



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
INSTITUTO DE CIENCIAS  
CENTRO DE AGROECOLOGIA

MAESTRIA EN MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL  
DE ESPECIES NATIVAS DE INTERÉS AGRÍCOLA EN MÉXICO**

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

PRESENTA

DANIELA AÍDA RIVERA AGUIRRE

DIRECTOR DE TESIS  
DR. DANIEL JIMÉNEZ GARCÍA

ASESORES

DR. HÉCTOR BERNAL MENDOZA  
DR. ERIC OSVALDO RAMÍREZ BRAVO  
DR. GERARDO SÁNCHEZ ROJAS

Puebla, Pue., Enero, 2020



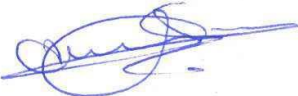
**BUAP**

La presente tesis, titulada: "Impacto del cambio climático en la distribución potencial de especies nativas de interés agrícola en México.", realizada por la alumna Ing. Daniela Aida Rivera Aguirre, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN  
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS**

**COMITÉ TUTORAL:**

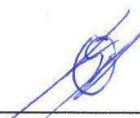
DIRECTOR: \_\_\_\_\_

  
Dr. Daniel Jiménez García


ASESOR: \_\_\_\_\_

  
Dr. Héctor Bernal Mendoza

ASESOR EXTERNO: \_\_\_\_\_

  
Dr. Osvaldo Eric Ramírez Bravo

ASESOR EXTERNO: \_\_\_\_\_

  
Dr. Gerardo Sánchez Rojas

REVISOR EXTERNO: \_\_\_\_\_

  
Mtra. Roberta Marques

Puebla, Pue., Enero de 2020.

Posgrado en Manejo Sostenible de Agroecosistemas  
Instituto de Ciencias (ICUAP)

Av. 14 sur 6301, Edificio IC4.  
Ciudad Universitaria  
Col. San Manuel, Puebla, Pue, C.P. 72570  
01 (222) 2295500 Ext. 7063  
masagro@correo.buap.mx

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca nacional para realizar los estudios de maestría.

A la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por admitirme en el posgrado y permitirme realizar mis estudios de maestría.

A mi director de Tesis, el Dr. Daniel Jiménez García por el apoyo y la dirección de esta tesis.

A mis asesores, Dr. Héctor Bernal Mendoza, Dr. Osvaldo Eric Ramírez Bravo y Dr. Gerardo Sánchez Rojas por su orientación para la elaboración de la tesis.

A Miguel Ángel Ortiz Acosta, por su ayuda para hacer esta tesis.

A Liz y Felipe, por toda su ayuda para poder empezar este posgrado.

## DEDICATORIAS

**A mis padres, Lorenzo Rivera Blanco y Leonor Aguirre Bernal.** Por todo su apoyo, por siempre estar al pendiente, por la confianza. Gracias por siempre creer que puedo ser mejor.

**A mi hermana, Gabriela.** Por siempre estar cuando la necesito. Gracias por todo lo que haces por mí y gracias por conocerme tan bien. Eres mi favorita.

**A la memoria de mi tío, Carlos Octavio Rivera Blanco.** Por ser una inspiración para seguir mejorando. Gracias por el apoyo y amor que nos brindó todos estos años. Lo recordaremos con mucho amor siempre.

**A Miguel,** por todo tu apoyo y cariño, por tanta paciencia también, hasta en los peores momentos. Te quiero siempre.

**A Osvaldo,** por todos los ánimos. Gracias por todos los consejos.

## ÍNDICE GENERAL

<b>Resumen</b> .....	<b>8</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>9</b>
<b>II. Marco teórico y conceptual</b> .....	<b>11</b>
2.1 Cambio climático.....	<b>11</b>
2.2 Impacto del cambio climático en la agricultura.....	<b>12</b>
2.3 Modelado de nicho ecológico.....	<b>15</b>
2.4 Uso del modelado de nicho ecológico para detectar los impactos del cambio climático en la distribución de distintas especies agrícolas.....	<b>17</b>
2.5 Importancia y características principales de las especies nativas agrícolas.....	<b>18</b>
<b>III. Justificación</b> .....	<b>19</b>
<b>IV. Hipótesis</b> .....	<b>20</b>
<b>V. Objetivos</b> .....	<b>20</b>
5.1 General.....	<b>20</b>
5.2 Particulares.....	<b>20</b>
<b>VI. Materiales y métodos</b> .....	<b>21</b>
6.1 Área de estudio.....	<b>21</b>
6.2 Datos de ocurrencia.....	<b>22</b>
6.3 Variables ambientales.....	<b>24</b>
6.4 Calibración de los modelos.....	<b>25</b>
6.5 Proyección de los modelos a futuro.....	<b>27</b>

<b>VII. Resultados</b> .....	<b>29</b>
7.1 Cambios en la distribución potencial futura de <i>G. hirsutum</i> .....	<b>30</b>
7.2 Cambios en la distribución potencial futura de <i>A. hypogaea</i> .....	<b>33</b>
7.3 Cambios en la distribución potencial de <i>T. cacao</i> .....	<b>35</b>
<b>VIII. Discusión</b> .....	<b>37</b>
8.1 <i>G. hirsutum</i> .....	<b>38</b>
8.2 <i>A. hypogaea</i> .....	<b>40</b>
8.3 <i>T. cacao</i> .....	<b>41</b>
<b>IX. Conclusiones</b> .....	<b>43</b>
<b>X. Literatura citada</b> .....	<b>44</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
<b>No. 1</b>	<b>19 variables bioclimáticas utilizadas para la construcción de los modelos.</b>	<b>24</b>
<b>No. 2</b>	<b>Ajustes de las combinaciones para modelar la distribución de las especies con el algoritmo de Maxent y aquellas variables ambientales utilizadas por ser más informativas.</b>	<b>26</b>
<b>No. 3</b>	<b>MCG utilizados para la proyección a futuro de los modelos de distribución de las especies.</b>	<b>27</b>
<b>No. 4</b>	<b>Resultados de las pruebas de los modelos seleccionados como los mejores de cada especie.</b>	<b>30</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
No. 1	Diagrama BAM	16
No. 2	Mapa de México	21
No. 3	Puntos de calibración, evaluación, área accesible (M) de <i>G. hirsutum</i> para el estudio	22
No. 4	Puntos de calibración, evaluación, área accesible (M) de <i>A. hypogaea</i> para el estudio	23
No. 5	Puntos de calibración, evaluación, área accesible (M) de <i>T. cacao</i> para el estudio	23
No. 6	Predicción de distribución de <i>G. hirsutum</i> del presente.	31
No. 7	Distribución potencial futura de <i>G. Hirsutum</i> , para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050.	32
No. 8	Predicción de distribución de <i>A. hypogaea</i> del presente.	33
No. 9	Distribución potencial futura de <i>A. hypogaea</i> , para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050.	34
No. 10	Predicción de distribución de <i>T. cacao</i> del presente.	35
No. 11	Distribución potencial futura de <i>T. cacao</i> , para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050.	36

## **RESUMEN**

Los sistemas agrícolas son sumamente susceptibles ante cambio climático, sin embargo, poco se sabe de la vulnerabilidad ante cambio climático de especies nativas. En este trabajo se evaluó el impacto del cambio climático en la distribución potencial de tres especies de interés agrícola nativas de México (*G. hirsutum*, *A. hypogaea*, y *T.cacao*), a través de modelos de distribución potencial para el año 2050. De acuerdo con los 22 modelos de circulación general (GCMs) bajo dos Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), 4.5 y 8.5 se encontraron áreas ambientales idóneas en la distribución potencial de las tres especies. La especie que presenta mayor incremento es el algodón, encontrando condiciones en el futuro en estados como Tabasco o en toda la Península de Yucatán.

### **Palabras clave**

Modelos de nicho ecológico, cultivos agrícolas, susceptibilidad climática.

### **Abstract**

Agricultural systems are highly susceptible to climate change; however, little is known about the vulnerability of native species to climate change. In this work, the impact of climate change on the potential distribution of three species of agricultural interest native to Mexico (*G. hirsutum*, *A. hypogaea*, y *T. cacao*) was evaluated through species distribution models for the year 2050. According to the 22 General Circulation Models (GCMs) under two Representative Concentration Pathways (RCP), 4.5 and 8.5 were found increases in the potential distribution of the three species. The species with the greatest increase is cotton, finding conditions in the future in states such as Tabasco or throughout the Yucatan Peninsula.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad actualmente. Surge a partir del aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) con el inicio de la Revolución Industrial (Conde, 2011; Benavides y León, 2007). Este fenómeno se caracteriza por una serie de alteraciones en los patrones de distribución del clima. Aumentos en la temperatura debido al cambio climático han provocado que las últimas décadas hayan sido las más calientes registradas, con un incremento de 0.85°C entre 1880 y 2012 (IPCC, 2013). Aunado a esto, con mayor frecuencia está ocurriendo un aumento de días cálidos y una reducción de días fríos durante el año (IPCC, 2014).

Una de las actividades más vulnerables frente al cambio climático es la agricultura (O'Brien y Leichenko, 2000), ya que depende fuertemente de factores climáticos como precipitación y temperatura para el crecimiento de los cultivos (Monterroso *et al.*, 2015). Este fenómeno puede traer consecuencias importantes para la producción agrícola de México ya que aquí se produce el 15.4% de todas las especies que constituyen el sistema alimentario mundial (Boege, 2009). Entre estas se encuentran muchas que son nativas y de gran importancia como algodón (*Gossypium hirsutum*), cacahuete (*Arachis hypogaea*) y cacao (*Theobroma cacao*). Estas tres especies representan un ingreso de aproximadamente 805,128,800 millones de dólares (SIAP 2019) y son de alta importancia cultural (Figueroa Bautista *et al.* 2005; Garcés, 2005; Montemayor *et al.* 2002), ya que las tres han sido empleadas en el mundo entero para elaboración de ropa, alimento y chocolate.

Debido a que el clima es uno de los factores que delimita la distribución de las plantas, cuando los factores climáticos sobrepasan los niveles de tolerancia de una especie, ésta no puede crecer de manera óptima y es obligada a buscar nuevas condiciones de hábitat apropiadas para su desarrollo o desaparecen (Hardy, 2003; Dawson y Spannagle, 2009). Es por ello por lo que es de suma importancia conocer cómo será la distribución potencial de distintas especies agrícolas ante los pronosticados cambios del clima en el futuro.

Un método para conocer la distribución de especies es el Modelado de Nicho Ecológico (MNE) (Nakazawa *et al.*, 2004; Sánchez-Cordero *et al.*, 2005 y Peterson *et al.*, 2011). Con esta herramienta es posible proyectar geográficamente el área potencial que ocupa u ocupará una especie en el futuro a través del análisis de los factores físicos o ambientales que determinan su distribución (Elith *et al.*, 2006; Peterson *et al.*, 2011), así como también, los cambios que ocurrirán bajo distintos escenarios de cambio climático (Jones *et al.*, 2013; Pikesley *et al.*, 2014). Debido al potencial del MNE, esta herramienta ha sido utilizada dentro de la producción agrícola para evaluar los impactos del cambio climático en la distribución y rendimientos de distintas especies (Caetano *et al.*, 2018).

## MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### *Cambio Climático*

Para poder empezar a entender el funcionamiento del cambio climático es necesario conocer cómo se compone el sistema climático y su importancia en este fenómeno. Dicho sistema está compuesto por la atmósfera, los océanos, la biosfera, la criosfera (glaciares y capas de hielo a escala continental) y la superficie terrestre. La interacción de estos componentes da como resultado el clima de la Tierra (IPCC, 1997). El clima puede ser entendido como el promedio de los valores de diferentes características estado de la atmósfera (vientos, radiación, temperatura, etc.) en un periodo de tiempo mayor a treinta años a nivel local (Acot, 2005). Sobre el clima pueden influir una gran variedad de fenómenos que son capaces de alterar el balance de energía de la Tierra y provocar cambios (Sánchez Cohen *et al.*, 2011), a la variación de estos cambios por periodos consecutivos, durante varias décadas, se le denomina cambio climático (Benavides y León, 2007); este fenómeno es definido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) como “*un cambio en el estado del clima que persiste durante un tiempo prolongado que se debe tanto a la variabilidad natural como a la actividad humana.*” Como se observa, las raíces del cambio climático se estudian desde dos fuentes: como causa de un fenómeno natural y como un proceso generado por actividades antrópicas.

El cambio climático actual se debe principalmente a la liberación de ciertos gases emitidos por la quema de combustibles fósiles que han provocado una intensificación del efecto invernadero y a su vez un calentamiento global del planeta. (Becerra y Mance, 2009). El efecto invernadero es un fenómeno natural que de no existir mantendría una temperatura promedio global en la Tierra de  $-33^{\circ}\text{C}$  aproximadamente (Barboza, 2013) y ocurre gracias a que la energía proveniente del Sol es absorbida por la superficie de la Tierra y su atmósfera (Gallegos, 2004). Una parte de esta energía se transforma en calor en la superficie y otra retorna a la atmósfera en forma de radiación (Rueda, 2004). En la atmósfera existen ciertos gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  y vapor de agua) denominados de efecto invernadero (GEI) que absorben parte de

esta radiación y la envían a todas direcciones. El resultado de este fenómeno es el calentamiento de la superficie del planeta a la temperatura actual; entre mayor sea la captura de GEI, mayor es la captura del calor y viceversa (Becerra y Mance, 2009). Actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, especialmente carbón y petróleo (Vila, 2016), la deforestación (Espinosa *et al.*, 2015), la ganadería (Monteny *et al.*, 2001) y la agricultura (Saynes *et al.* 2016) han provocado la intensificación de este fenómeno y en consecuencia se ha dado un incremento en la temperatura del planeta (Vargas y Leo, 2003).

Son muchos los efectos del cambio climático en el medio ambiente; derretimiento de los glaciares, cambios en las áreas de distribución de las plantas y animales, cambios en su fisiología, un crecimiento acelerado del nivel del mar, olas de calor más duraderas, incrementos en la frecuencia e intensidad de los huracanes, entre muchos otros (Vila, 2016). En América Latina han sido observados cambios importantes en la precipitación y aumentos en la temperatura durante las últimas décadas. En áreas de climas secos, el cambio climático puede inducir a una salinización y desertificación de la tierra agrícola, mientras que en zonas bajas el aumento del nivel del mar puede causar severas inundaciones (Magrin *et al.*, 2007).

