausencia de registros de años continuos, por lo que dichas estaciones fueron seleccionadas para esta investigación. De esta forma es necesario recalcar que, si bien existen muchos años sin registros de precipitación entre nuestras estaciones, también éstos son los únicos datos con los que se cuenta en la zona en estudio ya que, por ejemplo, la Red de Estaciones Agroclimáticas de Quintana Roo y Campeche del INIFAP inició operaciones a partir del 2005, por lo que sus datos no serían útiles para establecer tendencias a largo plazo; de este modo fue necesario utilizar los datos existentes, incluso si presentaban años con ausencia de registros.

El objetivo en este artículo es analizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación anual y estacional en el sur de la península de Yucatán en un periodo de tiempo de 35 años aproximadamente, a través de la identificación de sequías, el cálculo de las anomalías en la precipitación y la estimación de las tendencias de precipitación.

DATOS Y MÉTODOS

Datos de precipitación

Se utilizaron los registros de precipitación mensuales de la Red de Estaciones Climatológicas de los estados de Quintana Roo y Campeche (CONAGUA) que cubren un periodo aproximado de 54 años (1953-2007). Se realizó un control de calidad de los datos, basado en revisiones de registros diarios, cálculos mensuales, eliminación de años que tuvieran algún mes sin registro, etc. Con base en estos datos mensuales se estimó la precipitación anual, la precipitación durante la estación seca (febrero a abril) y la precipitación durante la estación húmeda (junio a octubre) para cada año de información disponible de nueve estaciones climatológicas seleccionadas en

la zona en estudio (Figura 1). Se realizó una revisión de las estaciones ubicadas en la zona en estudio, tomando en cuenta la cantidad de datos disponibles y la existencia de registros de por lo menos treinta años, dependiendo del análisis realizado, ya que si se desea realizar un análisis de tendencias confiable es aconsejable tener una serie de tiempo no menor a 30 años (Hans y Zwiers, 1999).

Para describir el clima de la región se crearon climatologías para las nueve estaciones. Las climatologías representan el clima promedio en términos de promedios mensuales o estacionales de temperatura y/o precipitación (Ayllón, 2003). Para estimarlas se calculan los promedios de lluvias para cada mes o estación (seca, lluviosa) tomando en cuenta un periodo de tiempo. En este estudio se tomaron en cuenta datos de 1965 al 2000.

Para hacer comparables las estaciones es necesario considerar el mismo periodo de años para estimar las climatologías y posteriormente poder aplicar el método quintil y establecer los rangos de sequía, por lo cual se intentó establecer un periodo de tiempo en el cual la mayoría de las estaciones contaran con datos.

Anomalías en la precipitación

Las anomalías en la precipitación son la diferencia de la precipitación observada en un año, mes o periodo específico "i", (P_i) respecto al promedio (\bar{P}) (climatología, que se obtuvo del periodo 1965 - 2000):

$$\text{Anomalía} = (P_i - \bar{P}) \text{ (en mm)}$$

La anomalía expresada en porcentaje expresa el correspondiente al déficit o superávit de precipitación respecto al promedio:

$$\text{Anomalía} = (P_i - \bar{P}) / \bar{P} \times 100 \text{ (en \%)}.$$

Se calcularon las anomalías anuales y estacionales para las nueve estaciones durante todos los años con datos disponibles dado que, como estos cálculos se hacen utilizando las climatologías que sí son comparables entre las estaciones y para lo que es necesario usar un periodo de tiempo homogéneo, en el caso de las anomalías ya no es necesario

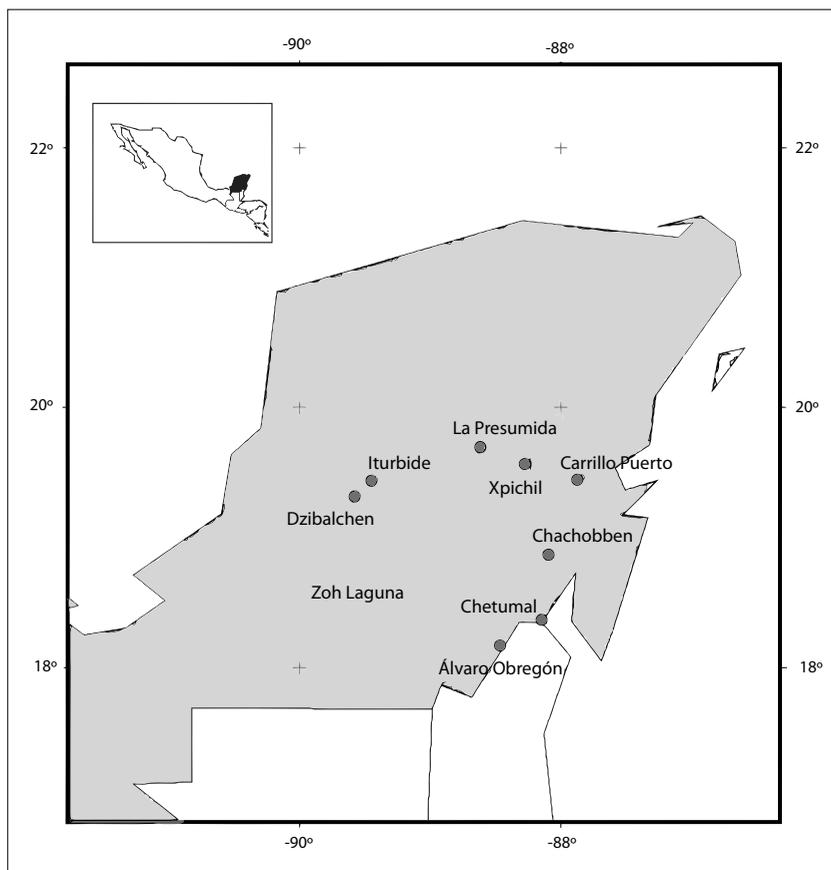


Figura 1. Mapa de la península de Yucatán, donde se muestran las nueve estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.

establecer un periodo homogéneo debido a que la intención no es comparar unas con otras. Las anomalías negativas fueron utilizadas para identificar años de sequía, tomando a una sequía como la precipitación por debajo de la media, con las anomalías se obtuvieron únicamente años de sequía, pero la severidad de éstas fue obtenida mediante el método de quintiles.

