

Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México

Possible Effects of Climate Change on the Cocoa Producing Region of Tabasco, Mexico

Eduardo PÉREZ SOSA*

Programa de Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México
México

Guadalupe Rebeca GRANADOS RAMÍREZ

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México
México

Resumen

La producción de cacao en México ubica al país como uno de los principales productores a nivel mundial. Tabasco es la entidad que mayor superficie destina a su producción, con cerca de 40,869 ha, concentrándose principalmente en la subregión de la Chontalpa. El objetivo de este trabajo es calcular los indicadores agroclimáticos para el ciclo reproductivo del cacao y sus posibles alteraciones bajo escenarios de cambio climático (RCP4.5)¹ en el horizonte de tiempo 2015-2039. Para la floración del cacao, en la región productora de Tabasco, se requiere un promedio de 926 unidades fototérmicas (u.f.), 1,130 u.f. para la fructificación, y 1,047 u.f en la etapa de madurez, además, se requieren aproximadamente 2,760 unidades calor (u.c.) para completar el ciclo reproductivo, y nueve meses de periodo húmedo con menos de dos meses de déficit hídrico en el suelo. Por lo que las condiciones climáticas en la región de la Chontalpa son las adecuadas para el ciclo fenológico del cacao. Los resultados de los escenarios de cambio climático muestran que las temperaturas aumentarán en ese lapso en promedio 1°C, mientras que las precipitaciones disminuirán entre 100 y 200 mm del total anual, con 4 a 5 meses de precipitaciones menores a 100 mm. Este escenario climático ocasionaría un aumento en la evapotranspiración potencial (ETP) entre 3 y 5 meses (entre enero y mayo) y los posibles efectos del déficit hídrico por efectos del cambio

* Estudiante de la Maestría en Geografía.

¹ La ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 es un escenario que estabiliza el forzamiento radiactivo a 4.5 W m⁻² en el año 2100 sin exceder ese valor. Simulado con el Modelo de Evaluación de Cambio Global (GCAM), RCP4.5 incluye emisiones globales a largo plazo de gases de efecto invernadero, especies de vida corta y uso de la tierra en un marco económico global.

climático en la fenología del cacao son: la inhibición de la floración, la producción de vainas más pequeñas y la madurez temprana del fruto.

Palabras clave: cacao; requerimientos agroclimáticos; cambio climático

Abstract

Cocoa production in Mexico places the country as one of the leading worldwide producers. The state of Tabasco has the largest cocoa cultivated field area with 40,869 ha, clustered in Chontalpa. The main objective of this study consisted of calculating agroclimatic indicators for the cocoa reproductive cycle and its alterations under RCP4.5 climate change scenarios in the 2015-2039 horizon. In the Tabasco producing region, an average of 926 photothermal units are needed for the flowering of cocoa; 1 130 units for fruiting; and in the maturity stage 1,047 units; in addition, approximately 2,760 heat units are required to complete the reproductive cycle, and at least nine months of wet period with less than two months of soil water deficit. Therefore, Tabasco's region is an ideal location for this crop. Climate change scenarios show modifications in the current climatic conditions. Temperatures will rise 1°C on average; however, the annual rainfall amount will decrease between 100-200 mm, as well, its inter-annual variation 4-5 months with less than 100 mm of rainfall will appear. As a result of this potential evapotranspiration between January and May will increase. The possible effects that the water deficit due to climate change can cause on cocoa's phenological cycle can become an impediment of flowering, size pod reduction, and early ripe fruit.

Keywords: cocoa; agroclimatic requirements; climate change

Introducción

La producción de cacao en México lo ubica en el 13° lugar entre los países productores a nivel mundial, con una aportación de 27,287 toneladas anuales (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018). Costa de Marfil, Ghana e Indonesia son territorios que ocupan los primeros lugares con más del 70% de la producción a nivel mundial (International Cocoa Organization [ICCO], 2018). Actualmente, México satisface el 41.22% de los requerimientos nacionales con producción interna, lo que significa una dependencia de importaciones provenientes de Ecuador, Costa de Marfil, República Dominicana, Colombia y Ghana (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2017; SIAP, 2018). Para México, se estima un aumento en el consumo del 76.97% y un aumento en la producción del cacao en 19.49% para 2030 (SAGARPA, 2017). Los estados de Tabasco, Chiapas,

Guerrero y Oaxaca son los principales productores de cacao en el país (SIAP, 2018). Tabasco encabeza la producción nacional con 17,430 toneladas al año en 40,869 ha y obtuvo rendimientos entre 0.45 y 0.47 ton/ha en promedio entre 1999 y 2017 (SIAP, 2017; SIAP, 2018). Los municipios con mayor participación son Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán y Huimanguillo (SIAP, 2018).

Los elementos del clima más importantes para las plantas son la radiación solar, temperatura y la disponibilidad de agua (Arteaga y Romo González, 1983; Campos Aranda, 2005). El clima es quizá el factor más importante para la agricultura, ya que factores edáficos, de relieve o genéticos pueden modificarse y adaptarse (Pascale y Damario, 2004). Por ejemplo, la fertilidad de los suelos, la exposición u orientación en la que se establecen los cultivos o la selección de variedades mejoradas, pueden adecuarse para obtener calidad en el fruto, mayores rendimientos y resistencia a plagas. De la misma forma que el clima ayuda a que la vegetación llegue a su óptimo desarrollo, también puede ser un factor limitante para el cultivo, por lo tanto, deben ponerse atención a las condiciones ambientales.

La radiación solar es la fuente de energía para que se lleven a cabo funciones en los organismos vegetales. Las plantas suelen responder a las diferentes duraciones diarias de luz solar y dependiendo de esa respuesta se clasifican en plantas de fotoperiodo largo, corto o indiferente. Por sus requerimientos fototérmicos, el cacao se considera una planta de fotoperiodo corto y es típicamente umbrófilo (Arteaga y Romo González, 1983; Enríquez, 1985; Campos Aranda, 2005; ICCO, 2018).

La temperatura influye en el crecimiento vegetativo del cacao y es de vital importancia en las etapas de floración y desarrollo del fruto (De Almeida y Valle, 2007). El umbral térmico mínimo para la etapa de floración es de 25°C (Enríquez, 1985; Ministerio de Agricultura y Riego, 2012). Sin embargo, la formación de flores tiene su óptimo alrededor de los 27°C (Gómez M. y Azócar, 2002). Para la etapa en la que se desarrolla el fruto, se ha observado que su crecimiento y maduración se logra con mayor rapidez con temperaturas máximas de 32°C y mínimas de 22°C (Burgos y Reyes, 1965). Se ha documentado que, en lugares menos cálidos, la maduración del fruto oscila entre 167 y 205 días y, en zonas más cálidas, con temperaturas promedios entre 25° y 26°C. Las mazorcas maduran entre 140 y 175 días (Leal, Avilán y Valderrama, 1999; Johnson, Bonilla y Agüero Castillo, 2008).

El cacao necesita de lluvias uniformemente repartidas a lo largo del año, con un rango de precipitación óptimo oscilando entre 1,500 y 2,800 mm anuales (Dostert, Roque, Cano, La Torre y Weigend, 2011), con un mínimo mensual de 100 mm (Hardy, 1960; Enríquez, 1985; Suárez Venero, 2006; Árvulo Sánchez, González León, Maroto Arce, Delgado López y Montoya Rodríguez, 2017; ICCO, 2018). En tanto, Suárez Venero (2006) señala que es más importante la frecuencia de las lluvias que la precipitación total. Además, Leal *et al.* (1999) recalcan que, en las regiones cacaoteras del mundo, la precipitación excede a la evapotranspiración entre siete y nueve meses del año. De todos los factores que inciden en el establecimiento de las plantaciones de cacao, su rendimiento y producción, la temperatura, la precipitación, el agrupamiento de

suelos y su profundidad son los más relevantes (Suárez, Florido Bacallao, Soto Carreño y Caballero Núñez, 2013; Suárez Venero, Soto Carreño, Garea Llanos y Solano Ojeda, 2015).

Actualmente el tema de cambio climático ha adquirido importancia en torno al aumento en la frecuencia y severidad de altas temperaturas, excesos de lluvias o intensificación de las sequías, lo que podría agravarse; se piensa que puede repercutir en la productividad, las prácticas agrícolas, el cambio de uso del suelo, la adaptación de cultivos, las fronteras agrícolas, entre otros (Nelson, Rosegrant, Koo, Robertson, Sulser, Zhu, Ringler, Msangi, Palazzo, Batka, Magalhaes, Valmonte, Ewing y Lee, 2009; Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL], 2011; Altieri y Nichols, 2013; López Feldman y Hernández Cortés, 2016; Ángeles Hernández y Montiel Gutiérrez, 2018; Vega Nevárez, 2018). Diversos son los estudios que han abordado los impactos ambientales que tendrán las áreas productoras de cacao debido a la variación climática y el cambio climático, principalmente en Ghana, Costa Rica, Libia, Indonesia y Costa de Marfil (Läderach, Martínez-Valle, Schrot y Castro, 2013; Torquebiau, Manley y Cowan, 2015; Abdulai, Vaast, Hoffmann, Asare, Jassogne, Van Asten, Rötter y Graefe, 2018; Benkeblia, McHenry, Crisp y Roudier, 2018; Bunn, Lundy, Wiegel, y Castro-Llanos, 2019). En cuanto a las zonas productoras de México, Centroamérica y Caribe, estos estudios aún son pocos (Eitzinger, Farrell, Rhiney, Carmona, Van Loosen y Taylor, 2015; Hutchins, Tamargo, Bailey y Kim, 2015).

Existe una tendencia metodológica relevante en los estudios de cambio climático y cacao; por un lado, algunos estudios se valen de variables climáticas provenientes de las bases de datos de WorldClim (www.worldclim.org) en formato ráster a una resolución de 30" de arco (aproximadamente 926m x 926m) para construir el clima base en las áreas de estudio; dichas bases se combinan con variables bioclimáticas anuales. Sin embargo, los cambios climáticos no se aplican a partir del estado fenológico. Por otra parte, algunos trabajos utilizan los 19 modelos de circulación global IPCC (2013) para los escenarios de intermedio a extremo (RCP6.0 y RCP8.5) al periodo 2040-2069 para obtener los valores de cambio climático. Los datos climáticos son asociados a registros georreferenciados de plantaciones para emplearlos en algoritmos como Maxent o *Random Forest* (Läderach *et al.*, 2013; Schroth, Läderach, Martínez-Valle, Bunn y Jassogne, 2016; Bunn, Läderach, Quaye, Muilerman, Noponen y Lundy, 2019; Fischer, Tramberend y van Velthuisen citado en Tramberend, 2020). Los resultados son aprovechados para el diagnóstico de cambio en las áreas de potencial agrícola para el cacao y evaluar los posibles impactos del cambio climático. Por lo anterior se hace necesario identificar la influencia del clima futuro en las diversas etapas fenológicas clave del cacao.