### ***Impacto del Cambio Climático en la Agricultura***

Entre las diversas consecuencias que ocurrirán con el cambio climático la más importante, referente al bienestar social y económico de la población, es el efecto que existirá en la distribución y productividad en la agricultura (Beck, 2013). De acuerdo con lo reportado por Field *et al.* (2014), este problema será un impedimento para el crecimiento económico y el avance en la erradicación de la pobreza.

De no ocurrir una reducción en las emisiones de carbono en los próximos años, se prevé un aumento del calentamiento de la Tierra de 3.3°C en el año 2080 (Cline, 2007); esta situación provocará una baja en la producción agrícola en América Latina, especialmente en Centroamérica (Magrin *et al.*, 2014), en naciones como El Salvador (Ordaz *et al.*, 2009) así como también en Perú (Tonconi-Quispe, 2015). Esto

se debe a que serán los países en desarrollo quienes sufrirán en mayor medida los impactos del cambio climático, puesto que su dependencia hacia la agricultura es mayor que la de los países desarrollados y cuentan con menos recursos para subsistir (Mendelsohn, 2009). Ante estas consecuencias es probable que los rendimientos se reduzcan y los costos de producción aumenten. Serán los pequeños productores quienes sufrirán los impactos más graves y quienes tendrán mayor limitación de recursos para afrontarlos. Esta interrupción en la producción de alimentos representa una amenaza a la seguridad alimentaria (Padgham, 2009; Vergara *et al.*, 2014). Sin embargo, existen también casos como el de Australia que a pesar de ser un país desarrollado sufrirá los impactos de cambios en el clima debido a la gran extensión de zonas áridas y semi-áridas que posee, y sus fuertes problemas con el abastecimiento de agua (Stern, 2006).

El cambio climático tendrá impactos directos en la agricultura con efectos negativos en la mayoría de los cultivos debido a factores que crearán estrés en los agroecosistemas como sequías, lluvias torrenciales, ondas de calor y propagación de plagas y enfermedades provocando inestabilidad en la producción agrícola (Ojeda, 2010; Altieri y Nicholls, 2008). Asimismo, la diversidad de recursos genéticos se encuentra en riesgo ante los cambios en el clima pues disminuye la capacidad de desplazamiento y supervivencia de las variedades endémicas. Es probable que se den reducciones en las áreas con aptitud para el crecimiento de cultivos, en los rendimientos para una amplia gama de ellos y en el periodo de crecimiento asociado a la disminución del número de días con humedad disponible (Monterroso *et al.*, 2015).

Con el cambio climático se espera que el calor y la intensidad en los eventos se intensifiquen y los sistemas agrícolas se enfrenten a un mayor riesgo de erosión (Padgham, 2009). La temperatura actúa en el desarrollo de los cultivos y su incremento puede afectar su tasa de crecimiento y limitar su actividad fotosintética (Ellis *et al.*, 1990; Lawlor, 2005). Además, como consecuencia de los bajos niveles de

humedad es probable que haya una reducción de tierra apta para la agricultura dependiente de las lluvias que puede agravarse en consecuencia de los periodos prolongados de sequía (Vergara *et al.*, 2014).

Muchas especies deberán emigrar hacia latitudes y altitudes distintas a las que se encuentran actualmente (Parmesan, 2006). Su distribución es influenciada por la relación con sus requerimientos agroclimáticos (Lorente *et al.*, 2004); los impactos del cambio climático representan una amenaza para satisfacer estos requerimientos y por lo tanto para su presencia y distribución (Jarvis *et al.*, 2008). Los cultivos se verán afectados negativa o positivamente de acuerdo con su ubicación geográfica. Sin embargo, se prevé que el impacto sea mayor en las zonas áridas y semiáridas (Singh *et al.*, 2014). Las especies con una mayor probabilidad de persistencia serán aquellas que posean una alta tolerancia a distintas condiciones ambientales y que tendrán una mayor ventaja ante las especies con una muy reducida tolerancia ante los efectos del cambio climático quienes serán las menos exitosas (Brown, 1984).

Con respecto a México, el sector rural en el país es muy vulnerable al cambio climático debido a su situación geográfica, topográfica y a sus características socioeconómicas. (Bellon *et al.*, 2011; Ojeda, *et al.*, 2008; Conde *et al.*, 2008). La agricultura, y el sector primario en general (ganadería y forestal) son actividades muy vulnerables ante este fenómeno (Monterroso *et al.*, 2015), puesto que ejercerá presión en los requerimientos ambientales necesarios para el sector agrícola (Vergara *et al.*, 2014). Por ello, la adaptación ante el cambio climático, definida por el IPCC (2007) como: “*los ajustes en los sistemas naturales o humanos como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos que pueden moderar el daño o aprovechar sus efectos beneficiosos*” es altamente prioritaria (SEMARNAT-INECC, 2015).

### ***Modelado de Nicho Ecológico***

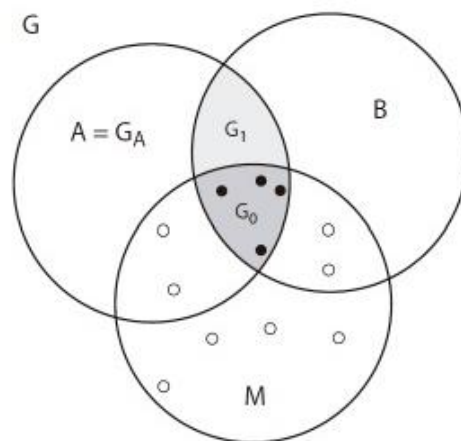
Es conocido desde hace muchos años que la distribución de las especies es afectada en principal medida por factores climáticos (Soberón y Peterson, 2005), es así, que el interés por entender y predecir estas distribuciones geográficas se remonta a mucho tiempo atrás (Grinnell, 1917). El método de “modelado de nicho ecológico” utilizado para predecir las áreas de distribución potencial de las especies ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos veinte años (Guisan *et al.*, 2013), debido en parte a la numerosa cantidad de aplicaciones que tiene este campo (Peterson *et al.*, 2011); para comprender el funcionamiento de esta técnica es importante entender claramente el término de “nicho” y todos sus conceptos relacionados.

Se han propuesto dos tipos de nichos, los Eltonianos y los Grinnellianos (Soberón, 2007); ambos se distinguen por el tipo de variables propuestas por Hutchinson (1978) en las que están basados. Los primeros se apoyan en las variables bionómicas, que son aquellas que pueden ser modificadas por las especies, por ejemplo, los recursos por los que compiten. Y los nichos Grinnellianos, basados en las variables scenopoéticas, las cuales se caracterizan por ser no interactivas, es decir, no pueden ser modificadas por la presencia o ausencia de las especies y no influyen en ellas directamente. La información que existe relacionada con las variables bionómicas es escasa y difícil de medir, contrario a la información de las variables scenopoéticas de las cuales existe una gran cantidad (Peterson *et al.* 2011). Con base en esto, Jackson y Overpeck (2000) (basados en los nichos Grinnellianos) definen el nicho como: *“subconjunto de condiciones ambientales bajo las cuales las poblaciones de una especie tienen tasas de crecimiento positivo”*.

Entonces, se reconocen tres tipos de nicho Grinnellianos: el nicho fundamental ( $N_F$ ), que son las condiciones ambientales, disponibles o no en el espacio geográfico, que permiten a una especie mantenerse sin inmigración; el nicho fundamental existente ( $N^*_F$ ), referente a las condiciones

ambientales que caen dentro del nicho fundamental y que están realmente presentes en las áreas accesibles para las especies (Qiao *et al.*, 2019); y el nicho realizado ( $N_R$ ), el espacio donde se encuentran las especies tomando en cuenta el efecto de predadores y competidores (Soberón y Nakamura, 2009). De acuerdo con Peterson *et al.* (2016), el  $N_F$  es difícil de estimar en la práctica, a diferencia del  $N^*_F$  que puede ser estudiado mucho más fácilmente.

Peterson *et al.* (2011) proponen que el nicho de una especie puede ser representado en un espacio ambiental (E) y un espacio geográfico (G). Para afirmar esto, los autores plantean el diagrama BAM (Figura 1), el cual conceptualiza aquellos factores que tienen una mayor influencia en la distribución de una especie, que son, las necesidades de ciertas condiciones abióticas, la interacción con otras especies y sus límites de tolerancia (Soberón y Peterson, 2005). En este diagrama, (A) simboliza las zonas con las condiciones ambientales que permiten la supervivencia de la especie; (B) se refiere a las interacciones bióticas adecuadas, y (M) las zonas que han sido accesibles para la especie en un tiempo dado. Tomando esto en cuenta, el espacio ambiental representaría el nicho y el espacio geográfico representaría las áreas de distribución.



**Figura 1.** Diagrama BAM que simboliza los factores abióticos (A), zona accesible para la especie (M) y las interacciones bióticas (B), que definiría la distribución de las especies. Tomado de Peterson *et al.* (2011).

Existen distintos métodos para la creación de MNE. Aquellos que han tenido una mayor aceptación para representar el nicho de las especies son los denominados correlativos (Peterson *et al.* 2011). Estos se centran en entender las condiciones que permiten la persistencia de las especies utilizando registros de presencia/ausencia y variables ambientales (Peterson y Soberón, 2012).

El resultado que se espera de estos modelos es la estimación de aquellas áreas que cumplen con las condiciones requeridas para el nicho ecológico de las especies (Anderson y Martínez-Meyer, 2004). El MNE es de gran utilidad en la predicción de los impactos ecológicos y distribuciones potenciales de distintas especies debido al cambio climático (Araujo *et al.*, 2005). Con su uso, es posible tener distintos panoramas de lo que podría ocurrir en el futuro y así crear técnicas adecuadas para el manejo de distintos agroecosistemas (Mateo *et al.*, 2011).

### ***Uso del modelado de nicho ecológico para detectar los impactos del cambio climático en la distribución de distintas especies agrícolas.***

El uso de modelado de nicho ecológico para evaluar los efectos del cambio climático ha sido realizado con un gran número de especies, incluyendo a las domésticas (Guisan *et al.*, 2005); estudios que han sido de gran interés debido a la preocupación que existe por entender el futuro comportamiento en la distribución agrícola (Parry *et al.*, 2004; Fischer *et al.*, 2005). Este método es considerado por Beck (2013) como una forma innovadora para estudiar la relación entre agricultura y ambiente.

Los efectos del cambio climático detectados por los modelos de nicho son variados. Dentro de este tipo de análisis, los estudios más realizados se han hecho en cereales como maíz, trigo y arroz (Ahumada *et al.*, 2014). En México, se espera una disminución del maíz y sus razas debido a este problema (Ureta *et al.*, 2012; Tinoco *et al.*, 2011). Por otro lado, se prevé una expansión en la distribución de especies herbáceas (Thapa *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2016) y cultivos industriales (Ramírez-Ojeda *et al.*, 2014).

### ***Importancia y características principales de las especies nativas agrícolas***

El algodón (*G. hirsutum*) es un cultivo con importancia cultural, económica y biológica en el mundo (Ulloa *et al.*, 2006) y se tienen registros de su uso desde épocas muy antiguas de la civilización (Vincent y Fajardo, 2007; Abramova *et al.*, 2013). Esta especie es adaptable a distintas condiciones de clima y suelo (Hernández, 2015); Vincent y Fajardo *et al.* (2007) reportan que se produce en zonas tropicales y sub-tropicales, mientras que Aragón (1993) indica que su producción ocurre en regiones áridas y semiáridas con climas cálidos y semicálidos. Las temperaturas ideales para el cultivo se encuentran entre los 27°C y 30°C (Barragán y Sarasty, 2012), en cuanto a condiciones de humedad, la especie requiere de 200 a 300 mm bien distribuidos durante el periodo de crecimiento (Palomo- Rodríguez, 2011). La importancia de este cultivo para la humanidad radica en su utilización para la fabricación de ropa, el uso de semillas para producir aceite vegetal y como componente medicinal (El-Nahhal *et al.*, 2013).

El cacahuate (*A. hypogaea*) es un cultivo producido en climas tropicales y sub-tropicales (Domínguez, 2010). Las temperaturas óptimas para el cultivo de *A. hypogaea* son de entre 25°C y 35°C., es sabido que temperaturas inferiores a 5°C pueden inhibir su desarrollo (Vizcarra *et al.*, 1993) y cuenta con un requerimiento de precipitación de 400 a 600 mm (Domínguez, 2010).

Este cultivo tiene una gran importancia en la alimentación humana y animal (Fundora *et al.*, 1994) al ser una fuente de proteínas (30-35%) y aceites (45-55%) (Head *et al.*, 1995). Además, puede ser utilizado en la elaboración de fibras sintéticas, combustible de lámparas, y materia prima para la elaboración de jabón (Funes *et al.*, 2003).

El cacao (*T. cacao*) es un cultivo de zonas tropicales que se produce comercialmente desde el nivel del mar hasta los 1200 msnm (López y Gil, 2017). La temperatura promedio anual para su producción es de 25°C (entre 20 y 32°C). Con respecto a los requerimientos de precipitación, la especie se desarrolla idealmente con 1600 a 2500 mm anuales (Paredes *et al.* 2004). Es una especie de importancia económica,

industrial, social, cultural y ambiental (Motamayor *et al.*, 2002). Es considerado por diversos autores como un alimento importante debido a su capacidad antioxidante, y por tener compuestos de utilidad farmacológica como la cafeína, teofilina y la teobromina (Crozier *et al.*, 2011; Waizel *et al.*, 2012). Este cultivo contribuye con servicios ambientales como fomentador de la biodiversidad y captura de carbono, se calcula que esto es de entre 60 a 100 ton/ha (López-Báez *et al.*, 2015).

## **JUSTIFICACIÓN**

Distintos estudios reportan que el cambio climático afectará principalmente a los pequeños productores de países en vías de desarrollo debido a su vulnerabilidad al depender de esta actividad para su sobrevivencia y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria (Altieri y Nicholls, 2013). Las predicciones climáticas señalan que los efectos del cambio climático se acentuarán durante los siguientes años y se establecerán condiciones más extremas para los cultivos, por lo cual será necesario crear nuevas medidas de adaptación ante este fenómeno (Zarazúa, 2011).