Estimación de tendencias de precipitación

Las tendencias son cambios graduales de incremento o disminución de la precipitación a través de los años (Méndez *et al.*, 2007). Para estimar estas tendencias se aplicó la ecuación de regresión lineal (ERL) ($y=ax+b$), donde la variable independiente (x) son los años y la variable dependiente (y) las lluvias estimadas a través de los años. El coeficiente “a” muestra el cambio de las precipitaciones a lo largo de un periodo de tiempo, el cual es expresado en milímetros por año (mm/año); si

el coeficiente “a” es positivo, las precipitaciones tienden a aumentar, y si es negativo tienden a disminuir. Para estimar las tendencias, tanto anuales como estacionales, se consideró a partir del año de la llamada “transición climática” 1976/77, conocido en la literatura de clima como el año que marca un cambio en los patrones de circulación atmosférica en el Océano Pacífico, y que tuvo incidencia en los cambios de temperatura global (Fröhlich y Lean, 1998). Así mismo, también fue elegido debido a que algunos análisis previos que se realizaron mostraron una tendencia más fuerte a partir de 1976. Se utilizó el mismo periodo (1976-2002) para todas las estaciones, con el fin de hacer comparables los cambios en la precipitación entre las diversas estaciones.

Para la evaluación del rendimiento de las regresiones lineales de las tendencias se utilizaron los índices de Error Absoluto Medio (EAM), Índice de Concordancia “d” (Willmott, 1981) y para el

análisis de significancia se utilizará la prueba T de Student.

Identificación de sequías por el método de quintiles

El método de quintiles se utiliza para categorizar las precipitaciones de cada año con base en seis categorías. Este método consiste en ordenar de menor a mayor los valores de la precipitación anual del periodo 1965-2000 dividiéndose la cantidad de años disponibles entre 5, de modo que se forman seis rangos: sequía extrema, sequía moderada, sequía leve, año normal, año lluvioso y año muy lluvioso (Pinaya y Tesoro, 1997). Los valores de precipitación anual adicionales al periodo de 1965-2000 en cada estación son posteriormente evaluados de acuerdo con estos seis rangos establecidos, identificando así la intensidad de las sequías/lluvias para todos los años.

RESULTADOS

Climatologías y precipitación anual y estacional promedio

La climatología describe de forma general los patrones de precipitación en la zona en estudio. Las climatologías del sur de la península muestran un promedio de precipitación anual que va desde 948 mm (estación Zoh Laguna, en la zona sur-oeste de la península), hasta los 1 499 mm (Felipe Carrillo Puerto, en la zona centro-este; Figura 2). Estas

climatologías presentan un gradiente de humedad que va de más a menos en dirección este a oeste, es decir, que va decreciendo de la Costa del Caribe hacia la zona centro de la península.

Durante la estación lluviosa, los valores de precipitación promedio varían desde los 647.8 mm (Zoh Laguna, al centro-sur de la zona en estudio y de la península) hasta los 958.6 mm (La Presumida, al centro-norte de la zona en estudio). Durante la temporada seca, los valores de precipitación promedio más bajos se registran nuevamente en la zona centro de la península (estación Zoh Laguna), y el mayor valor de la precipitación promedio, en la estación Chachobben, ubicada en la parte centro-este de la península. Se utilizó la desviación estándar (DS) para visualizar la variabilidad de las precipitaciones con respecto al promedio, siendo Carrillo Puerto y Dzibalchen las estaciones con mayor DS, y Zoh Laguna e Xpichil las estaciones con menor variación en la precipitación peninsular.

Para dar un ejemplo de la climatología anual obtenida para cada una de las estaciones, y visualizar la canícula de medio verano, se presenta el caso de la estación Zoh Laguna. Esta estación fue seleccionada debido a que es la que cuenta con los datos más completos y es también la estación que presenta la menor precipitación en la zona en estudio.

En la Figura 3 se puede observar que marzo representa el mes más seco, con una precipitación menor a 25 mm, y septiembre el mes más lluvioso con alrededor de 170 mm. También se puede observar la presencia, durante la estación lluviosa, de

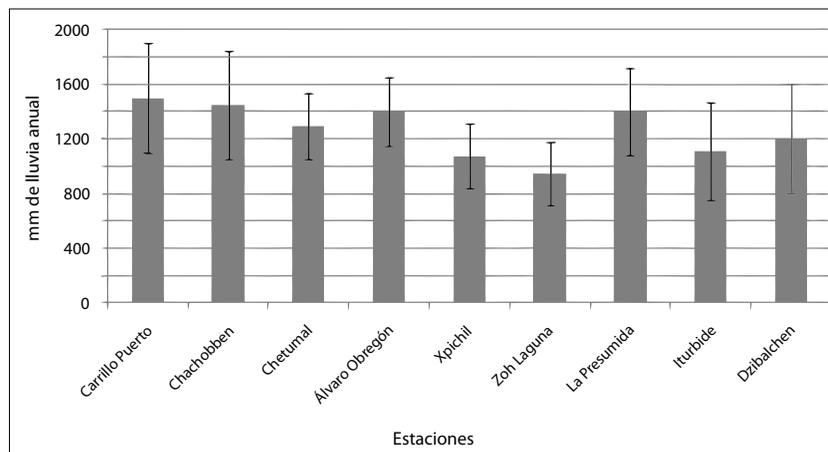


Figura 2. Precipitación promedio anual (mm) y desviación estándar para las nueve estaciones de la zona en estudio, presentadas de acuerdo con su ubicación, con un patrón este-oeste.