Ante esta situación cabe preguntarse, ¿cuáles son los requerimientos agroclimáticos del cacao en la principal región productora de México? ¿Cuáles serían los cambios por efecto de cambio climático? Por lo anterior, objetivo de este trabajo es calcular los indicadores agroclimáticos para el ciclo reproductivo del cacao y sus alteraciones bajo escenarios de cambio climático RCP4.5 en el horizonte 2015-2039.

Área de estudio

Los municipios productores de cacao que constituyen el área de estudio son Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán y Huimanguillo que pertenecen a la subregión Chontalpa en el estado de Tabasco (Figura 1).

La región de estudio se caracteriza por amplias planicies con algunas elevaciones y suelos originados por aluviones *in situ* y suelos marinos (López Güemez, Palma González, Hernández Rivera, Ojeda Morales, Ángeles Padilla, Ruiz Nájera. y García Marín, 2007); son el Cambisol, Gleysol y Vertisol los que sustentan la mayoría de las plantaciones de cacao. El clima es poco variable, se presentan condiciones térmicas en torno a 26°C con lluvias de 2500 mm anuales y veranos muy lluviosos (Ruiz-Álvarez, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, Ontiveros Capturada y López-López, 2012). García (2004) indica que debido a su ubicación en el trópico húmedo, la cercanía al Golfo de México y por tener un terreno plano, posee climas cálidos. En la mayoría del territorio tabasqueño las precipitaciones son bimodales; es decir, se presentan dos picos máximos de precipitación al año —junio y octubre—. De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite y Papadakis se reconoce como caliente y húmedo (Campos Aranda 2005; Ruiz-Álvarez *et al.*, 2012).

Materiales y métodos

En este trabajo se utilizó el método agroclimático, que se basa en la relación de los elementos del clima (radiación, temperatura y agua; de este último se considera la precipitación y evapotranspiración potencial) y el ciclo de vida de las plantas. Para llevar a cabo dicho método se requieren datos climáticos y fenológicos. Por un lado, las bases de datos climáticos se obtuvieron del Sistema CLICOM del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California [CICESE] (2019), para las variables de temperatura media, máxima, mínima y la precipitación a nivel diario. Dicha información fue validada para garantizar que las bases fueran suficientes, integra, coherentes y homogéneas. Los criterios de confiabilidad fueron los siguientes: 1) Contar como mínimo 30 años de información; 2) no contar con más del 20% de información faltante en su registro histórico; 3) resultados favorables en la prueba de homogeneidad.

Como primer paso se verificó la congruencia lógica y espacial de la información mediante la implementación de rutinas desarrolladas y almacenadas en macros de Excel con el fin de detectar registros atípicos como precipitaciones negativas, temperaturas máximas menores a las temperaturas mínimas y viceversa (Guajardo, Granados, Sánchez, Díaz y Barbosa, 2017; Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018). Posteriormente, se descartaron las estaciones con datos menores a 30 años dado que es el periodo de referencia que establece la OMM (2019) para estudios relacionados con cambio climático. De la misma manera, se siguieron las directrices que la OMM

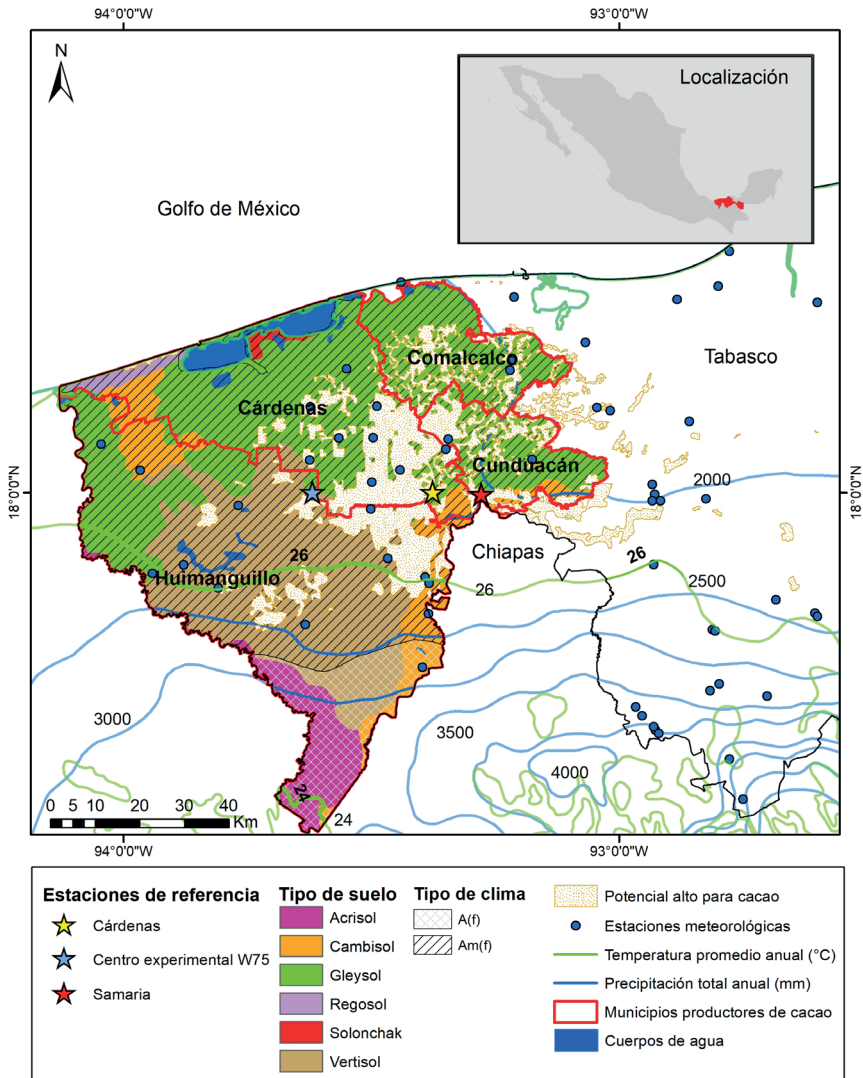


Figura 1. Área de estudio. Elaborada por los autores con base en García y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (1998); Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2014); SAGARPA (2012)

establece con respecto a los datos faltantes. Por tanto, la estimación de datos faltantes se realizó mediante aproximaciones lineales, tomando en cuenta las observaciones inmediatas anteriores y posteriores al periodo a estimar. Por último, se realizó la prueba de homogeneidad a las series de datos de las estaciones que cumplieron con los estándares anteriores. La homogeneidad y sus pruebas estadísticas identifican cambios

significativos en la media, es decir, se busca que las series sean consistentes, lo que implica que los datos medidos pertenecen a la misma población estadística (Campos Aranda, 2015). Las bondades o desventajas que tiene emplear los métodos de prueba de homogeneidad dependen de la distribución de frecuencia de los datos: si existe un comportamiento normal o gaussiano, se usan métodos paramétricos, si no es el caso, entonces se utilizan métodos no paramétricos (OMM, 2018; Campos Aranda, 2015). Entre los métodos paramétricos se encuentran las pruebas del cociente de Geary, Shapiro-Wilk y Fisher. Los métodos no paramétricos son las pruebas de Mann-Kendall, Siegel-Tukey, Pettitt, de secuencias, Helmer o el de Buishand, que puede ser utilizado en variables con cualquier tipo de distribución (Castro y Carvajal Escobar, 2010; Campos Aranda, 2015; Guajardo *et al.*, 2017; Andrades Grassi, Torres Mantilla, López Hernández y Rojas Polanco, 2019). Para las estaciones del área de estudio se emplearon los registros de precipitación, los cuales no cumplen con una distribución normal, por lo que se realizó la prueba de Helmer, que consiste en analizar las desviaciones de cada dato de la serie original con respecto a su media a partir de la diferencia entre las secuencias y cambios formados, dentro de unos límites de error probable (Campos Aranda, 2005; Campos Aranda, 2015).

Se seleccionaron los datos de tres estaciones climatológicas dentro del área de estudio para el cálculo de los indicadores (Tabla 1 y Figura 1).

La información fenológica se obtuvo de Ministerio de Agricultura y Riego, Perú (s.f.); Villalpando Ibarra y Ruiz Corral (1993); Boulay, Somarriba y Olivier (2000); Niemenak, Cilas, Rohsius, Bleiholder, Meier y Lieberei (2010); Arbeláez Arias (2010); Ministerio de Agricultura y Riego (2011); Bridgemohan, Mohamed, Mohammed, Singh y Bridgemohan (2016); Castro Muñoz, Panduro Tenazoa, Velazco Castro e Iturraran Pinto (2017); y de datos obtenidos en campo. El trabajo en campo consistió en la visita a cinco plantaciones de cacao en la región de estudio; se aplicaron entrevistas semiestructuradas individuales a los productores de cacao. Las preguntas se enfocaron en conocer las fechas en el año en que la mayoría de los árboles se encontraban en alguna de las etapas reproductivas del cacao. De manera adicional, también se orientaron hacia la percepción de los cambios en el clima y sobre las afectaciones

Tabla 1
Estaciones de referencia en la región productora de cacao

Clave	Estación	Latitud	Longitud	Municipio	Periodo	Años efectivos de registros
27007	Cárdenas	18°00'05" N	93°37'09" W	Cárdenas	1955-2013	44
27008	Centro experimental W75	18°00'04" N	93°22'35" W	Huimanguillo	1961-2013	52
27040	Samaria	17°59'51" N	93°16'43" W	Cunduacán	1949-2013	62

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019)

que esperarían del cambio climático en la producción del cacao. Los resultados se compararon, analizaron y se asociaron las fuentes bibliográficas consultadas para construir un calendario fenológico aproximado del cacao.