Para que sea posible proponer e implementar acciones de adaptación ante el cambio climático, es necesario estimar sus impactos potenciales (Magaña, 2010), por esta razón se están desarrollando a nivel global una nueva serie de estudios de impacto y vulnerabilidad con un fuerte énfasis en la importancia de desarrollar estrategias de adaptación (Lim *et al* 2005). El modelado de nicho ecológico es una herramienta muy útil para evaluar los riesgos del cambio climático (Peterson *et al.*, 2011); estos modelos predicen que tan adecuada es un área para el potencial desarrollo de una especie con respecto a las condiciones ambientales (García, 2008). México es uno de los países que puede ser mayormente afectado por este problema al sugerirse una tendencia de sequías e inundaciones para muchas zonas (Bellon *et al.*, 2005) Por ello, la evaluación de los impactos que tendrá el cambio climático en los rendimientos de tres principales cultivos en el país será de gran importancia para generar estrategias de adaptación que permitan hacer frente a este problema.

## **HIPÓTESIS**

Las especies nativas agrícolas encontrarán nuevas áreas de distribución potencial futura como consecuencia de los impactos del cambio climático.

## **OBJETIVOS**

### *General*

Comprobar el impacto del cambio climático en la distribución geográfica potencial de tres especies nativas agrícolas de México conforme a dos escenarios contrastantes, el RCP 4.5 y el RCP 8.5 en el año 2050 y establecer las posibles consecuencias que tendría en la agricultura mexicana.

### *Particulares*

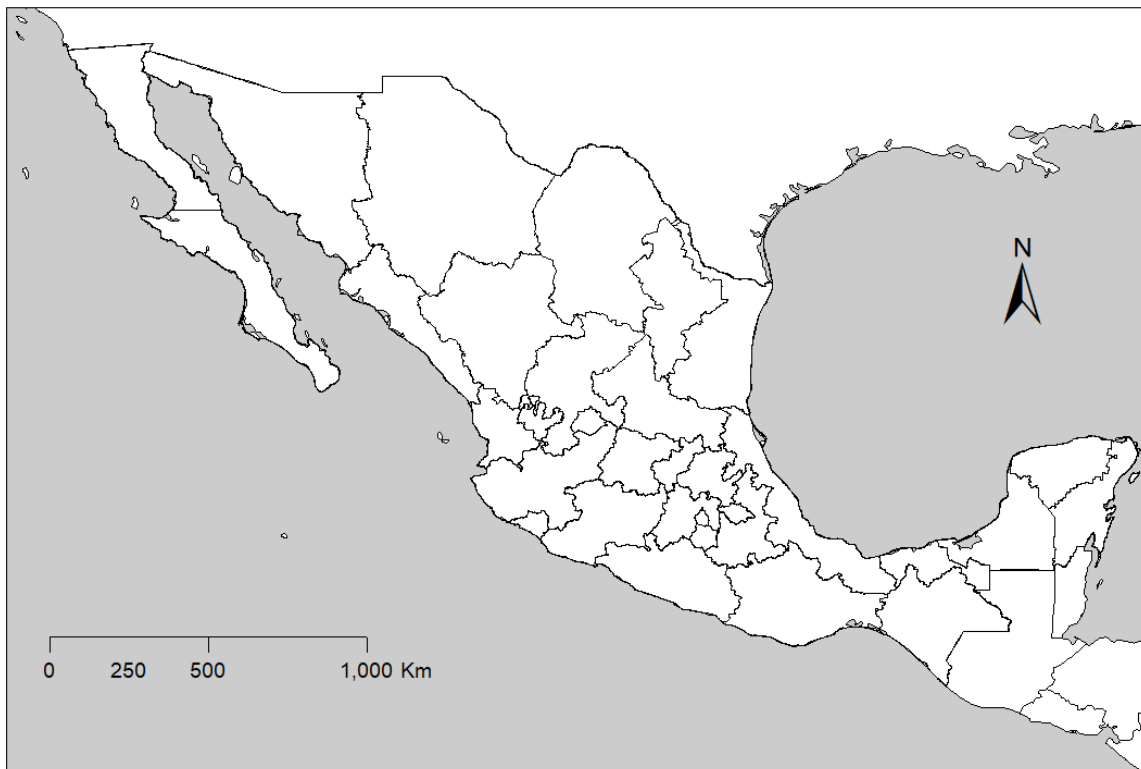
- Modelar la distribución potencial de las especies de interés agrícola en el presente.
- Realizar proyecciones a futuro de los modelos de distribución para el año 2050, utilizando los RCPs 4.5 y 8.5.
- Indicar las zonas con mayor riesgo a disminuir su idoneidad ambiental para la distribución de las especies.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

El territorio mexicano abarca 1 953 162 km<sup>2</sup> y se distribuye casi en partes iguales a ambos lados del Trópico de Cáncer; limita al este con el Océano Atlántico por medio del Golfo de México y al oeste con el Océano Pacífico (Coll-Hurtado, 2000) (Figura 2). Los sistemas montañosos, los vientos y la forma de México (ancho en el norte y estrecho en el sur), provocan que existan todos los tipos de climas en el país (García, 2004; Vidal-Zepeda, 2005).

Con respecto a la situación agrícola, aproximadamente en 22 millones de hectáreas del país se realizan actividades de este rubro (11% del territorio nacional) y 16.3 millones son de temporal (Monterroso et al., 2015). La agricultura de riego se concentra principalmente en el norte del territorio, mientras que la agricultura de temporal se practica más en el sur y centro (Ojeda et al., 2010). El 80% de la precipitación anual ocurre en los meses de mayo a octubre donde se siembran aproximadamente 12 millones de hectáreas de temporal (SIAP, 2008).

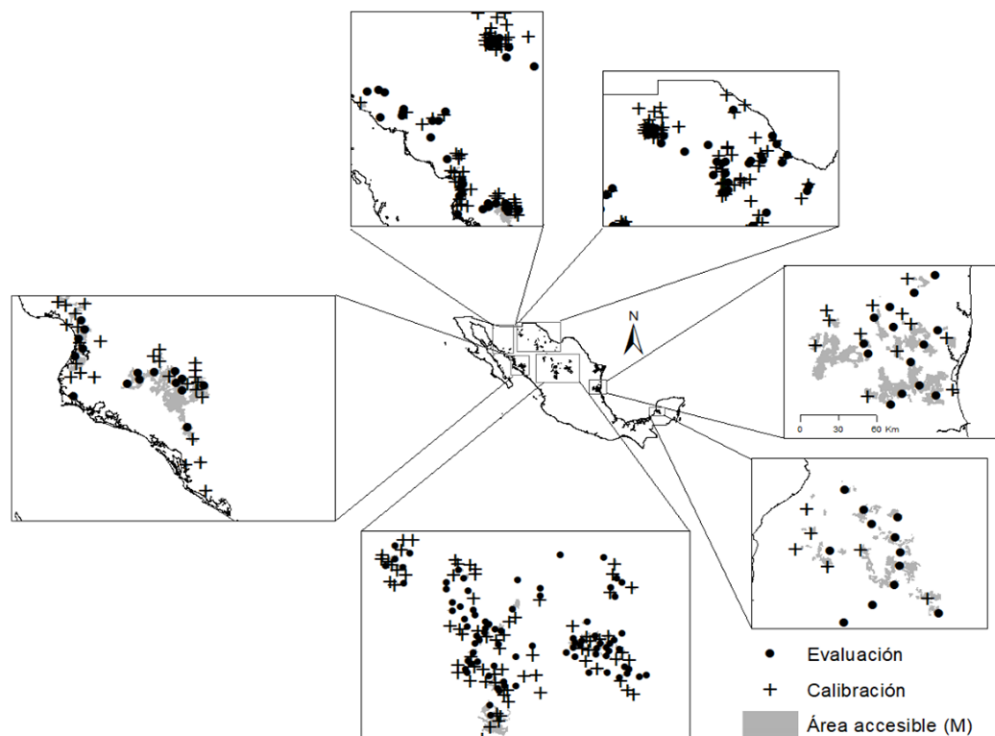


**Figura 2.** Mapa de México

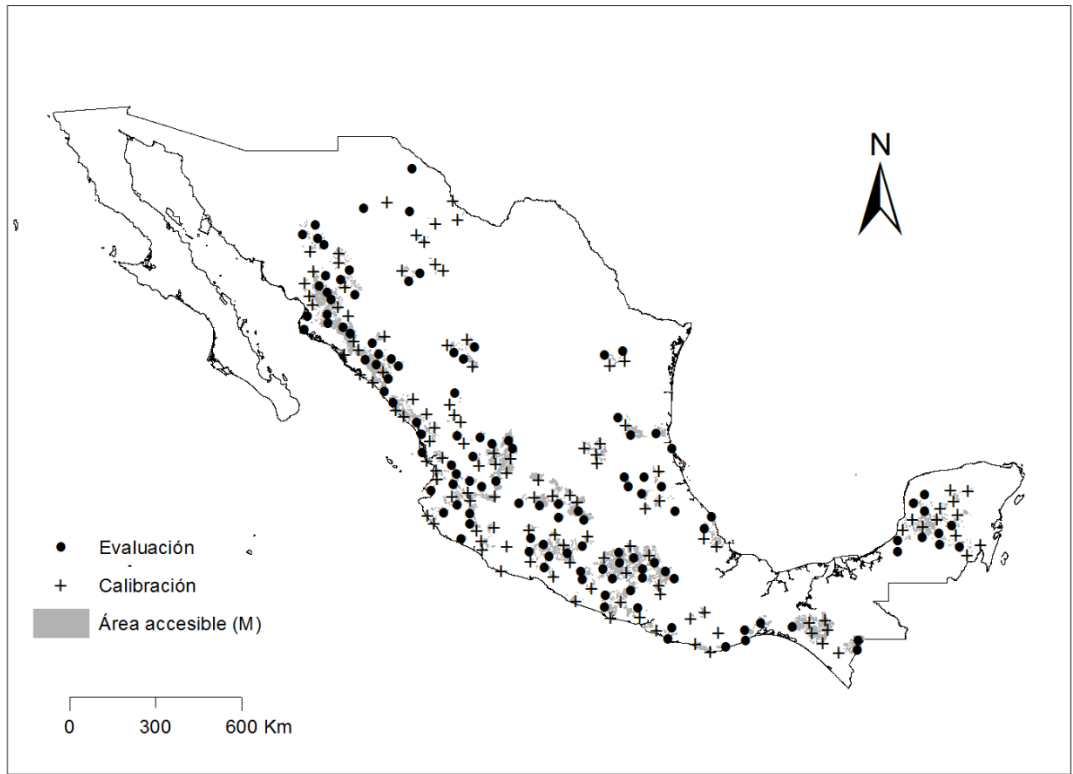
### *Datos de ocurrencias*

Los datos utilizados para crear los MNE de las especies de interés agrícola en México, se obtuvieron de los rendimientos registrados en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) ([http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp)) de los últimos 15 años, al ser los datos disponibles, en todos los municipios de México. Se eligieron municipios específicos para determinar la presencia de las especies con base en la existencia de al menos 10 años continuos de altos rendimientos de cosechas de los cultivos (una tonelada por encima de cada media anual).

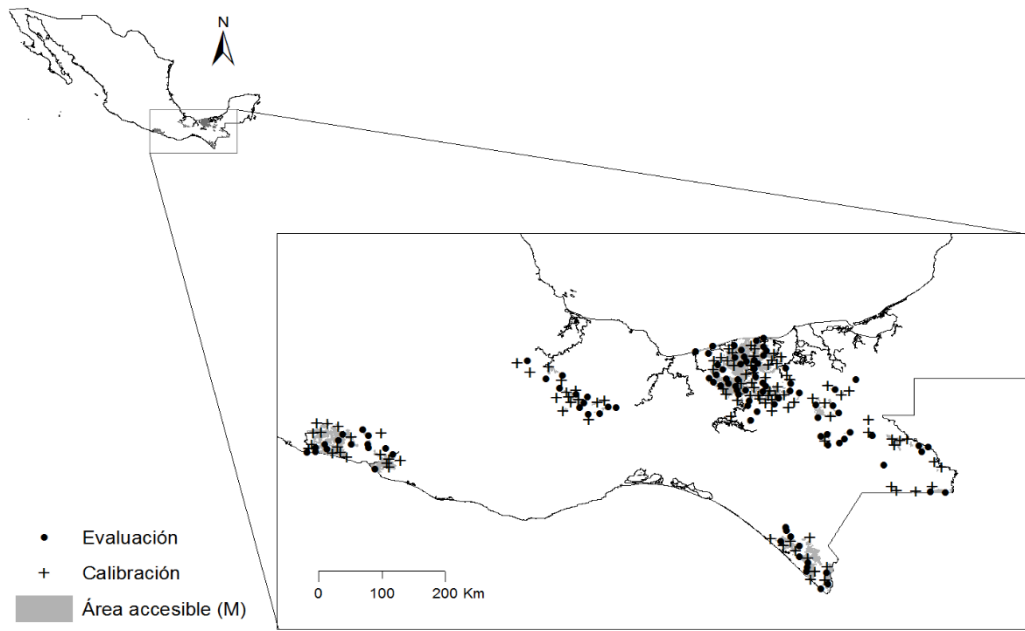
Utilizando los usos de suelo de la serie V del INEGI (INEGI, 2013) se colocó un punto al azar dentro de los espacios agrícolas de cada municipio. Por tanto, se obtuvo un número de puntos al azar en cada municipio dentro de las unidades de producción. Este proceso se realizó utilizando el software ArcMap 10.3 con distancia mínima entre cada punto de 7.5 kilómetros. (Figuras 3-5).