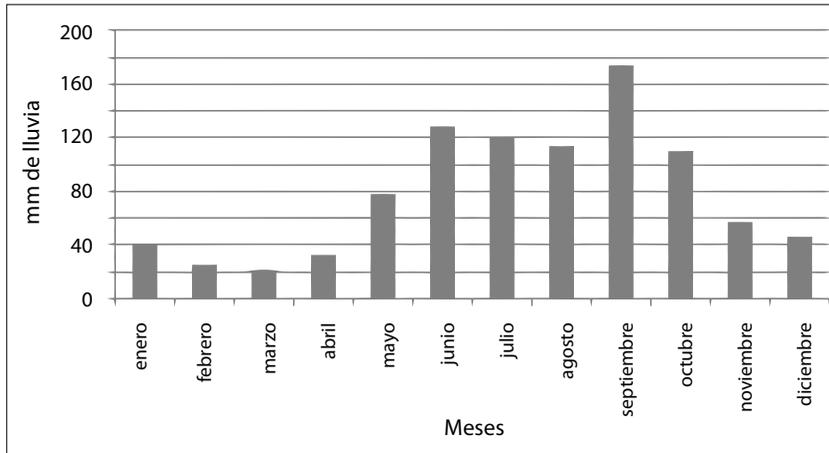


Figura 3. Climatología de la estación Zoh Laguna, Campeche del periodo 1965-2000.

la canícula o sequía de medio verano durante los meses de julio y agosto.

Anomalías de la precipitación anual y estacional

El análisis de las anomalías (Figura 4) muestra que, en 1986, cuatro de las nueve estaciones analizadas muestran los mayores valores de anomalías negativas: Chetumal (-42%), Iturbide (-44.7%), Dzibalchen (-67%) y Carrillo Puerto (-72.1%);

y durante 1994 se registraron los mayores valores de anomalías negativas para dos de las estaciones restantes: Zoh Laguna (-42%) y Álvaro Obregón (-39.5%).

La estación La Presumida presentó los mayores valores de anomalías negativas en 1992, donde registró -45%.

Los años 1986 y 1994 presentaron los mayores valores de anomalías negativas de precipitación en el 67% de las estaciones, exceptuando La Presumi-

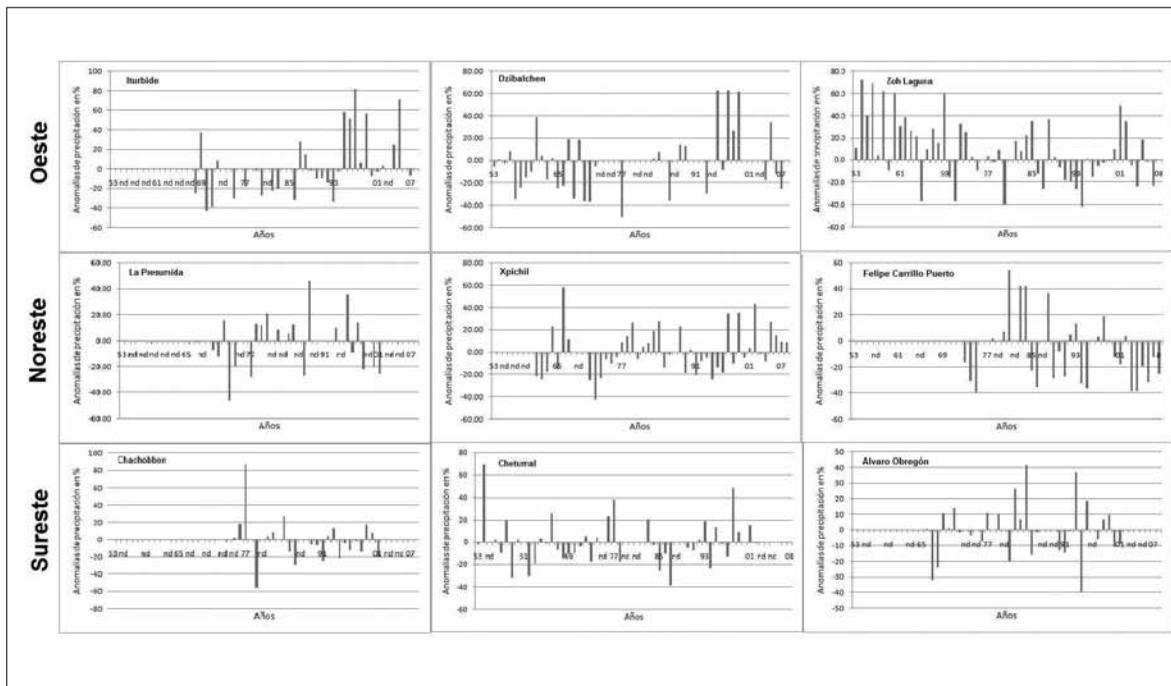


Figura 4. Anomalías de la precipitación anual en nueve estaciones meteorológicas de la zona en estudio, periodo 1953-2007.

da, Xpichil y Chachobben. Esta última muestra la mayor anomalía negativa de precipitación en todo el periodo estudiado (-56.5% en 1979). Estos resultados serán reafirmados más adelante mediante la categorización de las sequías utilizando el método de quintiles.