Una vez que se trataron tanto los datos climáticos y los fenológicos, se calcularon los siguientes indicadores por etapa y para el ciclo fenológico del cacao:

Radiación solar. Los valores de la duración astronómica del día o fotoperiodo se obtuvieron de las tablas astronómicas de Torres Ruiz (1995; Tabla 2), mientras que las unidades fototérmicas se calcularon a partir de la siguiente fórmula:

$$UF = \frac{\sum UC * N}{10}$$

Donde:

UF: unidades fototérmicas

$\sum UC$: sumatoria de las unidades calor

N: fotoperiodo medio

Temperatura. Se analizaron las temperaturas medias, máximas y mínimas, se estimaron las unidades calor por el método residual; se tomó como referencia el cero fisiológico de los árboles frutales en ambientes cálidos que es de 12°C (Campos Aranda, 2005):

$$UC = (Tm - PC) * D$$

Donde:

UC: unidades calor para un día

Tm: temperatura media

PC: punto crítico, cero fisiológico o cero vital

D: número total de días del mes

Disponibilidad de agua. Se calcularon los valores de ETP y el balance hídrico por el método directo o empírico de Thornthwaite tomado de Almorox (2003). En el criterio de Thornthwaite, la estimación de la ETP se realiza mediante la fórmula que utiliza la temperatura media mensual (Tm) y la duración promedio del día (N):

$$ICM = \left(\frac{Tm}{5}\right)^{1.514} \quad ET = 16 \left(\frac{10Tm}{ICA}\right)^\alpha$$

Donde, ICM es el índice de calor mensual sin corregir, en milímetros. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual (ET) es necesario el índice de calor

Tabla 2
Fotoperiodo medio en el estado de Tabasco

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Latitud 17°	11.11	11.46	11.91	12.40	12.81	13.00	12.90	12.56	12.08	11.59	11.18	11.00
Latitud 18°	11.06	11.42	11.91	12.43	12.86	13.06	12.96	12.60	12.08	11.57	11.13	10.94

Fuente: Torres Ruiz (1995)

anual (ICA), que es igual a la suma de los doce índices mensuales y, el exponente α que tiene la expresión siguiente:

$$\alpha = 6.75 * 10^{-7} (ICA)^3 - 7.71 * 10^{-5} (ICA)^2 + 1.792 * 10^{-2} (ICA) + 0.49239$$

Cabe resaltar que para temperaturas mayores de 26°C no hay influencia del índice de calor anual, por lo que la evapotranspiración potencial está en función de la temperatura media mensual (Tm); por lo tanto, se tomaron los valores correspondientes de ETP sin corregir de Campos Aranda (2005). Finalmente para la corrección de los valores se emplea la fórmula:

$$ET = FC_N * ET$$

Donde, FC_N es el factor correctivo mensual que considera el número de días del mes (D) y la insolación del lugar (N), cuya expresión es:

$$FC_N = \left(\frac{D}{30}\right) * \left(\frac{N}{12}\right)$$

El balance hídrico se calculó por el método directo de acuerdo con lo citado por Almorox (2003) para cada estación de referencia. El método consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros:

- **P:** precipitación media mensual
- **ETP:** evapotranspiración potencial
- **P – ETP:** es la diferencia entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). Corresponde al balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua en el suelo. La diferencia clasifica a los meses en secos ($P - ETP < 0$) o húmedos ($P - ETP > 0$)
- **R:** reserva de agua en el suelo. Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas, el agua sobrante pasará a engrosar la reserva del suelo; por el con-

trario, cuando las salidas sean mayores que las entradas se reducirá la reserva del suelo. Así, la reserva del mes se calcula agregando los incrementos ($P - ETP$) cuando estos son positivos, donde la reserva en el mes “i”, en función del mes anterior ($i - 1$) será:

$$a) R_i = R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \text{ Si } 0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i) < R_{max}$$

$$b) R_i = R_{max} \text{ Si } R_{i-1} + (P_i - ETP_i) > R_{max}$$

$$c) R_i = 0 \text{ Si } 0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i)$$

Los valores de la reserva se irán acumulando mes a mes en el periodo húmedo, según los incrementos de $P - ET > 0$, y disminuyendo al llegar al periodo seco; la reserva nunca tendrá un valor mayor que la reserva máxima (100 mm) ni un número negativo. Es necesario conocer la reserva del mes anterior para comenzar la estimación, por lo que se asigna un valor hipotético al mes y se realizan los ciclos anuales de cálculo (aunque en el acomodo de los datos se tenga un mes inicial y uno final) hasta que la hipótesis de la que se parte se confirme al final del ciclo. Se asume que después del periodo seco la reserva de agua en el suelo es nula, en consecuencia se empieza el cálculo de la reserva de agua con el primer mes del periodo húmedo y se asigna al mes anterior una reserva nula (Almorox, 2003).

- **VR:** es la variación de la reserva o del agua almacenada. Es la diferencia entre la reserva del mes en el que se está realizando el cálculo y la reserva del mes anterior; si resulta un signo positivo significa reposición de humedad en el suelo y si tiene un signo negativo indica utilización de la humedad del suelo. La fórmula es:

$$VR_i = R_i - R_{i-1}$$

- **ETR:** evapotranspiración real. Es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes, dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar o no a la ETP. La evapotranspiración real en el periodo húmedo va a ser igual a la evapotranspiración potencial:

$$ETR_i = ETP_i$$

Mientras que para el periodo seco, el agua que se evapora será el agua de la precipitación más la que se extrae del suelo, es decir, la variación de la reserva (la reserva

que queda menos la que había en el mes anterior; como tendrá signo negativo, se toma el valor absoluto), entonces:

$$ETR_i = P_i + VR_i$$

- **F**: falta o déficit de agua. Es el volumen de agua que falta por cubrir las necesidades potenciales de la vegetación, cuya fórmula es:

$$F_i = ETP_i - ETR_i$$

- **Ex**: exceso de agua. Es el agua que excede de la reserva máxima y que se perderá por escorrentía superficial o profunda. Se debe tener presente que sólo puede haber exceso si la precipitación ha compensado previamente la evapotranspiración real, es decir, en los meses húmedos. Se ocupará la fórmula que corresponde a cada condición según sea el caso:

$$a) Ex_i = (P_i - ETP_i - VR_i) Si (P_i - ETP_i) > 0$$

$$b) Ex_i = 0 Si Si (P_i - ETP_i) \leq 0$$

Para los escenarios de cambio climático, se extrajeron los datos mensuales de temperatura y precipitación en formato *Geotiff* con resolución espacial de 926 x 926 metros, de la página de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales [UNIATMOS] (2015) donde se seleccionó la Trayectoria de Concentraciones Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 que representa un forzamiento radioactivo de 4.5Wm² que se estabiliza después del año 2100, con una concentración de 538 partes por millón (p.p.m) de CO₂ y 650 p.p.m. de CO_{2e} (dióxido de carbono más metano, óxido nitroso y los gases fluorados) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013; IPCC, 2015) para los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES en el horizonte de tiempo de 2015-2039. El horizonte 2015-2039 se eligió ya que se pretende conocer los efectos a corto plazo con un escenario donde las concentraciones de gases de efecto invernadero se estabilizan al final del siglo por causa de medidas de mitigación, y un aumento en la temperatura media global del aire menor a 1.4°C antes del 2045 (Thomson, Calvin, Smith, Kyle, Volke, Patel, Delgado, Lamberty, Wise, Clarke y Edmonds, 2011). Estos modelos forman parte de los escenarios que se han adaptado para el país para su empleo en estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. La metodología que utilizaron en la generación de estos escenarios la describen Fernández Eguiarte, Zavala Hidalgo, Romero Centeno, Conde Álvarez y Trejo Vázquez (2015).

Se desplegaron los archivos en un Sistema de Información Geográfica recortando el área de estudio con una máscara del límite estatal de Tabasco. Posteriormente se ocuparon los puntos correspondientes a las estaciones meteorológicas de referencia para extraer los valores de las variables. Para la temperatura, se calculó la diferencia

entre el valor promedio mensual del escenario de cambio climático y la temperatura promedio mensual en el periodo histórico de las estaciones de referencia (denominado aquí como escenario base) para cada mes del año; se promediaron los valores y se obtuvo la desviación típica. Se construyeron gráficas donde se agruparon los valores mensuales del escenario base y de los dos modelos correspondientes a las tres estaciones de referencia para un año y en el periodo reproductivo, con el fin de comparar las fluctuaciones de las temperaturas. Los datos de precipitación de los modelos de cambio climático se emplearon para calcular la evapotranspiración potencial y el balance hídrico.

Resultados

Ciclo fenológico del periodo reproductivo del cacao

Arbeláez Arias (2010) menciona que el ciclo fenológico del cacao se compone por los periodos de reposo, vegetativo, reproductivo y de cosecha. El reproductivo es el de interés para esta investigación debido a que el producto comercial es el resultado de la culminación de ese periodo (cacao en grano). Se compone por las siguientes etapas (Figura 2):

- 1) Botón floral: los botones tienen cerca de un centímetro de tamaño, aparecen en las partes viejas o troncos maduros. Generalmente se presentan pasados los tres años de vida; en híbridos interclonales la floración puede ser más temprana.
- 2) Floración: es la apertura de los botones florales; las flores permanecen abiertas por un corto tiempo para ser fecundadas. El cacao difícilmente se puede autofecundar, normalmente se poliniza por medio de insectos.
- 3) Fructificación: el fruto crece en tamaño (se toma en cuenta a partir de que el fruto alcance los 2 cm) como resultado de la maduración del ovario una vez fecundado.
- 4) Maduración: los frutos alcanzan su máximo tamaño y el color típico de la variedad. El tiempo de maduración del fruto varía por genotipos y ambiente: por genotipos hay una variación de 5 a 7 meses (150-210 días); por ambiente, entre más cálido, más rápido puede madurar.

A partir de los datos obtenidos de distintas fuentes, de la información proporcionada por los productores entrevistados, y de la observación en campo (tomando en cuenta que no existe una diferenciación marcada de la fenología de las plantas, en especial las perennes), se construyó un calendario fenológico con las distintas etapas para el periodo reproductivo a lo largo de un año (Figura 3). Cabe mencionar que dicho calendario no distingue las diferentes variedades de cacao, aunque es cierto que en la mayoría de las plantaciones y en las fuentes consultadas es similar a la variedad que corresponde al criollo.