**Figura 3.** Puntos de calibración, evaluación y área accesible (M) de *G. hirsutum* para el estudio.



**Figura 4.** Puntos de calibración, evaluación y área accesible (M) de *A. hypogaea* para el estudio.



**Figura 5.** Puntos de calibración, evaluación y área accesible (M) de *T. cacao* para el estudio.

## ***Variables ambientales***

Los datos ambientales usados para elaborar los MNE fueron las 19 variables bioclimáticas generadas a partir de los valores mensuales de temperatura y precipitación (Tabla 1), obtenidas de Worldclim (Hijmans et al., 2005; <http://www.worldclim.org>), con excepción de las variables consideradas como artefactos espaciales (8, 9, 18 y 19) (Escobar *et al.*, 2014). Fueron descargadas con una resolución de 2.5 min en formato *Esri grid* para el periodo 1950-2000 y correspondientes a la versión 1.4. Cuando se pretende estudiar como impactará el cambio climático en la distribución de especies en grandes regiones, Araujo *et al.* (2005) asumen que el uso de variables climáticas es la mejor opción para realizar esto. Con el fin de reducir la autocorrelación en las variables y evitar el sobre ajuste en los modelos (Peterson *et al.*, 2011) se realizó una prueba de Pearson para eliminar aquellas que tuvieran un alto grado de correlación ( $\geq 0.8$ ). Las variables que se mantuvieron sin correlación se utilizaron para construir los modelos empleando el método exhaustivo empleado por Cobos *et al.* (2019).

Las variables para el futuro se descargaron de Clima Change, Agriculture and Food Security (CGIAR, 2014); trabajando en dos horizontes de tiempo (presente y 2050) bajo los escenarios RCP 4.5 (con un impacto medio) y RCP 8.5 (con un impacto alto), empleando 22 modelos de circulación general (GCMs).

**Cuadro 1.** Tabla de las 19 variables bioclimáticas de Worldclim utilizadas para la construcción de los modelos. (Hijmans *et al.*, 2005). Variables seleccionadas para el modelo de *G. hirsutum*(\*), variables seleccionadas para el modelo de *A. hypogaea* (-) y variables seleccionadas para el modelo de *T. cacao* (•)

<b>Clave</b>	<b>Parámetro</b>
<i>Bio1-</i>	Temperatura media anual
<i>Bio2*</i>	Media mensual *(Max Temp-Min Temp)
<i>Bio3*-</i>	Isotermalidad (Bio2/Bio7) *(100)
<i>Bio4•</i>	Temperatura Estacional (Desviación est. *100)
<i>Bio5•</i>	Máxima Temp del mes más Cálido
<i>Bio6</i>	Mínima Temp del mes más Frío

---

<i>Bio7</i>	Temperatura Rango Anual (Bio5-Bio6)
<i>Bio8</i>	Temp Media del Trimestre más Húmedo
<i>Bio9</i>	Temp Media del Trimestre más Seco
<i>Bio10-</i>	Temp Media del Trimestre más Cálido
<i>Bio11</i>	Temp Media del Trimestre más Frío
<i>Bio12</i>	Precipitación Media Anual
<i>Bio13</i>	Precipitación del mes más Húmedo
<i>Bio14</i>	Precipitación del mes más Seco
<i>Bio15</i>	Precipitación Estacional
<i>Bio16•</i>	Precipitación del Trimestre más Húmedo
<i>Bio17•</i>	Precipitación del Trimestre más Seco
<i>Bio18</i>	Precipitación del Trimestre más Cálido
<i>Bio19</i>	Precipitación del Trimestre más Frío

---

### ***Calibración de los modelos***

Los modelos de este trabajo fueron calibrados utilizando el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k (Phillips et al., 2006) a través del paquete kuenm (Cobos et al. 2019). Fue generada la hipótesis del diagrama BAM (Soberón y Peterson, 2005), dónde las variables deben ser acotadas al área M o zona de calibración, es decir, la región que ha sido accesible para la especie a través de un tiempo biológico determinado. En este caso gracias a las condiciones climáticas y de manejo. La zona de calibración se construyó a partir de la intersección de las zonas agrícolas y los límites municipales en los cuales se tenía la presencia de las especies.

Elegir la configuración predeterminada (*default*) de este programa para crear los modelos puede afectar la predictibilidad de su desempeño (Merow *et al.*, 2013). Por ello, para evitar modelos sobreajustados o sumamente complejos se eligieron diferentes tipos de parametrización y así reducir los posibles errores de predictibilidad. Se emplearon cinco combinaciones de clases (*features*), L, LQ, LQP, LQPT, y LQPTH (donde: L: *linear*, Q: *quadratic*, P: *product*, T: *threshold* y H: *hinge*) y nueve valores del

parámetro de regularización ( $\beta$ -regularization) (0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 1, 3, 5, 7, 10) (Tabla 2). Una vez obtenidos todos los modelos, estos fueron evaluados para elegir aquellos que tuvieran los mejores resultados con base en las pruebas más rigurosas de significancia, rendimiento y complejidad.

**Cuadro 2.** Ajustes de las combinaciones para modelar la distribución de las especies con el algoritmo de Maxent y aquellas variables ambientales utilizadas por ser más informativas en el modelo mediante el análisis de Pearson para construir los modelos por especie.

<b>Especie</b>	<b>Característica</b>	<b>Multiplicador de regularización</b>	<b>Variable utilizada</b>
<i>Gossypium hirsutum</i>	l, lq, lqp, lqpt, lqpth.	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5, 7, 10.	Bio2, Bio3, Bio4.
<i>Arachys hypogaea</i>	l, lq, lqp, lqpt, lqpth.	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5, 7, 10.	Bio1, Bio3, Bio10
<i>Theobroma cacao</i>	l, lq, lqp, lqpt, lqpth.	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5, 7, 10.	Bio4, Bio5, Bio16, Bio17

La significancia de los modelos fue estimada utilizando la prueba de ROC-parcial (Peterson *et al.*, 2008) que se encarga de evaluar la relación entre el error de omisión y la proporción de área predicha como adecuada para la especie; contrario a la comúnmente usada prueba de AUC que pondera inadecuadamente los errores de omisión y comisión (Lobo *et al.*, 2008). esta prueba es muy importante pues además de tener un buen rendimiento, un modelo debe ser significativamente mejor que las predicciones aleatorias (Peterson *et al.*, 2011).

Para evaluar el rendimiento de los modelos, fueron calculadas las tasas de omisión (OR) para crear los modelos, y se eligieron los modelos con los menores valores. Finalmente, se eligieron los modelos más simples utilizando el Criterio de Información de Akaike corregido para pequeñas muestras (AICc), el cual penaliza los modelos con una alta complejidad al medir el número de parámetros en cada uno de ellos y elige el menos complejo por ser el más fácil de interpretar (Galante *et al.* 2017); todo este proceso se llevó a cabo en R Studio con el paquete kuenm (Cobos *et al.* 2019).

### ***Proyección de los modelos a futuro***

Una vez elegidos los mejores modelos de cada especie, estos fueron transferidos para el año 2050 utilizando los RCPs 4.5 y 8.5 provenientes de 22 Modelos de Circulación General (MCG) obtenidos de Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS, 2018) a una resolución de 2.5 minutos. (Tabla 3). Las medianas obtenidas de las proyecciones futuras y de los mejores modelos de distribución de cada especie se binarizaron utilizando un umbral de mínima presencia de entrenamiento (minimum training presence logistic threshold) y se combinaron mediante la función “cell statistics” de ArcGIS 10.3

Finalmente, se clasificaron los valores de estas combinaciones en cuatro rangos: áreas predichas como no aptas para el presente y con pocas probabilidades para el futuro, áreas predichas como no aptas para el presente, pero con muy altas probabilidades para el futuro, áreas predichas como aptas para el presente, pero con pocas probabilidades para el futuro, y áreas predichas como aptas para el presente, y con muy altas probabilidades para el futuro para obtener mapas que nos permitieran visualizar el área potencial de expansión, permanencia y reducción de las especies. Todo el trabajo geomático fue desarrollado en ArcGIS 10.3

**Cuadro 3.** MCG utilizados para la proyección a futuro de los modelos de distribución de las especies.

<b>Modelo</b>	<b>Centro</b>
<i>Bnu-esm</i>	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University
<i>Ccma-canesm2</i>	Canadian Centre for Modeling and Analysis
<i>Cesm1-bgc</i>	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research
<i>Cesm1-cam5</i>	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research

---

<i>Csiro_access1_0</i>	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia) BOM (Bureau of Meteorology, Australia)
<i>Csiro_access1_3</i>	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia) BOM (Bureau of Meteorology, Australia)
<i>Gfdl_cm3</i>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
<i>Gfdl_esm2g</i>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
<i>Gfdl_esm2m</i>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
<i>Giss_e2_h_cc</i>	NASA Goddard Institute for Space Studies
<i>Giss_e2_r</i>	NASA Goddard Institute for Space Studies
<i>Inm_cm4</i>	Institute for Numerical Mathematics
<i>Miroc_esm_chem</i>	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) and National Institute for Environmental Studies
<i>Miroc_esm</i>	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) and National Institute for Environmental Studies
<i>Miroc_miroc5</i>	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) and National Institute for Environmental Studies
<i>Mohc_hadgem2_cc</i>	Met Office Hadley Centre
<i>Mohc_hadgem2_es</i>	Met Office Hadley Centre
<i>Mpi_esm_lr</i>	Max Planck Institute for Meteorology
<i>Mri_cgcm3</i>	Meteorological Research Institute
<i>Ncar_ccsm4</i>	National Center for Atmospheric Research

---

---

<i>Ncc_noresm1_m</i>	Norwegian Climate Centre
<i>Nimr_hadgem2_ao</i>	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration

---

## RESULTADOS

Se obtuvieron 1125 modelos, con uno significativo para cada especie. Los modelos seleccionados como los mejores de dos de las especies (*T. cacao* y *G. hirsutum*) presentaron bajos niveles de omisión lo que indica un buen desempeño con respecto a su capacidad predictiva. De igual forma, son significativamente distintos al azar, como lo demostró la prueba de partial-ROC (Cuadro 4).

Considerando las tasas de omisión, la especie cuyo modelo obtuvo el mejor desempeño fue *T. cacao*. Y el modelo con el menor desempeño fue *A. hypogaea*. Los valores de ROC- parcial de las especies fueron  $<1$ , denotando que fueron completamente distintos al azar. Con respecto a los resultados de AICc, *A. hypogaea* fue el cultivo con los menores valores de complejidad, mientras que *G. hirsutum* obtuvo los valores más altos en esta prueba. (Cuadro 4).

Dentro de los modelos seleccionados como los mejores, los pertenecientes a los cultivos de *G. hirsutum* y *T. cacao* tuvieron *features* LQPT, mientras que el mejor modelo de cacahuate tuvo la combinación LQPTH. Con respecto a los valores del multiplicador de regularización, las especies de cacahuate y cacao obtuvieron el valor de 1 y 3 para el algodón (Cuadro 4).

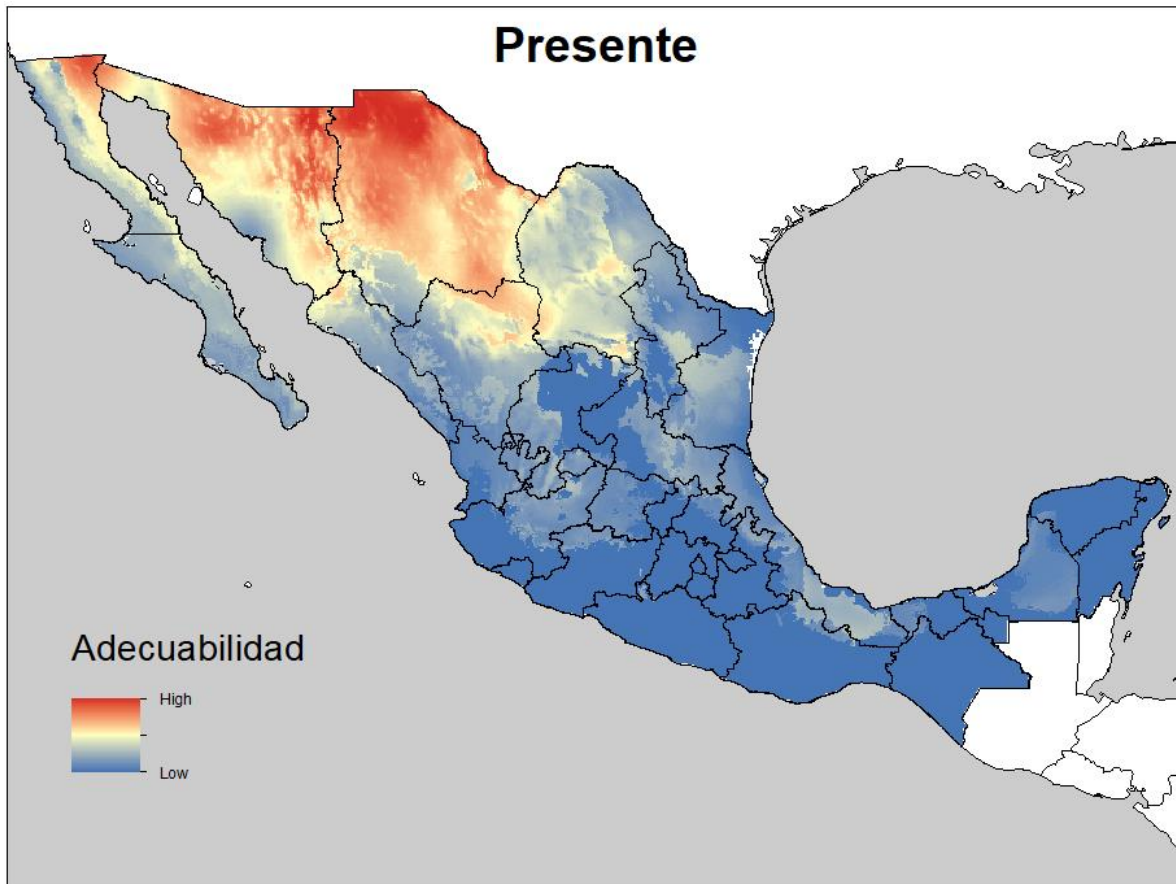
**Cuadro 4.** Resultados de las pruebas de los modelos seleccionados como los mejores de cada especie.