Análisis de tendencias

Tendencias anuales

Las tendencias de precipitación anual (Figura 5) muestran que la parte este presenta el mayor coeficiente de disminución (-12 mm/año), mientras que las estaciones ubicadas en la zona centro de la península registran una tendencia estable, y la región oeste de la zona en estudio (Iturbe y Dzibalchen) presenta un aumento aparente en la precipitación promedio anual. Sin embargo, estos resultados no son exactos ya que podrían estar influenciados por la falta de datos; cabe aclarar que el resto de las estaciones ubicadas en esa porción de la península presentaban registros máximos de diez años en la mayoría de los casos, motivo por el cual se decidió seleccionar dichas estaciones, aunque presentaran estos vacíos.

Los resultados muestran un gradiente de tendencias en la zona, que varía desde una disminución de las lluvias anuales cerca a la costa, y que van estabilizándose en el centro de la península hasta un aumento significativo de la precipitación en las estaciones de la zona occidental. Este patrón espacial puede observarse también en la Figura 8a.

Para la evaluación del rendimiento de las regresiones lineales de las tendencias se utilizaron los índices de Error Absoluto Medio (EAM), Índice de Concordancia “d” (Willmott, 1981) y para el análisis de significancia se utilizó la prueba T de Student. Los valores de EAM varían entre 150 y 250 mm para los datos anuales y los valores de “d” varían entre 0.03 y 0.6. Los valores de p al aplicar la prueba T varían de 0.02 lo que muestra una alta significancia de la regresión, hasta 0.8 con una significancia menor dependiendo si las precipitaciones son anuales o estacionales (estación lluviosa y seca).

Tendencias durante la estación lluviosa

Las tendencias de precipitación de la estación lluviosa (Figuras 6 y 8b) indican que la estación lluviosa es la que muestra las mayores tendencias

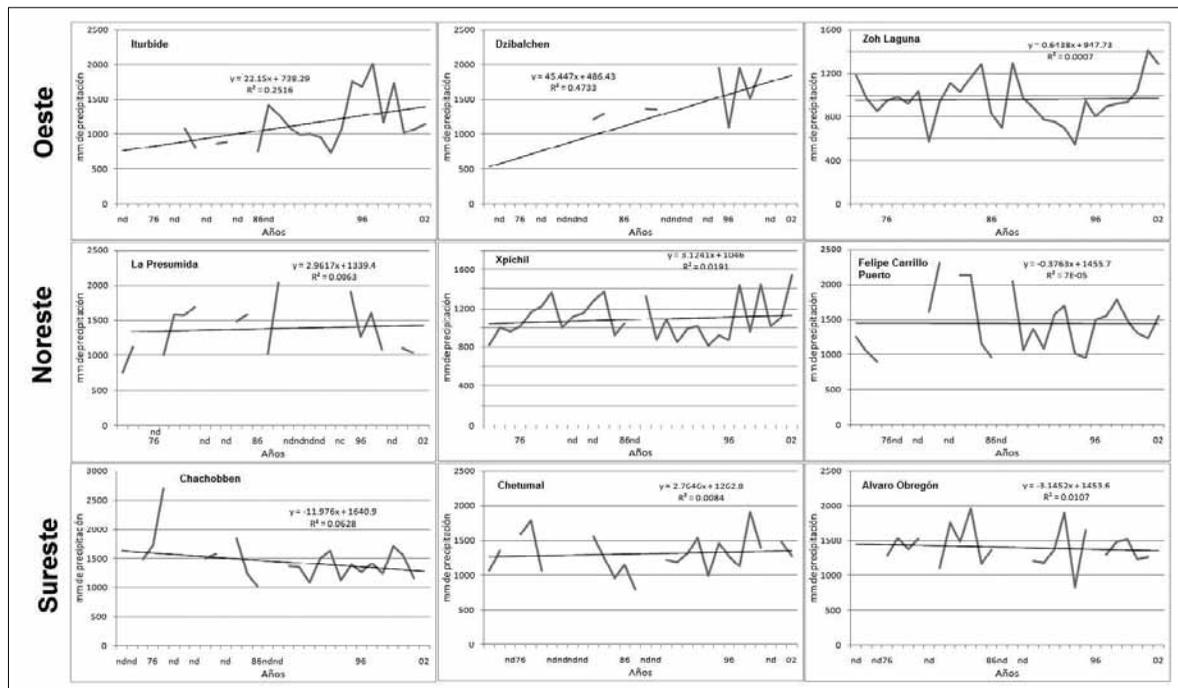


Figura 5. Tendencias anuales de precipitación de nueve estaciones de la zona en estudio, periodo 1973-2002.

negativas, comparadas con la precipitación anual y la estación seca. Se observa una disminución de precipitación a través de los años en la mayoría de estaciones localizadas en la zona centro y este, con tendencias negativas de hasta -11.97 mm (estación Chachobben). Solamente dos estaciones (Iturbe y Dzibalchen), ubicadas en la zona oeste, muestran un aumento de la precipitación a través de los años, sin embargo, cabe recordar que éstas son precisamente las estaciones que cuentan con los vacíos en su información, tanto en años discontinuos como es el caso de Iturbe y como en años continuos en el caso de Dzibalchen, lo que podría estar influyendo en el resultado.