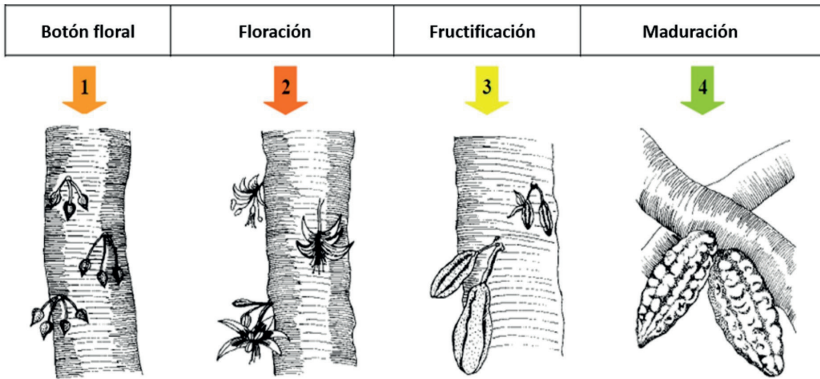


Figura 2. Etapas fenológicas del ciclo reproductivo del cacao. Fuente: Villalpando Ibarra y Ruiz Corral (1993); Ministerio de Agricultura y Riego (s.f.); Castro Muñoz *et al.* (2017).

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Fructificación		Madurez		Cosecha				Floración		Fructificación	

Figura 3. Calendario fenológico anual del cacao en la región productora de Tabasco. Fuente: Elaborado por los autores a partir de trabajo de campo.

Unidades fototérmicas

Las unidades fototérmicas combinan el fotoperiodo y las unidades calor con la fenología de los cultivos, y son utilizadas como un indicador de las necesidades de luz y temperatura que se requieren para que se cumplan las actividades biológicas por etapa fenológica o de todo el ciclo de vida de la planta. En este caso, para la floración se necesitan en promedio 926 u.f.; para la fructificación 1130 u.f. y en la etapa de madurez 1047 u.f. La demanda de unidades fototérmicas desde la floración hasta la madurez es más de 3000 (Tabla 3).

Tabla 3
Unidades fototérmicas por etapa fenológica

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	Ciclo reproductivo
Periodo	octubre-noviembre	diciembre-febrero	marzo-abril	
Unidades fototérmicas	910 - 934	1,117 - 1,153	1,014 - 1,118	3,045 - 3,170
Promedio	926	1,130	1,047	3,103

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019)

Temperaturas promedio y unidades calor

La temperatura promedio durante la floración y fructificación oscila los 25°C a 26°C con máximas entre 29°C y 32°C y mínimas que no descienden de los 19°C; lo anterior significa que el comportamiento fenológico de estas etapas sería de normal a óptimo, puesto que los rangos son parecidos a los que proponen en otras investigaciones (Burgos y Reyes, 1965; Enríquez, 1985; Gómez M. y Azócar, 2002; De Almeida y Valle, 2007; Ministerio de Agricultura y Riego, 2012; Rojas y Sacristán Sánchez, 2013).

Las unidades calor son un indicio de la cantidad de grados de temperatura que requiere la planta de cacao a lo largo de su ciclo reproductivo que le permitan su óptimo funcionamiento. Para este estudio corresponden a las etapas que constituyen el ciclo reproductivo (Tabla 4):

Tabla 4
Unidades calor y constante térmica

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	Constante térmica
Periodo	octubre-noviembre	diciembre-febrero	marzo-abril	
Unidades calor	820 - 840	1,000 – 1,040	905 - 918	2,740 -2,790
Promedio	828	1,018	914	2,760

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019).

Los resultados muestran que durante la floración son necesarias 828 u.c., mientras que para la fructificación se requieren 1,018 unidades calor. Para que suceda la madurez del fruto, las unidades calor deben rondar entre 905 y 918 u.c. En general, son estas dos últimas etapas en las que la planta de cacao necesita más unidades para su desempeño. Al final, la sumatoria de unidades calor o constante térmica desde la etapa de floración hasta la madurez del fruto oscila cerca de las 2,700 u.c.

Balance hídrico y cacao

La precipitación total anual en la región se encuentra entre los 1,900 a los 2,100 mm, rangos que se consideran dentro de los valores óptimos para el cultivo. Asimismo, se distinguen dos periodos a lo largo del año: el seco, tiene una duración de tres meses de marzo a mayo; y el húmedo, que se prolonga por nueve meses, de junio a febrero. La reserva de agua en el suelo llega a su capacidad máxima por lo menos en cinco meses del periodo húmedo. Mientras que en abril y mayo no hay agua en la reserva del suelo debido a que el agua que se ha venido acumulando, y estuvo retenida durante esos meses, se encuentra en uso (son precisamente estos dos meses en los que se presenta un déficit hídrico), por el contrario, entre 7 y 9 meses se tiene un exceso de agua tal y como lo indican Leal *et al.* (1999) (Tabla 5).

Tabla 5
Balances hídricos de las estaciones de referencia

Cárdenas										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	138,5	76,1	húmedo	62,4	100,0	0,0	76,1	0,0	62,4
Fructificación	FEB	90,2	74,1	húmedo	16,1	100,0	0,0	74,1	0,0	16,1
Maduración	MAR	42,1	93,1	seco	-51,0	49,0	-51,0	93,1	0,0	0,0
Maduración	ABR	48,4	153,9	seco	-105,5	0,0	-49,0	97,4	56,5	0,0
Cosecha	MAY	68,3	172,0	seco	-103,7	0,0	0,0	68,3	103,7	0,0
Cosecha	JUN	218,5	179,7	húmedo	38,8	38,8	38,8	179,7	0,0	0,0
Cosecha	JUL	178,6	164,9	húmedo	13,7	52,5	13,7	164,9	0,0	0,0
Cosecha	AGO	235,8	160,3	húmedo	75,5	100,0	47,5	160,3	0,0	28,0
Cosecha	SEP	338,4	144,6	húmedo	193,8	100,0	0,0	144,6	0,0	193,8
Floración	OCT	350,4	91,6	húmedo	258,8	100,0	0,0	91,6	0,0	258,8
Floración	NOV	208,0	80,0	húmedo	128,0	100,0	0,0	80,0	0,0	128,0
Fructificación	DIC	131,8	76,4	húmedo	55,4	100,0	0,0	76,4	0,0	55,4
TOTAL		2048,9	1466,7							

Centro experimental W75										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	150,3	75,4	húmedo	74,9	100,0	0,0	75,4	0,0	74,9
Fructificación	FEB	85,0	73,4	húmedo	11,6	100,0	0,0	73,4	0,0	11,6
Maduración	MAR	40,2	92,6	seco	-52,4	47,6	-52,4	92,6	0,0	0,0
Maduración	ABR	46,8	155,4	seco	-108,6	0,0	-47,6	94,4	61,0	0,0
Cosecha	MAY	64,8	175,1	seco	-110,3	0,0	0,0	64,8	110,3	0,0
Cosecha	JUN	210,3	167,4	húmedo	42,9	42,9	42,9	167,4	0,0	0,0
Cosecha	JUL	198,1	166,7	húmedo	31,4	74,3	31,4	166,7	0,0	0,0
Cosecha	AGO	242,4	162,0	húmedo	80,4	100,0	25,7	162,0	0,0	54,7
Cosecha	SEP	345,3	146,2	húmedo	199,1	100,0	0,0	146,2	0,0	199,1
Floración	OCT	375,4	91,5	húmedo	283,9	100,0	0,0	91,5	0,0	283,9
Floración	NOV	221,4	79,7	húmedo	141,7	100,0	0,0	79,7	0,0	141,7
Fructificación	DIC	141,3	76,5	húmedo	64,8	100,0	0,0	76,5	0,0	64,8
TOTAL		2121,6	1461,9							

Samaria										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	115,5	77,4	húmedo	38,1	100,0	0,0	77,4	0,0	38,1
Fructificación	FEB	76,4	74,6	húmedo	1,8	100,0	0,0	74,6	0,0	1,8
Maduración	MAR	45,1	92,8	seco	-47,7	52,3	-47,7	92,8	0,0	0,0
Maduración	ABR	42,5	151,9	seco	-109,4	0,0	-52,3	94,8	57,1	0,0
Cosecha	MAY	90,8	172,1	húmedo	-81,3	0,0	0,0	90,8	81,3	0,0
Cosecha	JUN	205,0	165,9	húmedo	39,1	39,1	39,1	165,9	0,0	0,0
Cosecha	JUL	180,3	165,0	húmedo	15,3	54,4	15,3	165,0	0,0	0,0
Cosecha	AGO	215,1	161,5	húmedo	53,6	100,0	45,6	161,5	0,0	8,0
Cosecha	SEP	319,1	147,1	húmedo	172,0	100,0	0,0	147,1	0,0	172,0
Floración	OCT	326,3	134,7	húmedo	191,6	100,0	0,0	134,7	0,0	191,6
Floración	NOV	174,7	81,4	húmedo	93,3	100,0	0,0	81,4	0,0	93,3
Fructificación	DIC	139,6	78,0	húmedo	61,6	100,0	0,0	78,0	0,0	61,6
TOTAL		1930,4	1502,4							

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019).

La disponibilidad de agua en Tabasco no representa un problema en sí. Sin embargo los factores edáficos y el cambio de uso del suelo definen si el agua es perjudicial o benéfica en la región. Las plantas de cacao reaccionan en forma sensible a la cantidad de agua en el suelo y son susceptibles a la sequedad (De Almeida y Valle, 2007). Al tratarse de una planta originaria de un ambiente tropical, requiere determinada cantidad de agua en el suelo. Hardy (1960), Smyth (1975), Leal *et al.* (1999) y Suárez *et al.* (2013) mencionan que un buen suelo para el cacao debe tener una adecuada retención de humedad todo el año y un buen drenaje que facilite que el agua en exceso se percole internamente. La profundidad también puede diferenciar un suelo bueno de uno malo. Concretamente, en la región predominan la asociación de suelos Vertisol eútrico + Gleysol eútrico, con un total de 37.11%, seguida del tipo Fluvisol eútrico con 31.27% del área total y son estos últimos, los más utilizados debido a sus características; son profundos, tienen buen drenaje, buena capacidad de almacenamiento de agua y responden a la fertilización (Ramos Reyes, Palma López, Ortiz Osorio, Ortiz García y Díaz Padilla, 2004).