<b>Especie</b>	<b>Característica</b>	<b>Multiplicador de regularización</b>	<b>AICc</b>	<b>ROC-parcial</b>	<b>Omisión</b>
<i>Gossypium hirsutum</i>	lqpt	3	3938.16	0.048	0.07
<i>Arachys hypogaea</i>	lqpth	1	608.16	0	0.36
<i>Theobroma cacao</i>	lqp	1	2519.77	0	0.02

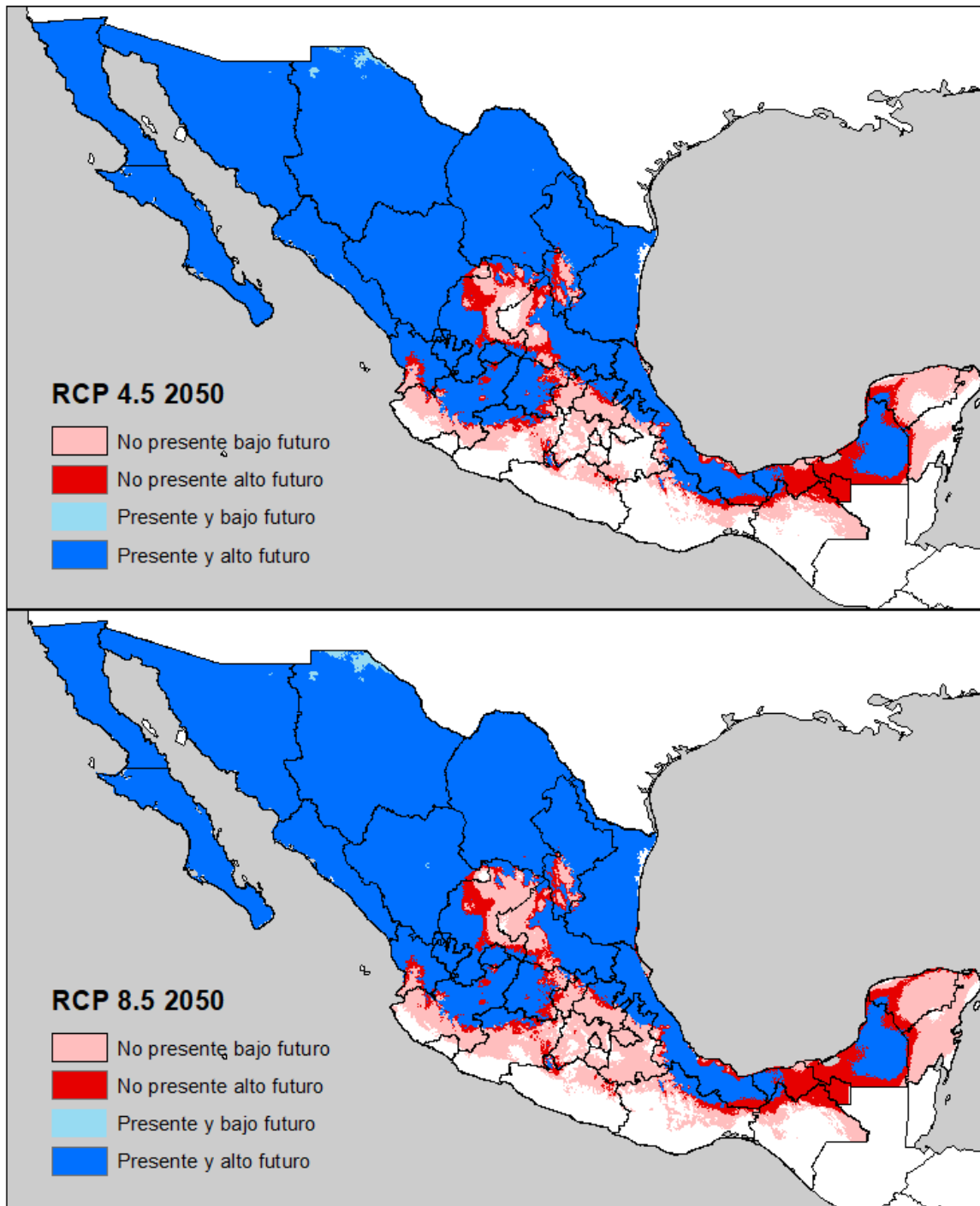
Con respecto a la contribución de las variables bioclimáticas, para *G. hirsutum* la variable “rango de temperaturas diurnas” fue la que mostró una mayor contribución con un 38%; en el caso de *A. hypogaea*, fue la variable “temperatura media anual” la que hizo un mayor aporte con un 46% y, en el caso de *T. cacao*, fue la “estacionalidad de la temperatura” la variable que más aportó al modelo con un 35%.

#### ***Cambios en la distribución potencial futura de G. hirsutum***

Puede apreciarse que las zonas de distribución potencial del algodón prevalecerán en el futuro bajo ambos escenarios, principalmente en la zona norte del país. Con respecto al RCP 4.5, se observa que la especie encontrará las condiciones ambientales adecuadas para su distribución en parte de las regiones fisiográficas de Petén, Golfo de México, Eje Volcánico, y Altiplano Sur, sitios donde existen bajas probabilidades de condiciones climáticas idóneas en las predicciones del presente. Con el RCP 8.5, la extensión en estas mismas regiones para la distribución futura de la especie empezará a aumentar. (Figuras 6 y 7).



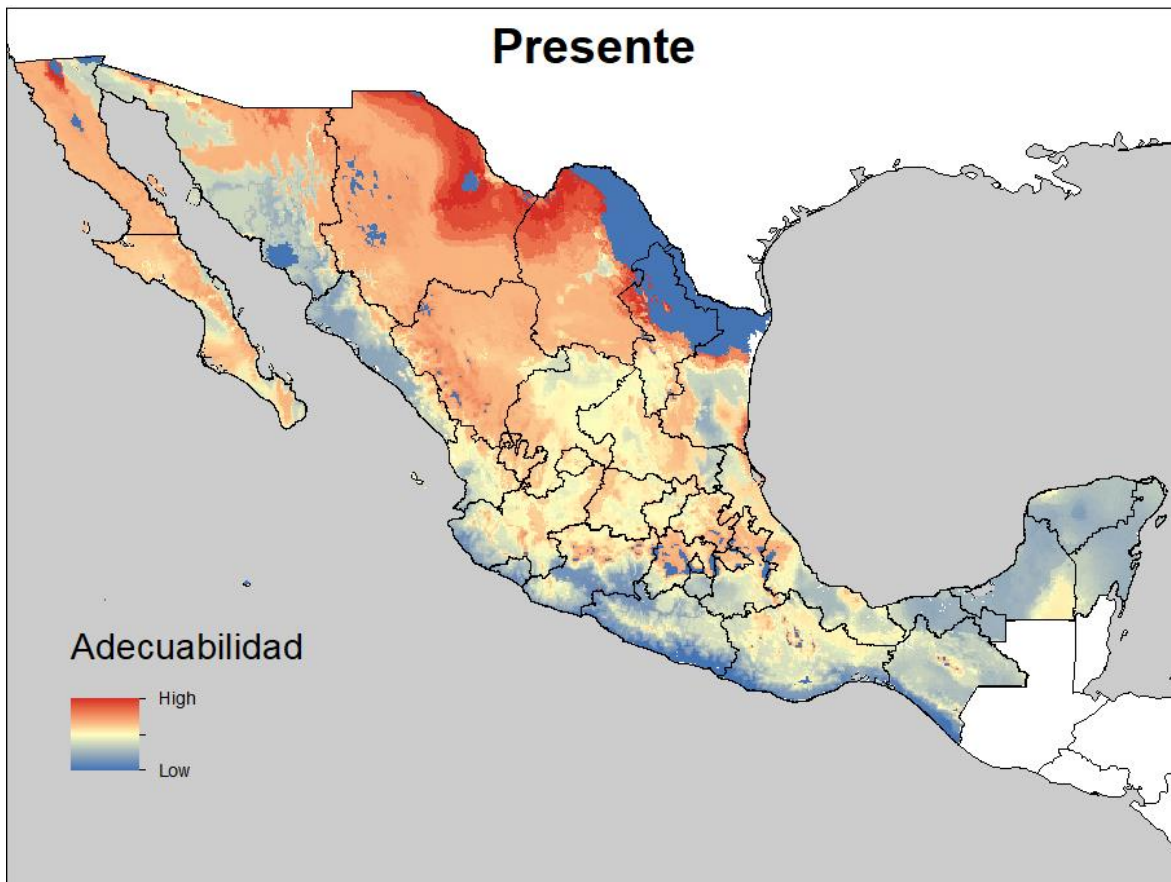
**Figura 6.** Predicción de distribución de *G. hirsutum* del presente.



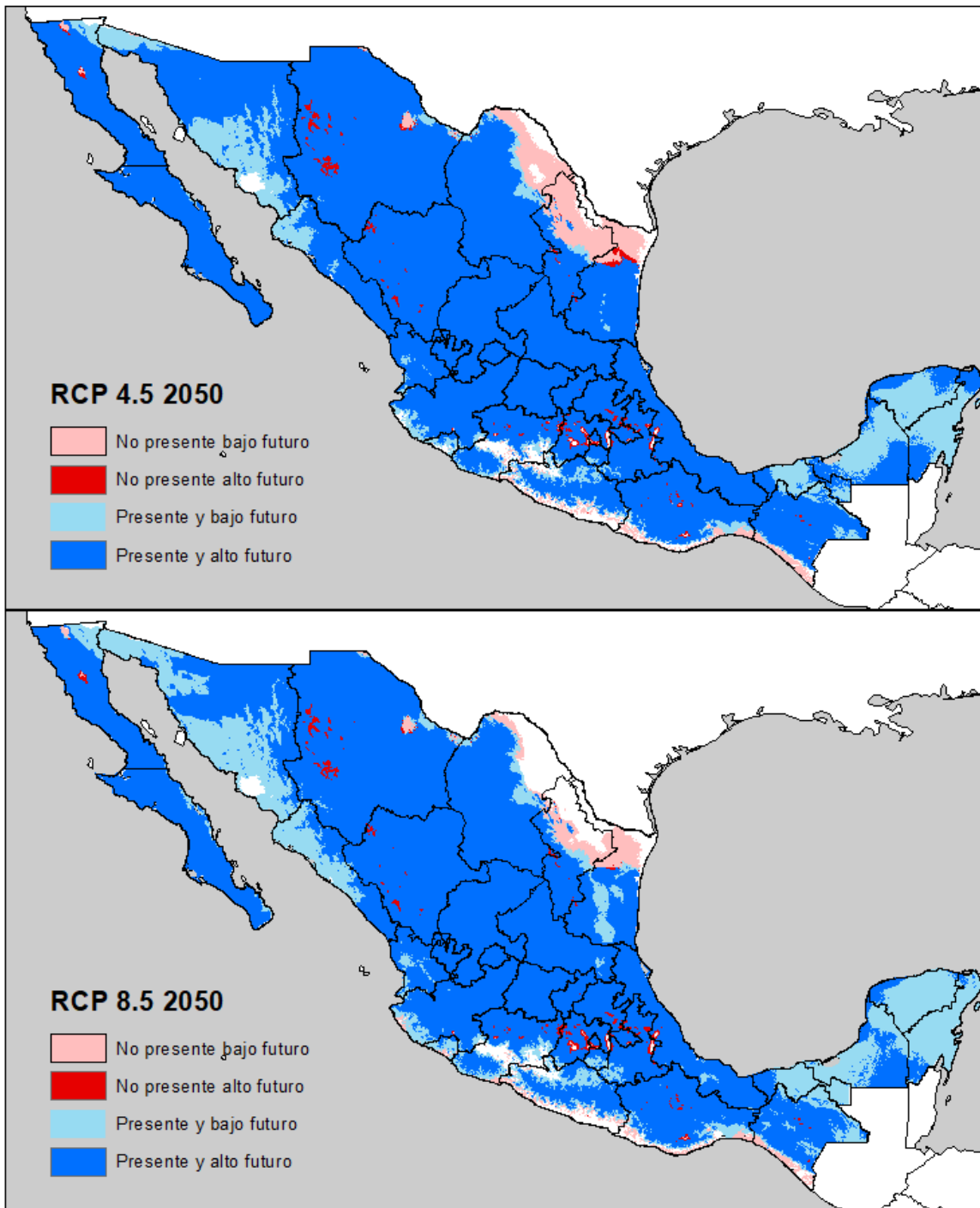
**Figura 7.** Distribución potencial futura de *G. Hirsutum*, para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050. Rosa: áreas predichas como no aptas para el presente y con pocas probabilidades para el futuro; rojo: áreas predichas como no aptas para el presente, pero con muy altas probabilidades para el futuro; azul claro: áreas predichas como aptas para el presente, pero con pocas probabilidades para el futuro; azul marino: áreas predichas como aptas para el presente y con muy altas probabilidades para el futuro y blanco: áreas no aptas para presente y futuro.

### ***Cambios en la distribución potencial futura de A. hypogaea***

Los resultados indican una gran extensión de territorio donde la especie presentará estabilidad en áreas en que se encuentran las condiciones del presente y el futuro. Puede observarse también que el cultivo encontrará nuevas áreas adecuadas en pequeñas regiones dentro de las provincias del Eje Volcánico, las Sierras Madre Oriental, Occidental y del Sur, y Altos de Chiapas (climas templado y semifrío). En contraste, con el RCP 8.5, se predice una reducción en las zonas de distribución (de clima cálido) de la especie en el norte del país en los estados de Tamaulipas y Nuevo León. Además de esto, puede observarse que, bajo este mismo escenario, algunas regiones de la Costa del Pacífico, consideradas como inadecuadas, contarán con las características ambientales adecuadas para la distribución de la especie (Figuras 8 y 9).