Tendencias durante la estación seca

Durante la temporada seca (Figuras 7 y 8c), la precipitación en el 67% de la zona en estudio se presenta de estable a positiva, teniendo como máximo la tendencia en la estación Dzibalchen que alcanza un aumento de 3 mm anuales en promedio. El 30% restante, que son las estaciones ubicadas al este y cercanas a la costa (Chachobben, Felipe Carrillo

Puerto y Álvaro Obregón) presentan tendencias de precipitación negativas que alcanzan -2.2 mm.

Clasificación de las sequías en la zona en estudio

El método de los quintiles permitió identificar y clasificar las sequías a través de los años (Figura 9). Las sequías extremas se registraron en los años 1970-1973, 1985-1987 y 1994-1995. Durante la estación lluviosa, las sequías ocurrieron principalmente en los años 1986 y 1994 para ocho de las nueve estaciones.

Los años de sequías extremas identificados son 1970, 1972, 1973, 1975, 1977, 1979, 1987 y 1994. En la mayoría de las estaciones se puede observar cómo a partir de 1984, aproximadamente, los años lluviosos y muy lluviosos comienzan a ser menos frecuentes, y los años con algún grado de sequía se incrementan. Tomando como ejemplo la estación Zoh Laguna, se puede observar de una forma más evidente un cambio en la ocurrencia de sequías a través de los años, siendo frecuente encontrar años lluviosos o muy lluviosos en los

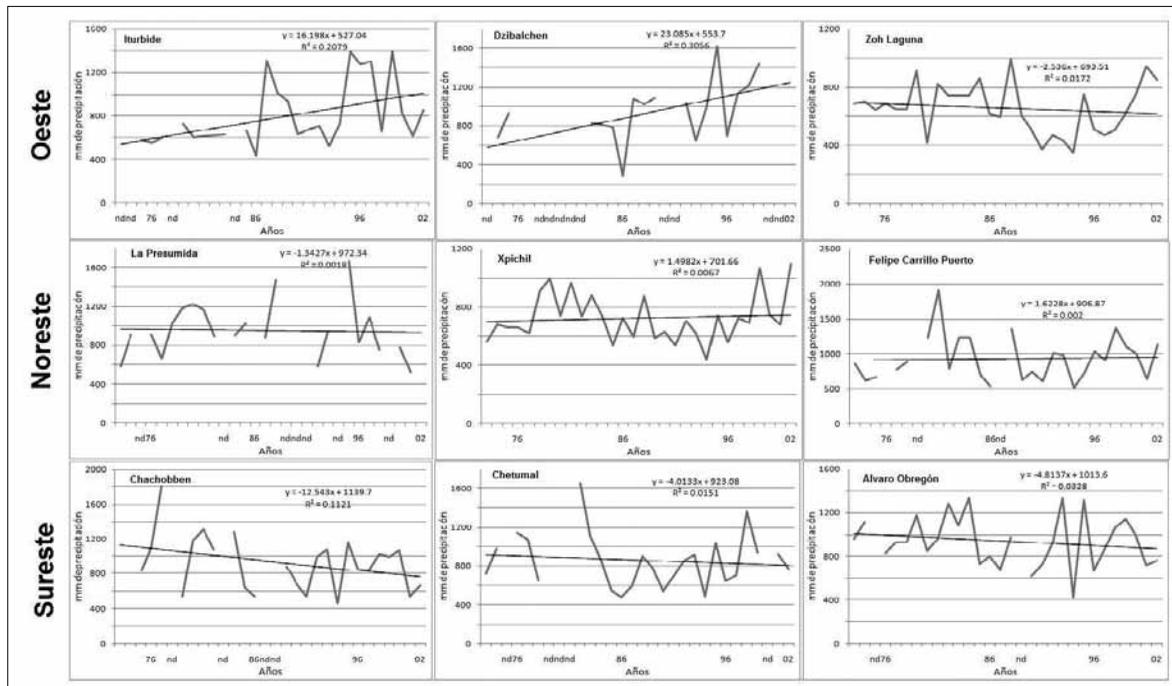


Figura 6. Tendencias de precipitación de la temporada lluviosa (junio-octubre) de nueve estaciones de la zona en estudio, periodo 1973-2002.