Escenario RCP4.5 GFDL-CM3: cambios en las temperaturas y disponibilidad de agua

Se compararon los valores del clima base con los del escenario RCP4.5 GFDL-CM3 a través de las estaciones de referencia dentro de la región productora de cacao y se obtuvo la diferencia entre ambos (Figura 4). En promedio, el cambio de la temperatura entre el clima base y el escenario de cambio climático en las estaciones de Cárdenas y Centro experimental W75 fue de 1.1°C, con una desviación estándar de 0.73 y 0.38, respectivamente. Mientras que en Samaria el cambio promedio es de 1.3°C, con una desviación de 0.37. Solamente en el mes de junio en la estación Cárdenas hay una disminución de la temperatura promedio (-1°C).

El aumento de las temperaturas bajo este escenario muestra que los valores son más similares a los óptimos propuestos en la literatura (27°C a 28°C) que a los normales (entre 25°C y 26°C). La fructificación continuaría de manera normal ya que los cambios se mantienen dentro de los rangos estándar (entre 23°C y 26°C). Mientras que en la etapa de madurez del fruto, las temperaturas en el escenario base fluctúan entre 25°C y 28°C y para este escenario de 27°C a 29°C (Figura 5).

Por otra parte, las precipitaciones anuales en las tres estaciones son similares a las del escenario base, con rangos de entre 2,000 a 2,100 mm y una disminución de aproximadamente 100 mm del total anual (Tabla 6). Sin embargo, los valores de evapotranspiración potencial en los tres sitios aumentan; de presentar rangos de 1,400 mm (ver Tabla 5) se pasará a los 1,600 mm (ver Tabla 6). Esta situación está estrechamente relacionada con los resultados del balance hídrico, donde los resultados muestran que el periodo seco se podría presentar un mes antes de lo normal; comenzaría en febrero hasta mayo, por lo que no existiría un déficit hídrico en el suelo durante nueve meses.

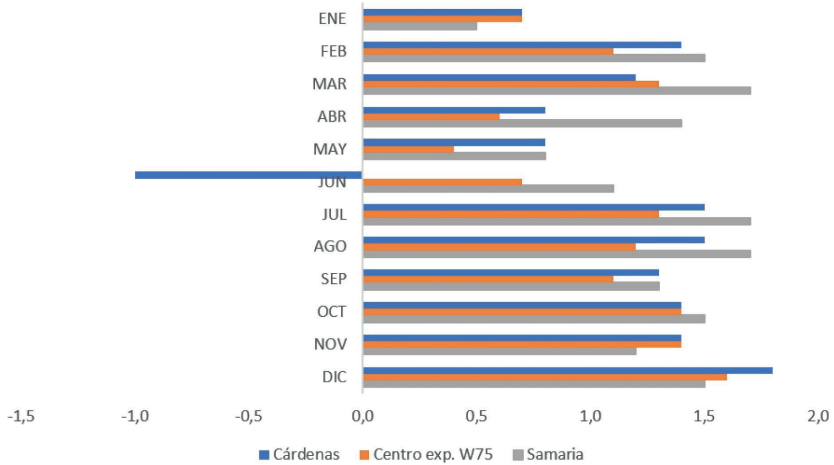


Figura 4. Cambio de temperatura mensual bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3, 2015-2039. Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019) y UNIATMOS (2015).

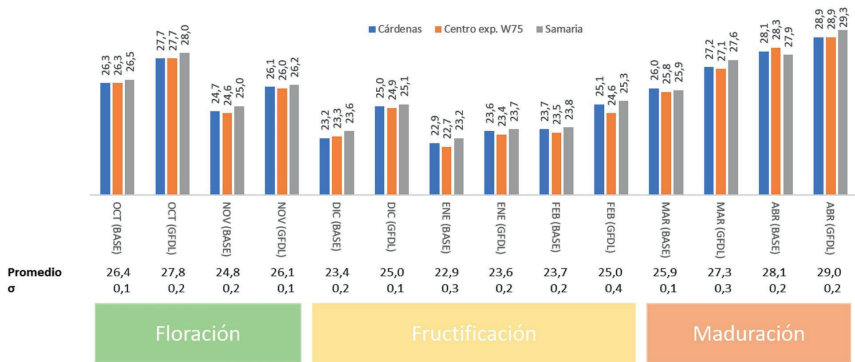


Figura 5. Comparación de las temperaturas en el ciclo reproductivo del cacao escenario RCP4.5 GFDL-CM3, 2015-2039. Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019) y UNIATMOS (2015).

Tabla 6
Balances hídricos de las estaciones de referencia bajo escenario
RCP4.5 GFDL-CM3, 2011-2039

Cárdenas											
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S	THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	124,0	78,7	Húmedo	45,3	100,0	0,0	78,7	0,0	45,3	
Fructificación	FEB	94,0	78,8	Húmedo	15,2	100,0	0,0	78,8	0,0	15,2	
Maduración	MAR	43,0	144,8	Seco	-101,8	0,0	-100,0	143,0	101,8	0,0	
Maduración	ABR	39,0	160,2	Seco	-121,2	0,0	0,0	39,0	82,1	0,0	
Cosecha	MAY	96,0	178,1	Seco	-82,1	0,0	0,0	96,0	0,0	0,0	
Cosecha	JUN	223,0	172,9	Húmedo	50,1	50,1	50,1	172,9	0,0	0,0	
Cosecha	JUL	188,0	172,9	Húmedo	15,1	65,2	15,1	172,9	0,0	0,0	
Cosecha	AGO	238,0	172,9	Húmedo	65,1	100,0	34,8	172,9	0,0	30,3	
Cosecha	SEP	344,0	172,9	Húmedo	171,1	100,0	0,0	172,9	0,0	171,1	
Floración	OCT	374,0	144,8	Húmedo	229,2	100,0	0,0	144,8	0,0	229,2	
Floración	NOV	144,0	84,8	Húmedo	59,2	100,0	0,0	84,8	0,0	59,2	
Fructificación	DIC	148,0	82,5	Húmedo	65,5	100,0	0,0	82,5	0,0	65,5	
TOTAL		2055,0	1644,3								

Centro experimental W75											
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S	THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	145,0	78,0	Húmedo	67,0	100,0	0,0	78,0	0,0	67,0	
Fructificación	FEB	78,0	77,2	Húmedo	0,8	100,0	0,0	77,2	0,0	0,8	
Maduración	MAR	42,0	143,9	Seco	-101,9	0,0	-100,0	142,0	1,9	0,0	
Maduración	ABR	47,0	160,2	Seco	-113,2	0,0	0,0	47,0	113,2	0,0	
Cosecha	MAY	86,0	178,1	Seco	-92,1	0,0	0,0	86,0	92,1	0,0	
Cosecha	JUN	242,0	172,9	Húmedo	69,1	69,1	69,1	172,9	0,0	0,0	
Cosecha	JUL	186,0	177,3	Húmedo	8,7	77,8	8,7	177,3	0,0	0,0	
Cosecha	AGO	261,0	171,6	Húmedo	89,4	100,0	22,2	171,6	0,0	67,2	
Cosecha	SEP	351,0	154,9	Húmedo	196,1	100,0	0,0	154,9	0,0	196,1	
Floración	OCT	377,0	144,8	Húmedo	232,2	100,0	0,0	144,8	0,0	232,2	
Floración	NOV	181,0	84,4	Húmedo	96,6	100,0	0,0	84,4	0,0	96,6	
Fructificación	DIC	145,0	82,1	Húmedo	62,9	100,0	0,0	82,1	0,0	62,9	
TOTAL		2141,0	1625,6								

Samaria											
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S	THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	135,0	79,4	Húmedo	55,6	100,0	0,0	79,4	0,0	55,6	
Fructificación	FEB	88,0	79,7	Húmedo	8,3	100,0	0,0	79,7	0,0	8,3	
Maduración	MAR	45,0	148,2	Seco	-103,2	0,0	-100,0	145,0	3,2	0,0	
Maduración	ABR	40,0	162,8	Seco	-122,8	0,0	0,0	40,0	122,8	0,0	
Cosecha	MAY	94,0	178,1	Seco	-84,1	0,0	0,0	94,0	84,1	0,0	
Cosecha	JUN	229,0	174,2	Húmedo	54,8	54,8	54,8	174,2	0,0	0,0	
Cosecha	JUL	183,0	178,6	Húmedo	4,4	59,2	4,4	178,6	0,0	0,0	
Cosecha	AGO	245,0	174,7	Húmedo	70,3	100,0	40,8	174,7	0,0	29,5	
Cosecha	SEP	342,0	157,1	Húmedo	184,9	100,0	0,0	157,1	0,0	184,9	
Floración	OCT	354,0	147,5	Húmedo	206,5	100,0	0,0	147,5	0,0	206,5	
Floración	NOV	169,0	85,5	Húmedo	83,5	100,0	0,0	85,5	0,0	83,5	
Fructificación	DIC	149,0	83,3	Húmedo	65,7	100,0	0,0	83,3	0,0	65,7	
TOTAL		2073,0	1649,2								

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019)

Escenario RCP4.5 HADGEM2-ES: cambios en las temperaturas y disponibilidad de agua

La temperatura cambia en promedio 1.1°C en Cárdenas y la estación Centro experimental W75, con una desviación estándar de 0.73 y 0.38. En Samaria, el cambio es de 1.3°C con una desviación de 0.37. Al igual que el escenario RCP4.5 GFDL-CM3, para el mes de junio en Cárdenas, se presenta una disminución de -1°C (Figura 6).

El comportamiento de la etapa de floración sería normal, ya que los valores de temperatura en este periodo oscilan los 24°C a 27°C. Para la etapa de fructificación, las temperaturas serían entre 23°C y 25°C. Durante la etapa de madurez las temperaturas fluctúan entre 27°C y 29°C. Este escenario es similar al GFDL-CM3 (Figura 7).

Las precipitaciones anuales en las estaciones Cárdenas y Centro experimental W75 disminuyen aproximadamente 100 mm del total anual, mientras que en Samaria aumentan 50 mm (Tabla 7). La evapotranspiración potencial anual se eleva en aproximadamente 200 mm en Cárdenas y Centro experimental W75 y 100 mm en Samaria. El balance hídrico en este escenario indica condiciones especiales en la región cacaotera de Tabasco. Por un lado, el periodo seco podría comenzar incluso en el mes de enero y prolongarse hasta mayo, es decir, tendría una duración de 4 a 5 meses. Por otro, las deficiencias hídricas en el suelo se mantienen en tres meses —de marzo a mayo— al igual que el escenario GFDL-CM3; no obstante, la duración del periodo donde se presenta el exceso de agua será de 5 a 8 meses, es decir, se reduce entre uno y dos meses en comparación con los otros escenarios.