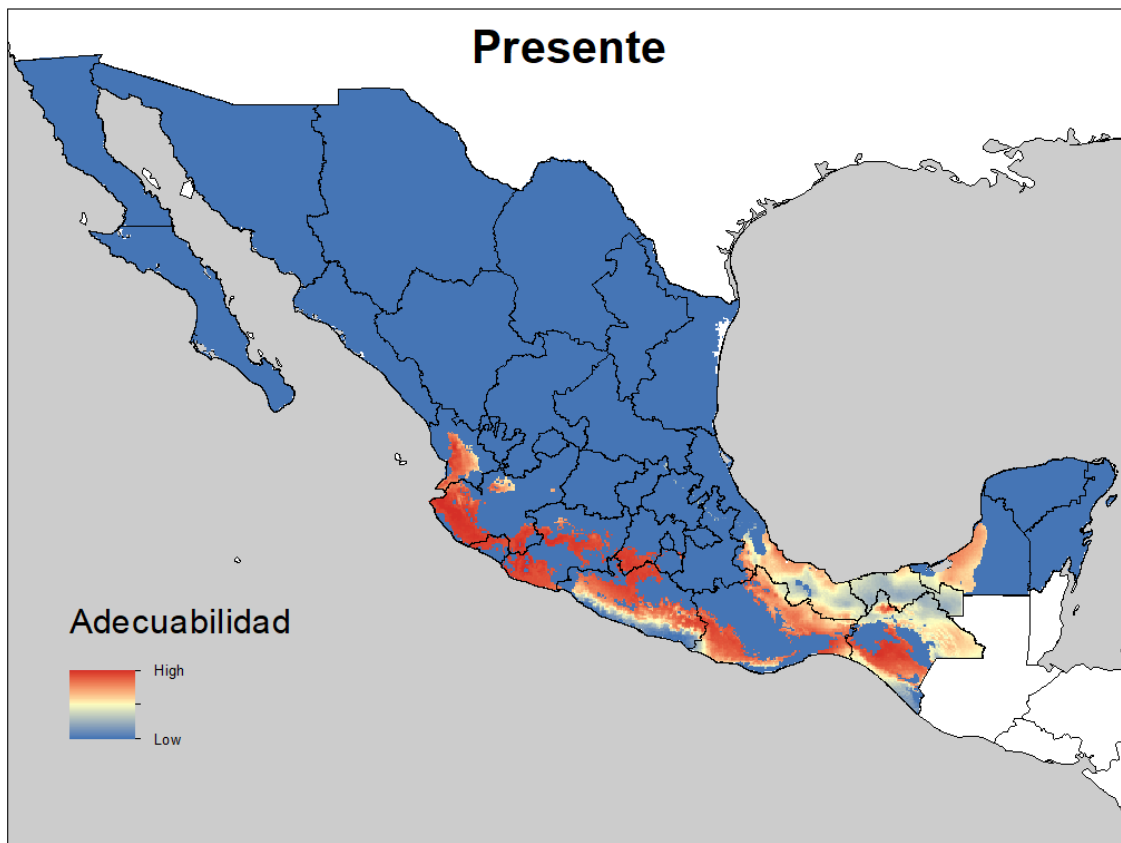
**Figura 8.** Predicción de distribución de *A. hypogaea* del presente.



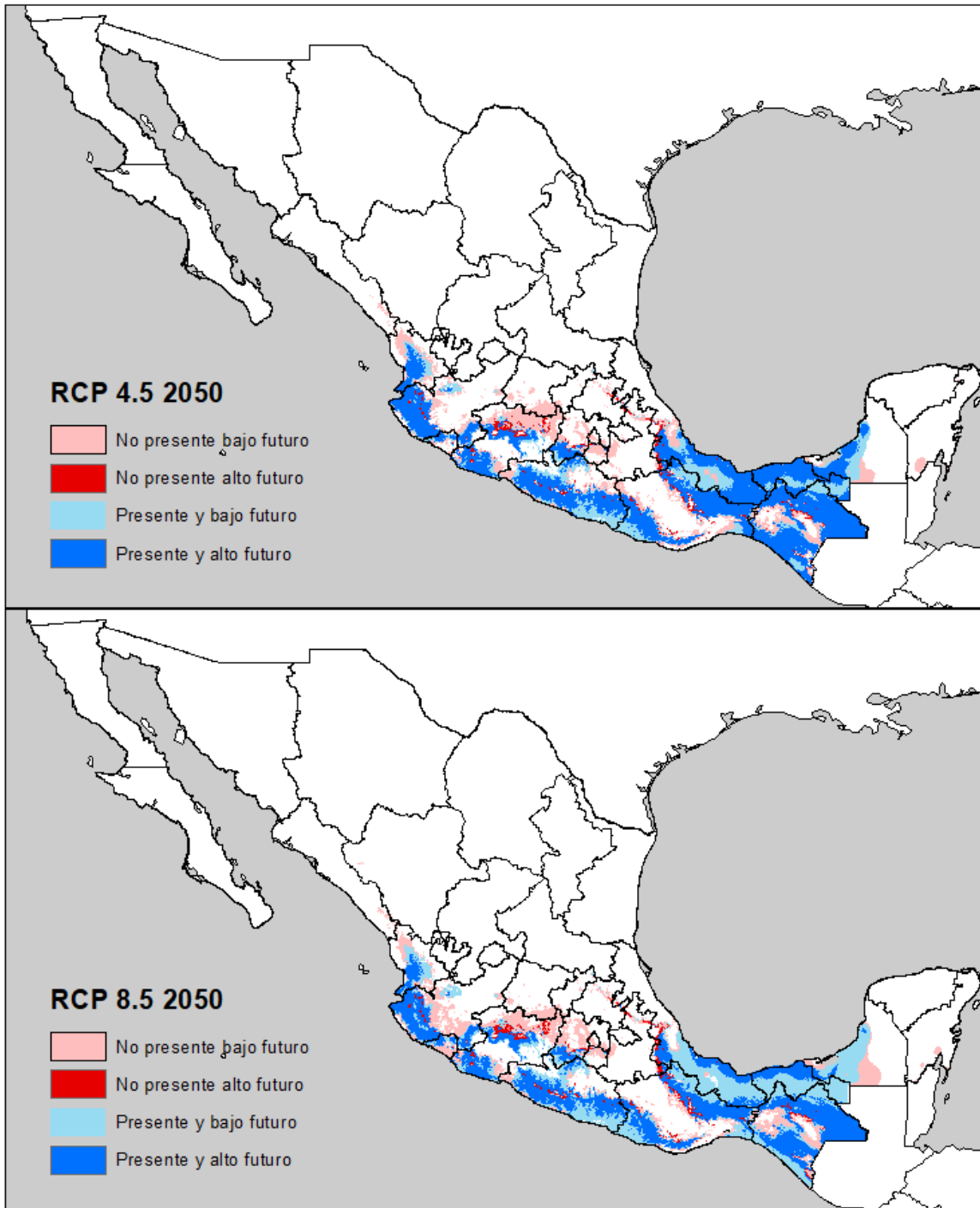
**Figura 9.** Distribución potencial futura de *A. hypogaea* para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050. Rosa: áreas predichas como no aptas para el presente y con pocas probabilidades para el futuro; rojo: áreas predichas como no aptas para el presente, pero con muy altas probabilidades para el futuro; azul claro: áreas predichas como aptas para el presente, pero con pocas probabilidades para el futuro; azul marino: áreas predichas como aptas para el presente y con muy altas probabilidades para el futuro y blanco: áreas no aptas para presente y futuro.

### ***Cambios en la distribución potencial de T. cacao***

De acuerdo con nuestros modelos, con el RCP 4.5, esta especie encontrará áreas adecuadas en zonas del Golfo de México, Costa del Pacífico y la Sierra Madre del Sur, donde ya se distribuye realmente. Sin embargo, con el RCP 8.5, se prevé una disminución de sus zonas de distribución en los estados de Tabasco, Chiapas, Veracruz y Oaxaca. Bajo ambos escenarios, pueden observarse sitios que presentan una alta adecuabilidad en el futuro dentro del Eje Volcánico, la Sierra Madre del Sur, Oaxaca, Altos de Chiapas y la Sierra Madre Oriental, esta última en la región mesófila de montaña en los estados de Puebla, Veracruz e Hidalgo. De igual modo, muchas partes de estas provincias disminuirán sus áreas con mayores probabilidades de que la especie encuentre alta adecuabilidad en el futuro. (Figuras 10 y 11).



**Figura 10.** Predicción de distribución de *T. cacao* del presente.



**Figura 11.** Distribución potencial futura de *T. cacao* para dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050.

Rosa: áreas predichas como no aptas para el presente y con pocas probabilidades para el futuro; rojo: áreas predichas como no aptas para el presente, pero con muy altas probabilidades para el futuro; azul claro: áreas predichas como aptas para el presente, pero con pocas probabilidades para el futuro; azul marino: áreas predichas como aptas para el presente y con muy altas probabilidades para el futuro y blanco: áreas no aptas para presente y futuro.

## DISCUSIÓN

Nuestro trabajo hace un primer acercamiento a cómo el cambio climático impactará a especies nativas mexicanas de importancia agrícola, que también son de importancia para la vida productiva del país, además del maíz (Ureta *et al.*, 2012). A pesar de esto, la información disponible acerca de cómo impactará el cambio climático en su distribución futura es muy escasa.

Este estudio aporta información acerca de los posibles efectos de cambio climático en la distribución potencial de tres especies agrícolas nativas de México. Los buenos resultados de los modelos con respecto a las pruebas de significancia, rendimiento y complejidad en dos de las especies (*G. hirsutum* y *T. cacao*) (Cobos *et al.*, 2019; Peterson *et al.*, 2011; Warren y Seifert *et al.*, 2011) se deben en parte a una buena elección del área de calibración elegida para cada especie (Barve *et al.*, 2011); además de a un número adecuado de ocurrencias, Peterson *et al.* (2000) sugieren un mínimo de 50 presencias para obtener buenos modelos de distribución.

Según lo observado en las proyecciones de los modelos, las especies tendrán una alta persistencia de distribución en el futuro al mantenerse en sus zonas actuales de distribución. Sin embargo, las tres especies cuentan con nuevas áreas geográficas distintas a las que se distribuyen actualmente en las que las especies contarán con zonas de alta idoneidad. La plasticidad y tolerancia de las especies agrícolas, generadas a través del manejo, permite que puedan modificar su distribución geográfica potencial y aumentar su tolerancia hacia diversas alteraciones ambientales (Reyes y Martínez, 2001). De acuerdo con Chávez- Servia *et al.* (2011) son las variedades y especies locales quienes presentan una mayor plasticidad genética y adaptación ante condiciones ecológicas adversas y es dentro de los sistemas de producción tradicionales donde se encuentra la mayor diversidad agrícola nativa expuesta a distintos procesos de selección natural y artificial que generalmente se encuentran adaptadas a nichos particulares (Ríos- Osorio *et al.*, 2014).

Los modelos de distribución potencial de especies nativas agrícolas elaborados en este estudio son una aproximación a la realidad. Es decir, representan el posible impacto del cambio climático en la distribución potencial de las especies, sin embargo, no reflejan todos los elementos que influyen en la distribución de estos cultivos como los tipos de suelo donde se cultivan y los aspectos económicos, sociales y culturales. La distribución actual de las especies domésticas, además de por el factor climático, se encuentra muy condicionada por el manejo del hombre a lo largo de muchos años, el cual ha sabido adaptar estas áreas idóneas climáticamente en sitios aptos para su producción. Este aspecto, es de gran relevancia para tomar decisiones con respecto a los resultados obtenidos en este trabajo. Con respecto a las variables edáficas, no es recomendable incluirlas en los modelos de distribución ya que es difícil predecir cómo serán los cambios en el futuro debido a que resultan de un conjunto de factores físicos, poblacionales y de disponibilidad tecnológica que pueden cambiar de formas rápidas e inesperadas (Stanton *et al.*, 2012).

### ***G. hirsutum***

Esta especie cuenta con la mayor extensión de zonas con alta probabilidad para ser distribuida. Ramírez-Ojeda *et al.* (2014) atribuyen los beneficios que causará el cambio climático en la distribución del cultivo debido a su amplio rango climático, aumentando hacia zonas áridas y semiáridas. La temperatura es un factor muy importante para los distintos procesos fenológicos de este cultivo, como son la germinación, floración, desarrollo y fructificación (Hearn y Constable, 1984).

De acuerdo con las proyecciones de nuestros modelos, bajo ambos escenarios, la especie tiene una alta probabilidad de distribución futura en sitios de clima árido y semiárido dentro de sus zonas de distribución actuales, principalmente de tipos de clima cálido y árido donde se encuentra actualmente, al ser un cultivo muy tolerante a las sequías (Chen *et al.*, 2019). Se ha reportado que durante 1961 y 2010

los rendimientos de la producción de algodón han incrementado un 13% con el aumento de 1°C de temperatura (Chen *et al.*, 2015).

Por otro lado, las proyecciones nos muestran también que con el RCP 8.5, existirán probabilidades de que el cultivo encuentre condiciones ambientales adecuadas en zonas de clima templado y frío dentro del eje Neovolcánico, donde no se encuentra actualmente. Estudios previos sugieren que las bajas temperaturas en este cultivo podrían ocasionar reducciones en su proceso de desarrollo, así como también, daños por el frío y una maduración tardía (Bange y Milroy, 2004). A pesar de ello, diversos autores afirman que su germinación puede ocurrir desde los 14°C e incluso a los 12°C (Ludwig, 1932; Reddy *et al.*, 1991); aunado a esto, Luo *et al.* (2014) señalan un menor daño hacia el cultivo con bajas temperaturas y un estrés superior ante la exposición a temperaturas mayores. En contraste, Krzyzanowski y Delouche (2011) mencionan que la temperatura ideal para la germinación de *G. hirsutum* es de 28 a 30°C, con riesgo a que si se supera este límite de temperatura se reduciría el crecimiento y la floración del cultivo (Reddy *et al.*, 1996; Snider *et al.*, 2011).

México se encuentra entre los 20 principales países productores de *G. hirsutum* con un valor de producción en el año 2011 de 7, 089, 887 millones de pesos, a pesar del aumento que ha existido de la producción de fibras sintéticas (Hernández, 2015). Además de esta competencia, los constantes incrementos en los costos de producción y la exposición a plagas (Álvarez, 2013 y Hernández, 2012) han sido los principales obstáculos para el aumento de su producción. Los principales estados productores de esta especie son Chihuahua, Baja California, Coahuila, Sonora, Durango, Sinaloa y Tamaulipas representando los mayores ingresos (SIAP, 2012). Se espera que, con las condiciones ambientalmente aptas predichas para la distribución del cultivo en estos estados, se tomen decisiones adecuadas para promover su producción nacional.