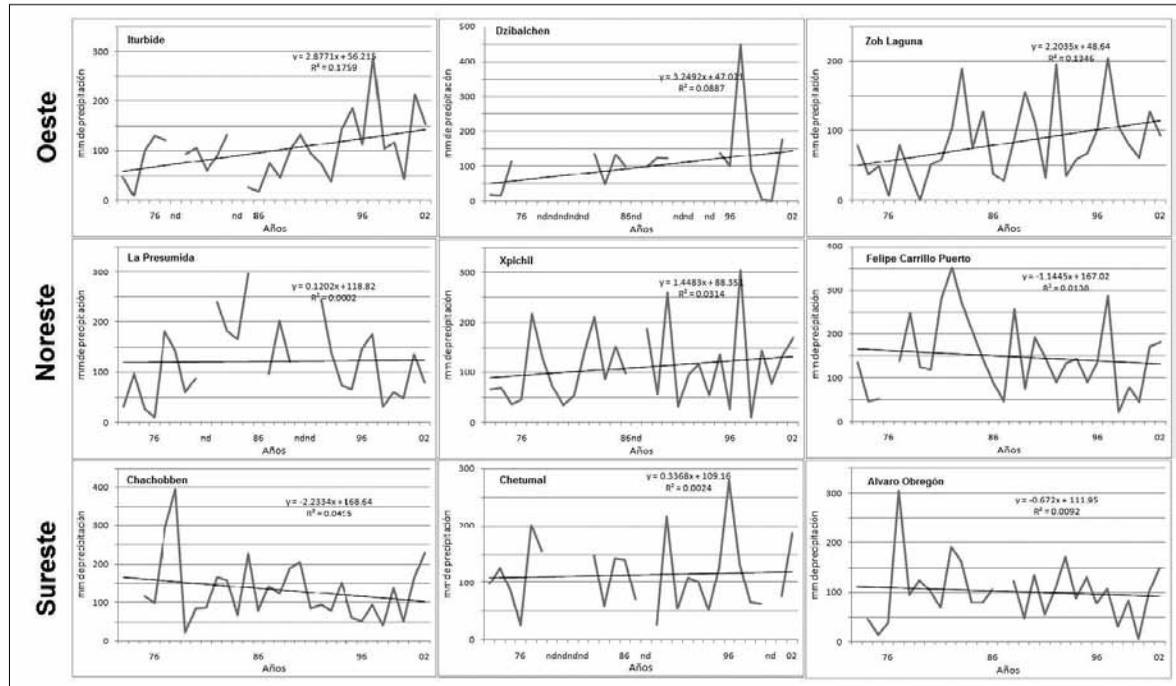


Figura 7. Tendencias de precipitación de la estación seca (febrero-abril) de nueve estaciones de la zona en estudio, periodo 1973-2002.

años previos a 1986, y una mayor frecuencia de sequías en los años posteriores.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran una gran variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en el sur de la península de Yucatán durante el periodo 1953-2007. Los mayores valores de precipitación y anomalías positivas se observan en la costa, la cual se encuentra más expuesta a la influencia de los vientos alisios que transportan masas de aire húmedo y caliente, principalmente en la época de verano, y van disminuyendo gradualmente en dirección hacia el centro-oeste de la zona. En gran parte de la zona en estudio se observa una reducción de la precipitación a través de los años, especialmente en la época de lluvias, que llega hasta valores de -12 mm/año en la estación Chachobben. Ya que los años identificados como sequías extremas son distintos en la mayoría de las estaciones, es necesario hacer hincapié en un punto muy

importante acerca de las características espaciales de la sequía. Aun cuando la sequía puede afligir a una región en general, sus efectos específicos en una población o área en particular, pueden ser muy impredecibles. Los motivos principales de la disminución de la precipitación en la zona podrían ser diversos, y podrían o no estar relacionados al cambio climático antropogénico surgido gradualmente desde la revolución industrial (Wisner *et al.*, 2007). Investigaciones establecen como principal causa el Cambio Climático Global, refiriéndose generalmente al calentamiento global que puede presentar una relación inversa o directa con la disminución de lluvias, dependiendo de las características climáticas y ambientales de cada región (Heller y Muthukumara 2002; Wisner *et al.*, 2007; Burgin y Berdegué 2009).

Por otro lado, a partir del siglo XXI se habla de una posible relación entre el oscurecimiento global, definido como la disminución de la radiación solar que llega a la superficie debido al aumento de aerosoles en la atmósfera y el aumento de las sequías en algunas regiones. Una menor fuente de

energía solar significaría menores cantidades de evaporación y por lo tanto una disminución de lluvias; en el caso de la región de Yucatán, podría tratarse de un aumento de aerosoles debido a los incendios forestales que generan una reducción de la radiación solar en la región (Stanhill y Moreshet, 2004; Liepert, 2002). Otro factor a considerar en la disminución de las lluvias es la deforestación, que provoca una menor fuente de evapotranspiración para producir la humedad y formación de nubes y por ende una disminución en la precipitación (Shukla *et al.*, 2008; Kanae *et al.*, 2001). Werth y Avissar (2002) afirman que la deforestación adicionalmente podría provocar una disminución de la radiación neta en la superficie debido al aumento del albedo. Un aumento en el albedo produce una disminución de la radiación neta que provoca una menor evaporación, lo que podría causar una disminución en las precipitaciones (Shinjiro *et al.*, 2001). De acuerdo con Rueda (2010), las tasas de deforestación en el sur de la península de Yucatán entre 1990 y 1997 le valieron ser clasificada por un grupo de expertos como un *hot spot* de la deforestación tropical (Archad *et al.*, 1998). Desde 1984/87/88 y 2000, periodo a partir del cual mapas comparables de clasificación de cubierta vegetal están disponibles (Turner *et al.*, 2004; Schmook *et al.*, 2011), 743 km² fueron deforestados, cerca del 4.7% del bosque original en la zona. Entre 1984 y 1993 el 2.9% de la cubierta forestal se redujo (Chowdhury y Schneider, 2004) y en el periodo siguiente, 1993-2000, 1.8%.

Las evidencias de teleconexiones encontradas en diversas regiones del mundo, nos hace pensar que podría existir una relación entre la ocurrencia de sequías con variables atmosféricas y oceánicas de otras regiones remotas. Una de las teleconexiones más importantes es la de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), la cual provoca una serie de impactos en los climas de diversas regiones del mundo, en forma directa o a través del efecto del “puente atmosférico” (influencia del ENSO en otros índices de teleconexión y/o en otros océanos), (Ropelewski y Halpert 1996; Alexander *et al.*, 2002). Teniendo en cuenta que algunos años de sequías en la península de Yucatán coinciden con años de El Niño o La Niña (por ejemplo, 1994-1995 que registra

la sequía más severa en la zona y coincide con un aumento importante en la temperatura del mar provocado por El Niño), sería muy importante realizar un estudio con mayor detalle de las posibles teleconexiones que podrían influir en el clima de la península.