Discusión

El método empleado en esta investigación tiene como ventajas asociar los elementos del clima que influyen en el ciclo fenológico reproductivo del cacao, para obtener valores que apoyen, no solo a satisfacer las demandas de los cultivos, sino para su zonificación, planificación agrícola y establecimiento a corto, medio y largo plazo al considerar las variaciones del clima y la influencia de otros factores. Sin embargo los resultados de este trabajo pueden ser contrastados con otros métodos como los aplicados por Suárez *et al.* (2013); Espinosa-García, Uresti-Gil, Vélez-Izquierdo, Moctezuma-López, Inurreta-Aguirre y Góngora-González (2015); Ángeles Hernández y Montiel Gutiérrez (2018) y Vega Nevárez (2018). Las desventajas radican en la disponibilidad de datos climáticos y de observaciones fenológicas confiables, especialmente de especies frutales tropicales debido a la complejidad fenológica que pueden presentar los árboles, en comparación con los cultivos anuales; una alternativa es el empleo de una escala fenológica común como las que proponen Niemenak *et al.* (2010), Bridgemohan *et al.* (2016), y De Cara García, Ruiz y Barceló (2020). En cuanto a los cambios en las variables climáticas, será necesario experimentar con otros escenarios (RCP2.5, RCP6.0

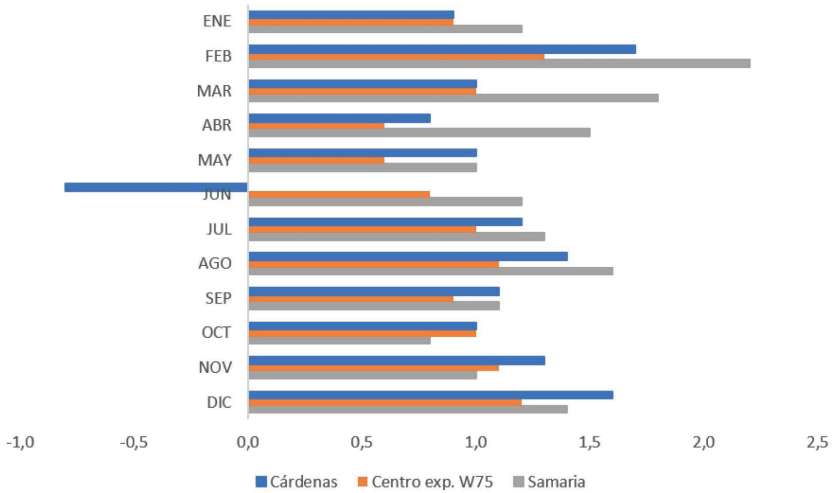


Figura 6. Cambio de temperatura mensual bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES, 2015-2039. Fuente: Elaborada por los autores on base en CICESE (2019) y UNIATMOS (2015).

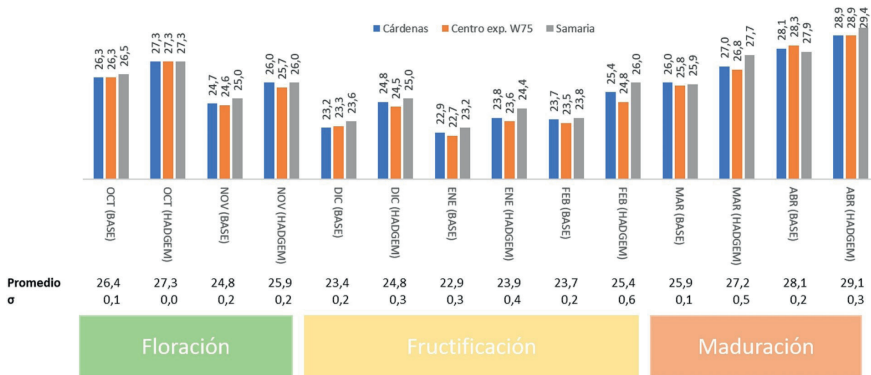


Figura 7. Comparación de las temperaturas en el ciclo reproductivo del cacao escenario RCP4.5 HADGEM2-ES, 2015-2039. Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019) y UNIATMOS (2015).

Tabla 7
Balances hídricos de las estaciones de referencia bajo escenario
RCP4.5 HADGEM2-ES, 2011-2039

Cárdenas										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	79,0	79,4	Seco	-0,4	99,6	0,4	79,4	0,0	0,0
Fructificación	FEB	50,0	79,7	Seco	-29,7	69,9	-29,7	79,7	0,0	0,0
Maduración	MAR	13,0	143,1	Seco	-130,1	0,0	-69,9	82,9	60,2	0,0
Maduración	ABR	32,0	160,2	Seco	-128,2	0,0	0,0	32,0	128,2	0,0
Cosecha	MAY	90,0	179,5	Seco	-89,5	0,0	0,0	90,0	89,5	0,0
Cosecha	JUN	237,0	174,4	Húmedo	62,6	62,6	62,6	174,4	0,0	0,0
Cosecha	JUL	204,0	175,0	Húmedo	29,0	91,6	29,0	175,0	0,0	0,0
Cosecha	AGO	239,0	171,6	Húmedo	67,4	100,0	8,4	171,6	0,0	59,0
Cosecha	SEP	355,0	153,4	Húmedo	201,6	100,0	0,0	153,4	0,0	201,6
Floración	OCT	402,0	141,5	Húmedo	260,5	100,0	0,0	141,5	0,0	260,5
Floración	NOV	139,0	84,4	Húmedo	54,6	100,0	0,0	84,4	0,0	54,6
Fructificación	DIC	115,0	81,8	Húmedo	33,2	100,0	0,0	81,8	0,0	33,2
TOTAL		1955,0	1624,0							

Centro experimental W75										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	94,0	78,7	Húmedo	15,3	100,0	0,0	78,7	0,0	15,3
Fructificación	FEB	32,0	77,8	Seco	-45,8	54,2	-45,8	77,8	0,0	0,0
Maduración	MAR	8,0	141,2	Seco	-133,2	0,0	-54,2	62,2	79,0	0,0
Maduración	ABR	41,0	160,2	Seco	-119,2	0,0	0,0	41,0	119,2	0,0
Cosecha	MAY	82,0	179,5	Seco	-97,5	0,0	0,0	82,0	97,5	0,0
Cosecha	JUN	259,0	173,6	Húmedo	85,4	85,4	85,4	173,6	0,0	0,0
Cosecha	JUL	205,0	175,0	Húmedo	30,0	100,0	14,6	175,0	0,0	15,4
Cosecha	AGO	262,0	170,9	Húmedo	91,1	100,0	0,0	170,9	0,0	91,1
Cosecha	SEP	363,0	153,4	Húmedo	209,6	100,0	0,0	153,4	0,0	209,6
Floración	OCT	409,0	141,5	Húmedo	267,5	100,0	0,0	141,5	0,0	267,5
Floración	NOV	181,0	83,4	Húmedo	97,6	100,0	0,0	83,4	0,0	97,6
Fructificación	DIC	113,0	80,8	Húmedo	32,2	100,0	0,0	80,8	0,0	32,2
TOTAL		2049,0	1616,1							

Samaria										
ETAPA	MES	PREC (mm)	ETP (mm)	H/S THORN	P-ETP (mm)	R (mm)	VR (mm)	ETR (mm)	F (mm)	EX (mm)
Fructificación	ENE	99,0	81,8	Húmedo	17,2	100,0	0,0	81,8	0,0	17,2
Fructificación	FEB	56,0	81,9	Seco	-25,9	74,1	-25,9	81,9	0,0	0,0
Maduración	MAR	27,0	149,0	Seco	-122,0	0,0	-74,1	101,1	47,9	0,0
Maduración	ABR	30,0	163,5	Seco	-133,5	0,0	0,0	30,0	133,5	0,0
Cosecha	MAY	88,0	179,5	Seco	-91,5	0,0	0,0	88,0	91,5	0,0
Cosecha	JUN	238,0	175,0	Húmedo	63,0	63,0	63,0	175,0	0,0	0,0
Cosecha	JUL	191,0	175,7	Húmedo	15,3	78,3	15,3	175,7	0,0	0,0
Cosecha	AGO	239,0	173,9	Húmedo	65,1	100,0	21,7	173,9	0,0	43,4
Cosecha	SEP	345,0	155,7	Húmedo	189,3	100,0	0,0	155,7	0,0	189,3
Floración	OCT	373,0	141,7	Húmedo	231,3	100,0	0,0	141,7	0,0	231,3
Floración	NOV	167,0	84,9	Húmedo	82,1	100,0	0,0	84,9	0,0	82,1
Fructificación	DIC	129,0	83,0	Húmedo	46,0	100,0	0,0	83,0	0,0	46,0
TOTAL		1982,0	1645,5							

Fuente: Elaborada por los autores con base en CICESE (2019)

y RCP8.5) y modelos (CNRM, MPI-ESM-LR, entre otros) para los horizontes medio (2045 -2069) y lejano (2075 -2099) y asociarlos a la fenología del cacao.

Las condiciones climáticas en la región de estudio son las adecuadas para que el cacao cumpla satisfactoriamente su ciclo fenológico. Para los escenarios de cambio climático, los resultados muestran que las modificaciones en las temperaturas no serán elevadas; en promedio se aumentan 1°C, mientras que las precipitaciones disminuyen entre 100 y 200 mm del total anual, con 4 a 5 meses de precipitaciones mínimas a los 100 mm que se sugieren en la literatura (Hardy, 1960; Enríquez, 1985; Suárez Venero, 2006; ICCO, 2018; Bunn *et al.*, 2019). Lo anterior ocasionaría un aumento en la evapotranspiración potencial entre 3 y 5 meses (entre enero y mayo). Ruíz *et al.* (2012) incluyen a la región productora de cacao en Tabasco dentro del área con déficit hídrico anual entre moderado y alto (90-184 mm). Como mencionan Leal *et al.* (1999), el cacao es extremadamente sensible a las reducciones de humedad en el suelo mucho antes de que se encuentre tan seco que las raíces no puedan absorber el agua. Para que las condiciones de humedad del suelo se consideren óptimas, deben mantenerse valores cercanos a la capacidad de campo (Torres Ruiz, 1995; Carr y Lockwood, 2011; García Lozano y Moreno Fonseca, 2016). Los efectos que puede provocar el déficit hídrico en la fenología del cacao son: descoloramiento y caída temprana de hojas, inhibición de la floración, producción de vainas más pequeñas, madurez temprana del fruto, entre otros (Carr y Lockwood, 2011). Estos efectos pueden incrementarse dadas las condiciones ambientales futuras, tal como lo han referido otros estudios para diversos cultivos Villers, Arizpe, Orellana, Conde y Hernández (2009); Jorquera-Fontena y Orrego-Verdugo (2010); Granados Ramírez y Sarabia Rodríguez (2013); Chicahuala, Steinaker y Demaría (2018). Además, habría que profundizar en las consecuencias que el aumento de la temperatura provocaría en la distribución de recursos en las plantas (Yepes y Buckeridge, 2011), en los procesos de polinización (Castellanos-Potenciano, Gallardo-López, Sol-Sánchez, Landeros-Sánchez, Díaz-Padilla, Sierra-Figueroa y Santivañez-Galarza, 2016; Maglianesi Sandoz, 2016; Maglianesi Sandoz y Jones Román, 2016; Obeso y Herrera, 2018), o el incremento en la diversidad genética (Alvarado Vázquez, Foroughbakhch Pournavab, Jurado Ybarra y Rocha, 2002; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015).