## *A. Hypogaea*

El cultivo de cacahuete se encuentra en regiones de tipo tropical y semiárido, con altas temperaturas y precipitaciones poco abundantes (Patel *et al.*, 2014; Sogut *et al.*, 2016). Mohamed *et al.* (1988) reportan una temperatura ideal para la germinación de las semillas de 29°C, temperaturas de 30°C para un buen crecimiento de la raíz (Suzuki, 1966) y de 31 a 33°C para su desarrollo.

Los resultados de este trabajo indican que, a pesar de los cambios reflejados por el cambio climático, el cacahuete mantendrá los sitios de distribución actual. Sin embargo, las proyecciones muestran también que la especie encontrará las condiciones ambientales aptas para su distribución potencial en zonas templadas de México. Los incrementos en la temperatura pueden afectar el rendimiento de este cultivo (Ketring 1984; Ong 1986; Wheeler *et al.* 1997) y causar daños en las vainas (Ono, 1979; Dreyer, 1981) Ullary, Guamán y Alava (2014) consideran que a pesar de que el cacahuete necesita ciertas condiciones ambientales para su producción, es idónea a diferentes regiones ambientales. Se sabe que con un descenso de temperaturas aumentaría el periodo de crecimiento del cultivo, pasando de 151 días a una temperatura de 23° a 176 días con una temperatura de 18°C. Aunado a esto, Bell *et al.* (1994) afirman que con temperaturas por debajo de los 12°C pueden ocurrir irregularidades en el metabolismo de la planta.

Durante la última década, la producción de *A. hypogaea* ha disminuido en casi un 40% debido a altos costos de producción, plagas y enfermedades (Financiera Rural, 2011). Los principales estados productores del cultivo en México son Guerrero, Oaxaca, Puebla y Chiapas donde se cultiva más del 50% de la superficie nacional, aunque con una baja productividad (Sánchez-Domínguez *et al.*, 2006). No obstante, Duque (2013) asegura que la producción de este cultivo es una actividad rentable para los productores del país al tener un beneficio/costo de hasta 1.7. Por ello, las probabilidades de que existan áreas en México con condiciones ambientalmente idóneas para la especie representan un potencial importante para este cultivo en el futuro.

## *T. cacao*

Los procesos fisiológicos de este cultivo se ven fuertemente influenciados por la temperatura (Daymond y Hadley, 2004); esta puede influir en los procesos de floración y crecimiento del cacao. (Omolaja *et al.*, 2009). La temperatura promedio anual para la producción de cacao es de 25°C (entre 20 y 32°C); presente en el Sureste y Península de Yucatán (Paredes *et al.*, 2004). De acuerdo con nuestros resultados la distribución potencial del cultivo presenta disminuciones bajo los dos escenarios, presentando mayores pérdidas bajo el RCP 8.5. Y, por el contrario, ocurren incrementos en zonas de temperaturas semicálidas y templadas. De acuerdo con Paredes *et al.* (2004) y Enríquez (2006) la actividad de las raíces del cacao empieza a disminuir por debajo de los 15°C y se recomienda que no se realice su cultivo comercial en sitios con estas temperaturas, pues la planta puede empezar a sufrir daños (Doseret *et al.* 2012). Por el contrario, Alvim (1977), señala que el cultivo puede soportar temperaturas menores, aunque cabe la posibilidad de que es a largo plazo cuando empiecen a notarse los daños (Wood, 1985).

Con respecto a los requerimientos de precipitación, la especie se desarrolla idealmente con 1600 a 2500 mm anuales (Paredes *et al.* 2004). Wood (1985) asegura que la precipitación es el elemento con mayor influencia en los rendimientos del cultivo. Sin embargo, se ha reportado que este cultivo puede establecerse en áreas secas y en zonas muy contrastantes con su lugar de origen. (Car y Lockwood 2011) y Leite *et al.* 2012); áreas similares a las predichas por el modelo en la costa de Pacífico y Sierra Madre Oriental.

La disminución de probabilidad de áreas ambientales idóneas para el cultivo de *T. cacao* en los estados de Tabasco y Chiapas durante el RCP 8.5 representa un problema importante puesto que ambos son los principales productores del país. De acuerdo con OEIDRUS (2012), cerca de 41,000 familias dependen económicamente de esta actividad. Tabasco es el principal productor con el 73% de la producción nacional. Allí, existen aproximadamente 9,975 familias campesinas dedicadas a esta especie (De la Cruz *et al.*, 2015), lo cual podría ocasionar impactos en su economía. Chiapas, ocupó el segundo lugar con

una producción hasta el 2014 de aproximadamente 220, 229 ha dedicadas a este cultivo (SIAP, 2014). Espinosa-García et al. (2015) aseguran que existe un mercado potencial en México y debe aprovecharse que el país cuenta con las condiciones agroclimáticas necesarias para su producción e identificar áreas con un alto potencial productivo y económico. Los resultados nos muestran posibles áreas idóneas para la distribución del cultivo en los estados de Michoacán, Jalisco, México y Oaxaca.

## **CONCLUSIONES**

Los modelos de distribución y sus proyecciones indican que la distribución potencial de los tres cultivos presentará cambios por acción del cambio climático en el año 2050 bajo los RCPs 4.5 y 8.5.

Se observan zonas con alta idoneidad ambiental para los cultivos de cacao y cacahuate en zonas más altas de México (Sierra Madre Oriental y Sierra Madre Occidental para el caso del cacao; Eje Neovolcánico Transversal y Sierra Madre Occidental para el caso del cacahuate).

Se observan áreas con alta idoneidad ambiental en zonas más secas para el cultivo de algodón (Altiplano Potosino-Zacatecano) y regiones húmedas (Tabasco y Península de Yucatán).

## LITERATURA CITADA

Acot, P. 2005. Historia del clima. Desde el Big Bang a las catástrofes climáticas. Editorial El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. 268 pp.

Ahumada, R., Velázquez, G., Flores, E., y Romero, J. 2014. Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y ciencia*, 22, 48-53.

Altieri, M. y Nicholls, C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*, 3, 7-28.

Altieri, M. y Nicholls, C. 2013. Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7-20.

Alvim, P. 1977. Cacao. En: Ecophysiology of Tropical Crops. En: Kozlowski, T., Alvim, P. Academic Press. P. 279-313.

Anderson, R., Martínez-Meyer, E. 2004. Modeling species' geographic distributions for preliminary conservation assessments: An implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*, 116(2), 167-179. doi: 10.1016/S0006-3207(03)00187-3

Araujo, M., Pearson, R., y Thuiller, W. 2005. Validation of species-climate impact Models under climate change. *Global Change Biology*, 11(9), 1504-15013 10 pp. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001000.x

Araújo, M., y Guisan, A. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1677–1688. doi:10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x

Aragón, P. 1995. Factibilidades agrícolas y forestales en la República Mexicana. Ed. Trillas. México. 177 p.

Bange, M. y Milroy, S. 2004. Impact of short-term exposure to cold temperatures on early development of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(69), 655-664. doi:10.1071/AR03221

Barboza, O. 2013. Calentamiento global: La máxima expresión de la civilización petrofósil. *Revista Del CESLA*, 16, 35-68.

Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S., Peterson, A. y Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(119), 1810-1819.

Barragán, E. y Sarasty, J. 2012. Modelos productivos para el cultivo del algodón

Becerra, M. y Mance, H. 2009. Cambio climático: Lo que está en juego. Foro Nacional Ambiental. 73 pp.

Beck, J. 2013. Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? *Climate change*, 116(2), 177-189. doi:10.1007/s10584-012-0481-x

Bell, M., Roy, R., Tollenaar, M. y Michaels, T. 1994. Importance of variation in chilling tolerance for peanut genotypic adaptation to cool shorty-season environments. *Crop Science*, 34(4), 1030-1039. doi: 10.2135/cropsci1994.0011183x00340004003

Bellon, M., Hodson, R., Bergvinson, D., Beck, D., Martínez- Romero, E. y Montoya, Y. 2005. Targeting agricultural research to Benefit poor farmers: Relating poverty mapping to maize environments in Mexico. *Food Policy*, 30, 5-6. doi:10.1016/j.foodpol.2005.09.003

Bellon, M., Hodson, D. y Hellin, J. 2011. Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *PNAS*, 108(33), 13432- 13437. doi:10.1073/pnas.1103373108

Benavides, H. y León, G. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota técnica. Instituto e Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia.

Boege E. 2009. Centros de origen, pueblos indígenas y diversificación del maíz. *Revista de Cultura Científica* 92: 18-28.

Brown, J. 1984. On the relationship between abundance and distribution of species. *American Naturalist*, 124(2), 255-279.

Butler, T., Celen, A., Webb, S., Krstic, D. y Interrante, S. 2014. Temperature affects the germination of forage legume seeds. *Crop Science*, 54(6), 2846-2853. doi:10.2135/cropsci2014.01.0063

Caetano, J., Tessarolo, G., De Oliveira, G., da Silva e Souza, K., Felizola Diniz-Filho, J. y Nabout, J. 2018. Geographical patterns in climate and agricultural technology drive soybean productivity in Brazil. *PLOS ONE*, 13(1), 1–16. doi:10.1371/journal.pone.0191273

[CGIAR] Climate Change, Agriculture and Food Security. GCM Downscaled Data Portal. En línea: <http://ccafs-climate.org/>. Consultado en línea el 12 de septiembre del 2018.

Chávez-Servia, J., Carrillo-Rodríguez, A. Vera-Guzmán, E. y Rodríguez-Guzmán, R. 2011. Utilización actual y potencial del jitomate silvestre mexicano. Subsistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (SINAREFI), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, CIIDIR-Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional e Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Oaxaca, México. 72 p.

Chen, C., Pang, Y., Pan, X., Zhang, L., 2015. Impacts of climate change on cotton yield in China from 1961 to 2010 based on Provincial data. *Journal of Meteorological Research*, 29(3), 515-524. doi:10.1007/s13351-014-4082-7.

Chen, X., Qi, Z., Gui, D., Gu, Z., Ma, L. y Zeng, F. 2019. Simulating impacts of climate change on cotton yield and water requirement using RZWQM2. *Agricultural Water Management*, 222, 231-241. doi:10.1016/j.agwat.2019.05.030

Cline, W. 2007. Global warming and agriculture: impact estimates by country. Center for Global Development and Peterson Institute for International Economics. Finance and Development. Columbia University Press. Washington, DC.

Coll-Hurtado, A. 2000. México: Una visión geográfica. II.2. Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Conde, C. 2011. México y el cambio climático global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México

Conde, C., Saldaña, S. y Magaña, V. 2008. Fighting climate change: Human solidarity in a divided world. Report Office PNUD.

Córdova, C., Jaramillo, J., Córdova, Víctor., Carranza, I. y Morales, J. 2018. Chocolate casero tradicional en la región de la Chontalpa Tabasco, México: actores y saberes locales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 28(52), 2-27. doi:10.24836/es.v28i52.577

Crozier, S., Preston, A., Hurst, J., Payne, M., Mann, J., Hainly, L. y Miller, D. 2011. Cacao seeds are a “super fruit”: A comparative analysis of various fruit powders and products. *Chemistry Central Journal*, 5(1), 5. doi:10.1186/1752-153x-5-5

Dawson, B. y M. Spannagle. 2009. The complete guide to climate change. Routledge, New York. 436 p.

Daymond, A., y Hadley, P. 2004. The effects of temperature and light integral on early vegetative growth and chlorophyll fluorescence of four contrasting genotypes of cacao (*Theobroma cacao*). *Annals of Applied Biology*, 145(3), 257-262. doi:10.1111/j.1744-7348.2004.tb00381.x

- De la Cruz, E., Córdova-Ávalos, V., García-López, E., Bucio-Galindo, A. y Jaramillo-Villanueva, J. 2015. Manejo agronómico y caracterización socioeconómica del cacao en Comalcalco, Tabasco. *Foresta Veracruzana*, 17(1), 33-40.
- Díaz-José, O., Aguilar-Avila, J., Rendón-Medel, R. y Santoyo-Cortés, V. 2013. Current state of and perspectives on cocoa production in México. *Ciencia e investigación agraria*, 40, 279-289.
- Domínguez, N. 2010. Estudio investigativo del maní análisis de las propiedades nutricionales y medicinales, usos, y propuesta gastronómica. Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.
- Dosert N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. y Weigend, M. 2012. Hoja Botánica Cacao: Theobroma cacao L. Lima, Perú: Giacomotti Comunicación Gráfica S.A.C. Lima, Perú.
- Dreyer, J., Duncan, W. y McCloud, D. 1981. Fruit temperature growth and yield of peanut. *Crop Science*, 21(5), 686-688. doi:10.2135/cropsci1981.0011183x0021000500
- Duke, J. 1983. Handbook of energy Crops. Wiley, New York.
- Duque, M. 2013. Comparación agronómica de 10 cultivares de maní (*Arachis hypogaea*; Fabacea) en Ipala, Chiquimula. Tesis de licenciatura. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, Guatemala.
- Elith, J., Graham, C., Anderson, R. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. doi:10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x

- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudik, M. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57. doi:10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- Ellis, R., Hong, T., Roberts, E. 1990 An intermediate category of seed storage behaviour I. Coffee. *Journal of Experimental Botany*, 41(9), 1167-1174. doi:10.1093/jxb/41.9.1167
- El-Nahhal, I., Zourab, S., Kodeh, F., Elmanama, A., Selmane, M., Genois, I. y Babonneau, F. 2013. Nano-structured zinc oxide-cotton fibers: synthesis, characterization and applications. *Journal of Materials Science*, 24 (10), 3970-3975. doi:10.1007/s10854-013-1349-1
- Enríquez, G. A. 2006. Fenología y fisiología del cacao. Seminario Taller Internacional, Producción, calidad y mercadeo de cacao especiales. Quevedo, Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Espinosa, M., Peralta, O. y Romero, T. 2015. Ciclos biogeoquímicos en: Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo 1. Bases Científicas. Modelos y Modelación. UNAM. 157-172.
- Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., y White, L. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editorial: Cambridge University Press.
- Figueroa Bautista P, Gerritsen P, Villalvazo López V, Cruz Sandoval G. 2005. Articulando la sostenibilidad ecológica, económica y social: el caso del cacahuate orgánico. *Economía. Sociedad y Territorio*, 5, 477-497.
- Financiera Rural. 2011. Monografía del cacahuate. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial. Financiera Rural, México, DF.
- Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., Velhuizen, H. Van, B., Shah, M. y Tubiello, F. 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360(1463), 2067–2083. doi:10.1098/rstb.2005.1744