Sin embargo, hay quienes afirman que la variabilidad de las precipitaciones ha sido una constante en la historia climática de la península. Algunos investigadores como Mendoza y colegas (2006) afirman que las sequías siempre han estado presentes en la vida de los pobladores de la zona Maya, que abarca los estados de Quintana Roo, Campeche, Chiapas, Tabasco y Yucatán en México, en los países Centroamericanos Belice, Guatemala, Honduras y El Salvador. Los libros del *Chilam Balam*³ contienen registros que datan del imperio Maya sobre la ocurrencia de sequías en términos de su relación con hambrunas, migraciones, guerras y demás catástrofes, ya que probablemente los mayas no hicieron registros de precipitación, ni de ningún otro parámetro físico (Me-Bar *et al.*, 2003). Sin embargo, ya sea que exista actualmente un aumento de las sequías en la zona o no, las tendencias de precipitación sí mostraron ir a la baja en el 66% de las estaciones, principalmente en la temporada lluviosa.

Diversos estudios sobre escenarios de cambio climático actuales y futuros para el país en general (Hernández *et al.*, 2007) y para la península en particular (Orellana *et al.*, 2009) muestran que gran parte de ésta presenta un Índice de Severidad de Sequía que va desde *fuerte* en la zona centro y sur hasta *severo* en la zona noroeste, y proyectan que la intensidad de este fenómeno se incremente en la mayoría de los escenarios.

A pesar de enfocarse en la sequía meteorológica, es indispensable que en las futuras investigaciones se haga mayor énfasis en la sequía socioeconómica, ya que la mayor importancia en el estudio de la ocurrencia de las sequías radica en los efectos que éstas tienen sobre la población. Conocer cómo

³ *Chilam Balam* es el nombre de varios libros que relatan la historia de la civilización maya escritos en lengua maya, por personajes anónimos, durante los siglos XVII y XVIII en la península de Yucatán y que tomaron el nombre de la población en donde fueron, cada uno de ellos, escritos.

las sequías afectan a la población y las acciones de adaptación de los diferentes grupos sociales ante sus efectos es un paso fundamental hacia el diseño de políticas de mitigación, socorro y programas de apoyo ante desastres (Endfield y Fernández, 2002). Asimismo, es importante analizar también los efectos que tienen los distintos tipos de sequía (meteorológica, hídrica) en las poblaciones animales y vegetales.

De este modo, este estudio es un aporte a mejorar el conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación de la región, lo cual es esencial en la evaluación del cambio climático y los recursos hídricos de la región, y sirve de base a diversas disciplinas asociadas al estudio de las actividades como la agricultura, la conservación de recursos, y la adaptación de la población a la ocurrencia de sequías.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Gordon y Betty Moore (Financiamiento #1697) por el presupuesto otorgado para esta investigación, así como al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por la beca otorgada al primer autor para estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Alexander, M. A., I. Blade, M. Newman, J. R. Lazante, N. C. Lau and J. D. Scott (2002), "The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans", *Journal of Climate*, no.15, American Meteorological Society, pp. 2205-2231.
- Achard, F., H. D. Eva, A. Glinnin, P. Mayaux, T. Richards and H. J. Stibig (1998), *Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics: synthesis of the results of an expert consultation meeting*, Publication of the European Communities, Luxembourg.
- Ayllon, T. (2003), *Elementos de Meteorología y Climatología*, 2a. ed., Trillas, México.
- Bárcena, A., A. Prado, H. Beteta, J. L. Samaniego y J. Lennox (2010), "La economía del Cambio Climático en Centroamérica", *Síntesis 2010*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Burgin, M. J., J. Berdegué, M. Aguirre, R. Medina y M. Ramírez (2009), "Adaptación local al cambio climático y dinámicas territoriales rurales", *Informe*, Gobierno del Estado de Michoacán, SEDRU, p. 62.
- Chowdhury, R. and L. C. Schneider (2004), "Land cover and land use: classification and change analysis", in Turner, B. L. II, J. Geoghegan and D. Foster (eds.), *Integrated land-change science and tropical deforestation in the Southern Yucatán Final Frontiers*, Oxford University Press, Oxford.
- Endfield, G. and I. Fernández (2002), "Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua", *Climatic Change*, vol. 75, no. 4, pp. 391-419.
- Fröhlich, C. and J. Lean (1998), "The sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976", *Geophys. Res. Lett.*, 25, pp. 4377-4380.
- Galindo, L. M. (2007), "Economía del Cambio Climático en México", Informe Galindo, *Síntesis*, Gobierno Federal, SEMARNAT, México.
- García Acosta, V., J. M. Pérez Zevallos y A. Molina del Villar (2004), *Desastres agrícolas en México*, Catálogo histórico, I. Épocas prehispánica y colonial (958-1822), Fondo de Cultura Económica, México.
- García, E. (1988), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, 4ª ed., Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Hagman, G. (1984), *Prevention better than cure: report on human and natural disasters in the Third World*, Swedish Red Cross, Estocolmo, Suecia.
- Hans, V. S. and F. W. Zwiers (1999), "Statistical analysis in Climate Research", Cambridge University Press [<http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam032/98017416.pdf>: 25 de enero de 2011].
- Hare, W. L. (2003), "Assessment of knowledge on impacts of Climate Change – Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC: impacts of ecosystems, food production, water and socio-economic systems" [http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex01.pdf: 2 de febrero de 2011].
- Heller, S. P. y M. Muthukumara (2002), "La adaptación al cambio climático", *Revista Finanzas & Desarrollo*, Fondo Monetario Internacional, vol. 39, núm. 1, pp. 29-31.
- Hernández Cerda, M. E., L. A. Torres Tapia y G. Valdéz Madero (2000), "Sequía meteorológica; México: una visión hacia el siglo XXI", *El cambio climático en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Hernández Cerda, M. E., G. Carrasco Anaya y G. Alfaro Sánchez (2007), *Mitos y realidades de la sequía en México*, Temas Selectos de Geografía de México (I.6.3), Instituto de Geografía, UNAM, México.