Por último, estos desequilibrios ambientales pueden restringir o aumentar las zonas aptas para el cacao. En algunas zonas de África, ha resultado que el clima del futuro no sería adecuado en las ubicaciones actuales de cacao y que podría considerarse una transformación a otros cultivos (Läderach *et al.*, 2013; Bunn *et al.*, 2019). Torquebiau *et al.* (2015) mencionan que la probable disminución de la producción en áreas de Costa de Marfil y Ghana será principalmente por las condiciones secas más que por el aumento de temperatura para el 2050. Eitzinger *et al.* (2015) señalan que para esa misma década, la región productora con condiciones óptimas para el cacao en Trinidad y Tobago no sufriría grandes cambios (menores a 15%), pero las reducciones de las lluvias en la temporada seca serán las causantes de una reducción en el rendimiento de las plantas. Recientemente, Fischer *et al.* (citado en Tramberend, 2020) han presentado

escenarios donde las áreas con las mejores condiciones en Ghana se reducirán del 32% al 58% para el 2050.

Conclusiones

La región productora en Tabasco posee las condiciones climáticas adecuadas para que el cacao logre su ciclo reproductivo. Los escenarios ocupados en este trabajo, indican que los cambios en la temperatura en promedio no serán elevadas, sin embargo, si se conjuga con la disminución y variabilidad de la precipitación, podrían producirse en el corto plazo condiciones que alteren la duración de las etapas de fructificación y madurez del fruto del cacao. Esta situación puede repercutir en el rendimiento, producción y poner en riesgo de permanencia de las plantaciones.

Bibliografía

- ABDULAI, Issaka; VAAST, Philippe; HOFFMANN, Munir P.; ASARE, Richard; JASSOGNE, Laurence; VAN ASTEN, Piet; RÖTTER, Reimund P.; y GRAEFE, Sophie. (2018). “Cocoa Agroforestry Is Less Resilient to Suboptimal and Extreme Climate Than Cocoa in Full Sun”. *Global change biology*, 24(1), 273-286. doi.org/10.1111/gcb.13885
- ALMOROX, Javier. (2003). *Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- ALTIERI, Miguel A. y Nicholls, Clara Inés. (2013). “Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas”. *Agroecología*, 8(1), 7-20.
- ALVARADO VÁZQUEZ, Marco Antonio; FOROUGHBAKHCH POURNAVAB, Rahim; JURADO YBARRA, Enrique; y ROCHA, Alejandra. (2002). “El cambio climático y la fenología de las plantas”. *Ciencia UANL*, 5(4), 493-500.
- ANDRADES GRASSI, Jesús Enrique; TORRES MANTILLA, Hugo Alexander, LÓPEZ HERNÁNDEZ, Juan Ygnacio; y ROJAS POLANCO, María. (2019). “Análisis espacio temporal de la homogeneidad de estaciones de precipitación en una zona árida y semi árida del Centro Occidente de Venezuela”. *Ciencia e Ingeniería*, 40(2), 185-194.
- ÁNGELES HERNÁNDEZ, Juan Manuel; y MONTIEL GUTIÉRREZ, Mario Alberto. (2018). “La tecnificación del riego como medida de adaptación al cambio climático en el distrito de riego 034 estado de Zacatecas”. En René Lobato Sánchez y Abril Adirana Ariana Pérez Canales (Coords.), *Agua y cambio climático*. México: IMTA. 138-153.
- ARBELÁEZ ARIAS, Lina María. (2010). *Análisis de la diversidad genética intraespecie de Moniliophthora roeri (Cif) Evans et al. por medio de marcadores morfológicos y genéticos*. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado el 12 de abril de 2020 de <http://bdigital.unal.edu.co/1938/>.

- ARTEAGA RAMÍREZ, Ramón; y ROMO GONZÁLEZ, José R. (1983). *Meteorología Agrícola*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- ÁRVELO SÁNCHEZ, Miguel Ángel; GONZÁLEZ LEÓN, Diego; MAROTO ARCE, Steven; DELGADO LÓPEZ, Tanya; y MONTOYA RODRIGUEZ, Paola. (2017). *Manual técnico de cultivo de cacao. Prácticas latinoamericanas*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- BENKEBLIA, Noureddine; MCHENRY, Melinda T.; CRISP, Jake; y ROUDIER, Philippe. (2018). “Tropical Crops and Resilience to Climate Change”. En Noureddine Benkeblia (Ed.), *Climate Change and Crop Production: Foundations for Agroecosystem Resilience*. Boca Raton: CRC Press. 83-108.
- BRIDGEMOHAN, Puran; MOHAMED, Musa El Sharief; MOHAMMED, Majeed; SINGH, Kimberly; y BRIDGEMOHAN, Ronell Shamir Hemsley. (2016). “The Application of BBCH Scale for Codification and Illustrations of the Floral Stages of Caribbean Fine Cacao *Theobroma cacao* L”. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, (6), 1-10. doi.org/10.17265/2161-6256/2016.01.001
- BOULAY, Michael; SOMARRIBA, Eduardo; y OLIVIER, Alain. (2000). “Fenología de cacao de árboles de sombra en Talamanca Costa Rica”. *Agroforestería en las Américas*, 7(26), 43-45.
- BUNN, Christian; LÄDERACH, Peter; QUAYE, Amos; MUIRLERMAN, Sander; NOPONEN, Martin R. A.; y LUNDY, Mark. (2019). “Recommendation Domains to Scale Out Climate Change Adaptation in Cocoa Production in Ghana”. *Climate Services*, 16, 1-12. doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123
- BUNN, Christian; LUNDY, M.; WIEGEL, J.; y CASTRO-LLANOS, F. (2019). *Impacto del cambio climático en la producción de cacao para Centroamérica y El Caribe*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- BURGOS, Juan; y REYES, H. (1965). “Tipos agroclimáticos mundiales del cacaotero”. *Agronomía Tropical*, 15(1-4), 169-191.
- CAMPOS ARANDA, Daniel Francisco. (2005). *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México: Trillas.
- CAMPOS ARANDA, Daniel Francisco. (2015). “Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años”. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 16(3), 355-368.
- CARR, M. K. V.; y LOCKWOOD, G. (2011). “The Water Relations and Irrigation Requirements of Cocoa (*Theobroma cacao* L.): A Review”. *Experimental Agriculture*, 47(4), 653-676. doi.org/10.1017/S0014479711000421
- CASTELLANOS-POTENCIANO, Blanca Patricia; GALLARDO-LÓPEZ, Felipe; SOL-SÁNCHEZ, Ángel; LANDEROS-SÁNCHEZ, Cesáreo; DÍAZ-PADILLA, Gabriel; SIERRA-FIGUEREDO, Pablo; y SANTIVANEZ-GALARZA, José Luis. (2016). “Impacto potencial del cambio climático en la apicultura”. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 2(1), 1-19. doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5673
- CASTRO, Lina M.; y CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. (2010). “Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas”. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.

- CASTRO MUÑOZ, Cindy Paola; PANDURO TENAZOA, Nadia Masaya; VELAZCO CASTRO, Ena Vilma; e ITURRARAN PINTO, Elsa Scarlet. (2017). “Evaluación de la fenología reproductiva y dinámica de la producción del cultivo (*Theobroma cacao* L.) clon CCN-51”. *Big Bang Faustiniiano*, 6(1), 38-42.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA (CICESE). (2019). *Base de datos del CLICOM* (en línea). Recuperado el 20 de mayo de 2010 de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- CHICAHUALA, Martin S.; STEINAKER, Diego F.; y DEMARÍA, Manuel R. (2018). “Respuestas fenológicas de gramíneas C3 y C4 a variaciones interanuales de precipitación y temperatura”. *Ecología Austral*, 28(2), 455-466. doi.org/10.25260/EA.18.28.2.0.658
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL). (2011). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación: Memoria del seminario internacional realizado en Santiago, los días 10 y 11 de noviembre de 2010*. Santiago: CEPAL.
- DE ALMEIDA, Alex-Alan F.; y VALLE, Raúl R. (2007). “Ecophysiology of the cacao tree”. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425-448. doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011
- DE CARA GARCÍA, Juan Antonio; RUIZ LÓPEZ, Carlos; y BARCELÓ, Antonio Mestre. (2020). “Adaptación del código BBCH a la observación fenológica de la AEMET”. En *XXX Jornadas Científicas de la AME y el 9º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología* (en línea). Zaragoza: Asociación Meteorológica Española.
- DOSTERT, Nicolas; ROQUE, José; CANO, Asunción; LA TORRE, María I.; y WEIGEND, Maximilian. (2011). *Hoja Botánica: cacao. Theobroma cacao L.* Lima: Cooperación Alemana al Desarrollo; Agencia de la GIZ.
- EITZINGER, Anton; FARRELL, Aidan; RHINEY, Kevon; CARMONA, Stephania; Van Loosen, Irene; y TAYLOR, Michael. (2015). “Trinidad & Tobago: Assessing the Impact of Climate Change on Cocoa and Tomato”. *CIAT Policy Brief No. 27*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- ENRÍQUEZ, Gustavo. (1985). *Curso sobre el cultivo del cacao*. Costa Rica: IICA; CATIE.
- ESPINOSA-GARCÍA, José Antonio; URESTI-GIL, Jesús; VÉLEZ-IZQUIERDO, Alejandra; MOC-TEZUMA-LÓPEZ, Georgel; INURRETA-AGUIRRE, Héctor Daniel; y GÓNGORA-GONZÁLEZ, Sergio Fernando. (2015). “Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano”. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1051-1063. doi.org/10.29312/remexca.v6i5.598
- FERNÁNDEZ EGUIARTE, Agustín; ZAVALA HIDALGO, Jorge; ROMERO CENTENO, Rosario; CONDE ÁLVAREZ, Ana Cecilia; y TREJO VÁZQUEZ, Rosa Irma. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). (2015). *Coping with Climate Change. The Roles of Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome: FAO.