- IPCC (2007), *Climate change 2007: the physical science basis*, Contribution on Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Press University, New York.
- Kanae, S., T. Oki and K. Musiak (2001), "Impacts of deforestation on regional precipitation over the Indochina Peninsula", *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, vol. 2, no. 1, pp. 1-20.
- Liepert, B. (2002), *Impacts of aerosols on the hydrological cycle in ECHAM4 experiments*, Max-Planck Institute Visiting Scholar Fellowship by Max-Planck Society (PI).
- Magaña, V., J. Amador and S. Medina (1999), "The Midsummer Drought over Mexico and Central America", *Journal of Climate*, American Meteorological Society, vol. 12, no. 6, pp. 1577-1588.
- Magrin, G. O., M. L. Travasso, M. O. Grondona y G. R. Rodríguez (2007), "Variabilidad climática, cambio climático y sector agropecuario", s/d.
- Martín Vide, J. and M. Barriendos Vallvé (1995), "The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain)", *Climatic Change*, vol. 30, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 201-221.
- Me-Bara, Y. and F. Valdéz (2003), "Droughts as random events in the Maya lowlands", *Journal of Archaeological Science*, vol. 30, no. 12, pp. 1599-1606.
- Méndez González, J., J. Nívar Cháidez y V. González Ontiveros (2007), "Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004)", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 65, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 38-55.
- Mendoza, B., V. García Acosta, V. Velasco, E. Jáuregui and R. Díaz Sandoval (2007), "Frequency and duration of historical droughts from the 16th to the 19th centuries in the Mexican Maya Lands, Yucatán Peninsula", *Climatic Change*, no. 83, pp. 151-168.
- Orellana, R., C. Espadas, C. Conde y C. Gay (2009), *Atlas Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán*, Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán y Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, Mérida, Yucatán, México.
- Pinaya, M. y G. Tesoro (1997), *Zonificación agroclimática de los riesgos de sequía en el altiplano paceño utilizando modelos de simulación*, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Ropelewski, C. F. and M. S. Halpert (1996), "Quantifying Southern Oscillation - Precipitation Relationships", *Journal of Climate*, American Meteorological Society, no. 9, pp. 1043-1059.
- Rueda, X. (2010), "Understanding deforestation in the southern Yucatán: insights from a sub-regional, multi-temporal analysis", *Reg Environ Change*, no. 10, pp. 175-189.
- Russell, C. S., D. G. Arey and R. W. Kates (1970), *Drought and water supply*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA.
- Sancho y Cervera, J., Z. F. Zavala, V. M. Sánchez y V. V. Martínez (1980), *Monitoreo de sequías y heladas*, Comisión del plan nacional hidráulico, Dirección de inventarios de agua y suelo, proyecto IA 800, México.
- Sauchyn, D. J. (2004), "The Paleoclimate Record. Section 2.3", in Barrow, E., B. Maxwell and P. Gachon (eds.), *Climate variability and change in Canada: past, present and future*, ACS Science Assessment Series, no. 2, Meteorological Service of Canada, Environment Canada, Toronto, Ontario, pp. 7-9.
- Schmook, B., R. Palmer Dickson, F. Sangermano, J. M. Vadjunec, J. R. Eastman and J. Rogan (2011), "A step-wise land-cover classification of the tropical forests of the Southern Yucatán, Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, Remote Sensing and Photogrammetry Society, vol. 4, no. 32, pp. 1139-1164.
- Shinjiro, K., K. Wonsik, A. Yasushi, O. Taikan and M. Katumi (2001), "Hydrological simulation by SiB2-Paddy in the Chao Phraya River basin, Thailand. Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models", *Proceedings of a Symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht*, The Netherlands, July, IAHS Publ. no. 270, pp. 19-26.
- Shukla, J., C. Nobre and P. Sellers (2008), "Amazon deforestation and climate change", *Science, American Association for the Advancement of Science*, vol. 247, no. 4948, pp. 322-325.
- Stanhill, G. and S. Moreshet (2004), "Global radiation climate changes in Israel", *Climatic Change*, no. 22, pp. 121-138.
- Strahler, A. and Z. Merali (2008), *Visualizing physical geography*, Wiley Visualizing y The National Geographic Society.
- Turner, B. L. II, J. Geoghegan and D. Foster (eds.; 2004), *Integrated landchange science and tropical deforestation in the Southern Yucatán final frontiers*, Oxford University Press, Oxford.
- Valiente, O. M. (2001), "Sequías: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación", *Investigaciones Geográficas*, núm. 26, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante, pp. 59-80.
- Werth, D. and R. Avissar (2002), "The local and global effects of Amazon deforestation", *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, vol. 102, no. 20, pp. 1-8.

- Wilhite, D. A. and M. H. Glantz (1985), "Understanding the drought phenomenon: the role of definitions", *Water International*, vol. 10, pp. 111-120.
- Willmott, C. (1981), "On the validation of models", *Physical Geography*, no. 2, pp. 181-194.
- Wisner, B., M. Fordham, I. Kelman, B. Johnston, D. Simon, A. Lavell, H. Günter, U. Oswald, G. Wilches-Chaux, M. Moench and D. Weiner (2007), *Cambio climático y seguridad humana*, Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina [<http://www.desenredando.org/public/articulos/2007/clim-change/CCySH.pdf>: 6 de febrero de 2011].