- GARCÍA, Enriqueta. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- GARCÍA, Enriqueta; y COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO). (1998). *Isotermas Medias Anuales. Escala 1:1000000*, México.
- GARCÍA LOZANO, Jairo; y MORENO FONSECA, Liz Patricia. (2016). “Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo”. *Acta Agronómica*, 65(1), 44-50. doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161
- GÓMEZ M., Álvaro; y AZÓCAR, Aura. (2002). “Áreas potenciales para el desarrollo del cultivo cacao en el Estado de Mérida”. *Agronomía Trópica*, 52(4), 403-425.
- GRANADOS RAMÍREZ, Rebeca; y SARABIA RODRÍGUEZ, Asael Alejandro. (2013). “Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca”. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3), 435-446. doi.org/10.29312/remexca.v4i3.1204
- GUAJARDO, Rafael; GRANADOS, Guadalupe; SÁNCHEZ, Ignacio; DÍAZ, Gabriel; y BARBOSA, Finlandia. (2017). “Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 157-177. doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-11
- HARDY, Frederick. (1960). *Cacao Manual*. Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- HUTCHINS, Ashley; TAMARGO, Ana; BAILEY, Caroline; y KIM, Yeongmi. (2015). “Assessment of Climate Change Impacts on Cocoa Production and Approaches to Adaptation and Mitigation: A Contextual View of Ghana and Costa Rica” (en línea).
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI). (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional), escala: 1:250000*. México: INEGI.
- INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION (ICCO). (2018). *Mercado mundial del cacao*.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2013). *Cambio climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas. Grupo de Trabajo I. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático*. Suiza: IPCC.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2015). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*. Ginebra: OMM-PNUMA.
- JOHNSON, James M.; BONILLA, Julio C.; y AGÜERO CASTILLO, Liana. (2008). *Manual de Manejo de Producción del Cacaotero* (en línea). Nicaragua.
- JORQUERA-FONTENA, Emilio; y ORREGO-VERDUGO, Raúl. (2010). “Impacto del calentamiento global en la fenología de una variedad de vid cultivada en el Sur de Chile”. *Agrociencia*, 44(4), 427-435.
- LÄDERACH, P.; MARTÍNEZ-VALLE, A.; SCHROT, G.; y CASTRO, N. (2013). “Predicting the Future Climatic Suitability for Cocoa Farming of the World’s Leading Producer Countries, Ghana and Cote d’Ivoire”. *Climatic Change*, 119(3-4), 841-854. doi.org/10.1007/s10584-013-0774-8
- LEAL, Freddy; AVILÁN, Luis; y VALDERRAMA, Emilia. (1999). “Áreas potenciales para el desarrollo del cacao en Venezuela”. *Revista Agroalimentaria*, 5(8), 39-45.

- LÓPEZ FELDMAN, Alejandro J.; y HERNÁNDEZ CORTÉS, Danae. (2016). “Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina”. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459-496.
- LÓPEZ GUEMEZ, A. del R.; PALMA GONZÁLEZ, B; HERNÁNDEZ RIVERA, M.A.; OJEDA MORALES, M. E.; ÁNGELES PADILLA, A.; RUIZ NÁJERA, J. A.; y GARCÍA MARÍN, M. J. (2007). “Caracterización fisicoquímica de los suelos predominantes en el estado de Tabasco”. *Conciencia Tecnológica*, (34), 45-46.
- MAGLIANESI SANDOZ, María Alejandra. (2016). “Efectos del cambio climático sobre la polinización y la producción agrícola en América Tropical”. *Revista Ingeniería*, 26(1), 11-20.
- MAGLIANESI SANDOZ, María Alejandra; y JONES ROMÁN, Gabriela. (2016). “Efecto del cambio climático sobre las interacciones planta-animal y sus consecuencias sobre los ecosistemas”. *Biocenosis*, 30(1-2), 70-79.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, PERÚ. (s.f). “Ficha técnica No. 11. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de cacao” Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, PERÚ. (2011). “Cartilla Número 13. Condiciones Agroclimáticas del Cultivo del Cacao”. Perú: Ministerio de Agricultura.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, PERÚ. (2012). *Manual técnico del cultivo de cacao blanco de Piura*. Piura, Perú: Ministerio de Agricultura.
- NELSON, Gerald C.; ROSEGRANT, Mark W.; KOO, Jawoo; ROBERTSON, Richard; SULSER, Timothy; ZHU, Tingju; RINGLER, Claudia; MSANGI, Siwa; PALAZZO, Amanda; BATKA, Miroslav; MAGALHAES, Marilia; VALMONTE-SANTOS, Rowena; EWING, Mandy; y LEE, David. (2009). *Cambio climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Washington, D.C.: Intituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI).
- NIEMENAK, Nicolas; CILAS, C.; ROHSIUS, C.; BLEIHOLDER, H.; MEIER, U.; and LIEBEREL, R. (2010). “Phenological growth stages of cacao plants (*Theobroma* sp.): Codification and description according to the BBCH scale”. *Annals of Applied Biology*, (156), 13-24. doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00356.x
- OBESO, José Ramón; y HERRERA, José Manuel. (2018). “Polinizadores y cambio climático”. *Ecosistemas*, 27(2), 52-59. doi.org/10.7818/ECOS.1371
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). (2018). *Guía de Prácticas climatológicas Edición de 2018*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). (2019). *Manual del Marco Mundial de Gestión de Datos Climáticos de Alta Calidad. Edición de 2019*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- PASCALÉ, Antonio. J.; y DAMARIO, Edmundo A. (2004). *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- RAMOS-REYES, Rodimiro; PALMA-LÓPEZ, David J.; ORTIZ-SOLORIO, Carlos A.; ORTIZ-GARCÍA, Carlos F.; y DÍAZ-PADILLA, Gabriel. (2004). “Cambios de uso de suelome-diante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera”. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 267-278.

- ROJAS, Fernando; y SACRISTÁN SÁNCHEZ, Edwin Javier. (2013). *Guía ambiental para el cultivo del cacao*. Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Federación Nacional de Cacaoteros.
- RUIZ-ÁLVAREZ, O.; ARTEAGA-RAMÍREZ, R.; VÁZQUEZ-PEÑA, M.A.; ONTIVEROS CAPTURADA, R. E.; y LÓPEZ-LÓPEZ, R. (2012). “Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México”. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 1-14.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA). (2012). *Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Cacao (Theobroma cacao L.)*. México: SAGARPA, INIFAP.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA). (2017). *Planeación agrícola Nacional 2017-2030. Cacao mexicano*. México: SAGARPA, INIFAP.
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP). (2017). *Anuario estadístico de la producción agrícola* (en línea).
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP). (2018). *Atlas agroalimentario*. México: SAGARPA, SIAP.
- SUÁREZ, Giclis M., FLORIDO BACALLAO, René, SOTO CARREÑO, Francisco; y CABALLERO NÚÑEZ, Alberto. (2013). “Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos”. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 30-37.
- SUÁREZ VENERO, Giclis M. (2006). *Zonificación agroecológica de Theobroma cacao L., para el macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa*. El Salvador: Centro de Desarrollo de la Montaña, CITMA.
- SUÁREZ VENERO, Giclis M.; SOTO CARREÑO, Francisco, GAREA LLANOS, Eduardo; y SOLANO OJEDA, Oscar J. (2015). “Caracterización agroclimática del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, en función de la zonificación agroecológica para el cacao (*Theobroma cacao L.*)”. *Cultivos Tropicales*, 36(1), 23-28.
- THOMSON, Allison M.; CALVIN, Katherine V.; SMITH, Steven J.; KYLE, G. Page; VOLKE, April; Patel, Pralit; DELGADO-ARIAS, Sabrina; BOND-LAMBERTY, Ben; WISE, Marshal A.; CLARKE, Leon E.; y EDMONDS, James A. (2011). “RCP4. 5: A Pathway for Stabilization of Radiative Forcing by 2100”. *Climatic Change*, (109), 77-94. doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4
- TORQUEBAU, Emmanuel; MANLEY, David; y COWAN, Paul. (2015). *Climatic Change and Agriculture Worldwide*. Heidelberg: Springer.
- TORRES RUIZ, Edmundo. (1995). *Agrometeorología*. México: Trillas.
- TRAMBEREND, Sylvia. (2020). “High-end Climate Change Impacts on Crop Production” (en línea). *EGU 2020: Sharing Geoscience Online*. International Institute for Applied Systems Analysis. Recuperado el 13 de abril de 2020 de http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/16429/1/EGU2020-8955_presentation.pdf
- UNIDAD DE INFORMÁTICA PARA LAS CIENCIAS ATMOSFÉRICAS Y AMBIENTALES (UNIATMOS). (2015). *Bases de datos y metadatos* (en línea). Atlas climático digital <http://atlas-climatico.unam.mx/atlas/kml/>

- VEGA NEVÁREZ, Ramiro. (2018). “Metodología para determinar la frecuencia, ocurrencia, duración, intensidad y severidad de la sequía intraestival (canícula), con fines de manejo agronómico y adaptación al cambio climático de los cultivos de temporal”. En René Lobato Sánchez y Abril Ariana Pérez (Coords.), *Agua y cambio climático*. México: IMTA. 105-137.
- VILLALPANDO IBARRA, José Francisco; y RUIZ CORRAL, José Ariel. (1993). *Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura*. México: UTHEA Noriega Editores.
- VILLERS, Lourdes; ARIZPE, Nancy; ORELLANA, Roger; CONDE, Cecilia; y HERNÁNDEZ, Josefina. (2009). “Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México”. *Interciencia*, 34(5), 322-329.
- YEPES, Adriana; y BUCKERIDGE, Marcos Silveira. (2011). “Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (revisión)”. *Colombia Forestal*, 14(2). 213-232.