- Fowler, D., Byrns, B. y Greer, K. 2014. Overwinter low-temperature responses of cereals: analyses and simulation. *Crop Science*, 54(6), 2395-2405. doi: 10.2135/cropsci2014.03.0196
- Fundora, Z., 1999. Obtención de nuevas variedades de maní (*Arachis hypogaea* L.) a partir del germoplasma cultivado de la especie. Universidad agraria de la Habana. 100 p.
- Funes, F. Monzote, M. y Marrero, R. 2003. Maní (*Arachis hypogaea* L.). Manual de producción de oleaginosas. Instituto de investigaciones de Pastos y Forrajes. Cuba, La Habana.
- Galante, P., Babatunde, A., Muscarella, R., Jansa, S., Goodman, S. y Anderson, R. 2017. The challenge of modeling niches and distributions for data-poor species: a comprehensive approach to model complexity. *Ecography*, 41(5), 726-736. <https://doi:10.1111/ecog.02909>
- Gallegos, A. 2004. “Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático”. En: Martínez, J., Fernández, A. Osnaya, P. 2004. Cambio climático: Una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México. P. 41-51.
- García, M. 2008. Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Garces N. 2014. Antecedentes y condiciones actuales sobre el manejo y usos del algodón en seis comunidades del Totonacapan. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. Xalapa, México.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gillier, P. y Silvestre, P. 1970. El cacahuete o maní. Editorial Blume. Zaragoza, España.
- Grinnell, J. 1917. The niche-relationships of the California thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433. doi: 10.2307/4072271

- Guisan, A., Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat Models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009. doi:10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x
- Hardy, J. 2003. Climate change causes, effects and solutions. Willey, New York.
- Head, S., Swetman, A., Hammonds, T., Gordon, A., Southwell, K. y Harris, R. 1995. Small scale vegetable oil extraction. National Resources Institute. Kent, UK. 107 pp.
- Hearn, A. y Constable, G. 1984. Cotton. En: Goldsworthy, P. y Fisher, N, editores. *The Physiology of Tropical Field Crops*. Chichester, UK. Experimental Agriculture. P. 495-527.
- Hernández, J. 2015. Análisis de la producción de algodón (*Gossypium hirsutum*) en la comarca lagunera del estado de Coahuila de Zaragoza. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., y Jarvis, A. 2005. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hutchinson, G. 1978. *An Introduction to Population Ecology*. Yale University Press, New Haven, CT.
- INEGI. 2013. Uso de suelo y vegetación, escala 1: 250 000, serie V (capa unión), escala 1:250000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/OECD/IEA, Paris, France.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Jackson, S. y Overpeck, J. 2000. Responses of plant populations and communities to environmental changes of the late Quaternary. *Paleobiology*, 26(4), 194-220. doi:10.1666/0094-8373(2000)26[194:roppac]2.0.co;2

Jarvis, A., Lane, A. y Hijmans, R. 2008. The effect of Climate Change on Crop Wild Relatives. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126(1), 13-23. doi:10.1016/j.agee.2008.01.013

Jones, M., Singels, A. y Ruane, A. 2013: Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa. *Agricultural Systems*, 139, 260-270. doi:10.1016/j.agsy.2015.07.007

Krzyzanowski, F., y Delouche, J. 2011. Germination of cotton seed in relation to temperature. *Revista Brasileira de Sementes*, 33, 543-548. doi:10.1590/S0101-31222011000300017.

Lawlor, D. 2005. Plant responses to climate change: impacts and adaptation. *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. P. 81-88.

- Lim, B., Spanger-Siegried, E., Burton, I., Malone, E., y Huq, S. 2005. Marco de Políticas de adaptación al cambio climático. Desarrollando estrategias, políticas y medidas. PNUD. 274 pp.
- Lobo, J., Jiménez-Valverde, A. y Real, R. 2008. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution Models. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 145-151.
- López- Báez, O., Ramírez- González, S., Espinosa-Zaragoza, S., Villareal-Fuentes, Juan., Wong, Villareal, A. 2015. Diversidad vegetal y sustentabilidad del sistema agroforestal de cacao en la región de la selva de Chiapas, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(2), 56-63.
- Lorente, I., Gamo, D., Gómez, J., Santos, R., Flores, L., Camacho, A., Galindo, L. y Navarro, J. 2004. Los efectos biológicos del cambio climático. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 13(1), 103-110.
- Krzyzanowski, C. y Curtis, J. The germination of cotton seed at low temperature. *Revista Brasileira de Sementes*. 33(3), 367-380. <http://dx.doi:10.1590/S0101-31222011000300017> CAMBIAR LUDWIG
- Luo, Q., Bange, M., Clancy, L. 2014. Cotton crop phenology in a new temperature regime. *Ecological Modelling*, 285, 22-29. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.04.018
- Magaña, V. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magrin, G., Gay, C., Cruz, D., Giménez, J., Moreno, A., Nagy, G., Nobre, C. y Villamizar, A. 2007a. Latin America. In: *Climate Change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P. J., y Hanson, C.E. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 581-615.

Mateo, R., Felicísimo, A., y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de historia natural*, 84, 217-240.

Mendelsohn, R. 2008. The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1) 5-19. doi:10.1080/19390450802495882

Merow, C., Smith, M., y Silander, J. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. doi:10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Mohamed, H., Clark, J. y ONG, C. Genotypic differences in the temperature responses of tropical crops. *Journal of Experimental Botany*, 39(8), 1121-1128. doi:10.1093/jxb/39.8.1121

Monterroso, R., Gómez, J., Lluch-Cota, S., Sáenz, R., Pérez, E., Salvadero, C., Lluch, Cota, D., Saldivar-Lucio, R., Ponce- Díaz, G., Martínez, C., Ramírez- García, G. y Baca- del Moral, J. 2015. Sistemas de Producción de Alimentos y Seguridad Alimentaria. Reporte Mexicano de Cambio Climático Grupo II Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. Universidad Nacional Autónoma de México.

Monteny, G., Groenestein, C. y Hilhorst, M. 2001. Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1/3), 123-132. doi:10.1023/a:1012602911339

Motamayor, J., Risterucci, A., López, P., Ortiz, C., Moreno, A. y Lanaud, C. 2002. Cacao domestication I: the origin of cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89, 380-386.

Nakazawa, Y, Peterson, A. 2004. Seasonal niches of Nearctic-Neotropical migratory birds: implications for the evolution of migration. *Auk*, 121(2),610-618. doi:10.2307/4090425

O'Brien, K., y Leichenko, R. 2000. Double exposure: assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization. *Global Environmental Change*, 10(3), 221-232. doi:10.1016/s0959-3780(00)00021-2

OEIDRUS. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2012.

OEIDRUS. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2013.

Ojeda, W., Flores, J., Ontiveros, R. y Iñiguez, M. 2014 Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático. En: Arreguin, F., Rodríguez, O. y Montero, M. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. México. P. 89-100.

Ojeda, W. 2010. Evaluación del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa. INIFAP. 5-367.

Omolaja, S., Aikpokpodion, P., Adedeji, S., & Vwioko, D. 2010. Rainfall and temperature effects on flowering and pollen productions in cocoa. *African Crop Science Journal*, 17(1), 41-48. doi:10.4314/acsj.v17i1.54209

Ono, Y. 1979. Flowering and fruiting of peanut plants. *Japanese Agriculture Research Quarterly*, 3, 226-229.

Ordaz, J., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A., Serna, B. 2009. El Salvador: efectos del cambio climático sobre la agricultura. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. 65 pp.

Padgham, J. 2009. Agricultural Development Under a Changing Climate: Opportunities and Challenges for Adaptation. The World Bank. 169 pp.

Paredes, Arce, M. y Montero-Palacios, O. 2004. Manual de cultivo de cacao. Perú.

Parmesan, C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 37(1), 637-671. doi:10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.11010

Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., y Fischer, G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 53–67. doi:10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008

Perales, H. y Aguirre, J. 2008. Biodiversidad humana en Capital Natural de México. 1, 565-603.

Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M y Araujo, M. 2011. Ecological Niches and Geographic Distributions. Vol. 13. Princeton University Press.

Peterson, A. T. y Soberón, J. 2012. Species Distribution Modeling and Ecological Niche Modeling: Getting the Concepts Right. *Brazilian Journal of Nature Conservation*, 10(2), 102–107. doi:10.4322/natcon.2012.019

Peterson, T., Papes, M. y Soberon, J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008

Peterson, A., Egbert, S., Sánchez-Cordero, V., Price, K. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic birds and mammals in Veracruz, México. *Biological Conservation*, 93(1), 85-94. doi:10.1016/S0006-3207(99)00074-9

Peterson, A.T., Papeş, M. y Soberón, J. 2016. Mechanistic and correlative models of ecological niches. *European journal of Ecology*, 1(29), 28-38. doi:10.1515/eje-2015-0014

Phillips, S., Anderson, R., y Schapire. R. 2006. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Pikesley, S., Broderick, A., Cejudo, D., Coyne, M. S., Godfrey, M., Godley, B., y Hawkes, L. 2014. Modelling the niche for a marine vertebrate: a case study incorporating behavioural plasticity, proximate threats and climate change. *Ecography*, 38(8), 803-812. doi:10.1111/ecog.01245

Qiao, H., Escobar, L., Peterson, T., Soberón, J., Zhu, G y Papes, M. 2019. An evaluation of transferability of ecological niche Models. *Ecography*, 42, 521-534. doi:10.1111/ecog.03986

Ramírez-Ojeda, G., Ruiz-corrall, J. A., Pérez-Mendoza, C., Villavicencio-García, R., & Mena, S. (2014). Impactos del cambio climático en la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10, 1885-1895.

Ramos, C., Castro, A., León, N., Álvarez, J. y Huerta, E. 2018. Lombricomposta para recuperar la fertilidad del suelo franco arenoso y el rendimiento de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) *Terra Latinoamericana*, 37, 45-55.

Reddy, V., ReddK. y Baker, D. 1991. Temperature effects on growth and development of cotton during the fruiting period. *Agronomy Journal*, 83(1),211-217. doi:10.2134/agronj1991.00021962008300010050x

Reddy, K., Hodges, H., McCarty, W. y McKinion, J. 1996. Weather and cotton growth: present and future. In: Reddy, K, editor. Mississippi State, MS, Agricultural Communications.

Remya, K., Ramachandran, A. y Jayakumar, S. 2015. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats. India. *Ecological Engineering*, 82, 184-188. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.04.053

Reyes, J. y Martínez, D. 2001. La plasticidad de las plantas. *Elementos* 8-1

Ríos-Osorio, Oliva & Chavez-Servia, Jose Luis & Carrillo-Rodríguez, J.C. 2014. Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) nativo: Un estudio de caso en Tehuantepec-Juchitán, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 11, 35-51.

Rueda, V. 2004. El cambio climático global: comprender el problema en: Martínez, J., Bermautz, A y Osnaya, P. Cambio climático: Una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.

[SAGARPA] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2014. Análisis de la cadena de valor en la producción de algodón en México. En línea: <http://www.redinnovagro.in/pdfs/algodon.pdf> Consultado en línea el 16 de agosto de 2018.

Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Cavazos-Pérez, M., Granados-Ramírez, G. y Gómez-Reyes, E. 2011. Elementos para entender el cambio climático y sus impactos. Editorial Miguel Ángel Porrúa, México. DF. 167 pp.

Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Linaje, M., Sarkar, S., y Peterson, A. T. 2005. Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation*, 126, 465-473. doi:10.1016/j.biocon.2005.06.022

Saynes, V., Etchevers, J., Paz, F. y Alvarado, L. 2016. Emisiones de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 83-96.

SEMARNAT- INECC. 2015. Elementos Mínimos Para la Elaboración de los Programas de Cambio Climático de las Entidades Federativas.

[SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la Producción Agrícola por Cultivo. 2008. En línea: [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp). Consultado el 15 de marzo del 2018.

[SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la Producción Agrícola por Cultivo. 2012. En línea: [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp). Consultado el 15 de marzo del 2018.

[SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola por cultivo. 2014. En línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. Consultado en línea el 14 de marzo del 2018.

[SIAP] Servicio de información agroalimentaria y pesquera. 2019. Expectativas de producción agropecuaria y pesquera. En línea: <https://www.gob.mx/siap/documentos/expectativas-de-produccion-agropecuaria-pesquera>. Consultado en línea el 18 de septiembre de 2018.

Singh, P., Nedumaran, S., Ntare, B., Boote, K., Singh, N., y Srinivas, K. 2014. Potential benefits of drought and heat tolerance in groundnut for adaptation to climate change in India and West Africa. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(5), 509-529. doi:10.1007/s11027-012-9446-7

Snider, J., Oosterhuis D., Loka D., y Kawakami E. 2011. High temperature limits *in vivo* pollen tube growth rates by altering diurnal carbohydrates balance in field-grown *Gossypium hirsutum* pistils. *Journal of Plant Physiology*, 168(11) 1168-1175. doi:10.1016/j.jplph.2010.12.011

- Soberon, J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distribution of species. *Ecology letters*, 10(12): 1115-1123. doi:10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x
- Soberon, J. y Nakamura, M. 2009. Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(2), 19644-19650. doi: 10.1073/pnas.0901637106
- Soberón, J. y Peterson A. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity informatics*, 2, 1-10. doi:10.17161/bi.v2i0.4
- Stanton, J., Pearson, R., Horning, N., Ersts, P. y Resit, H. 2012. Combining static and dynamic variables in species distribution models under climate change. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 349-357.
- Steele, K., y Werndl, C. 2013. Climate Models, Calibration, and Confirmation. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 64, 609–635. doi:10.1093/bjps/axs036
- Suzuki, M. 1966. Studies on the thermoperiodicity of crops. II. The effect of soil temperature to fructification on peanuts. Chiba Univ. *Tech. Bull*, 13,95-101.
- Thapa, S., Chitale, V., Rijal, S. J., Bisht, N., & Shrestha, B. 2018. Understanding the dynamics in distribution of invasive alien plant species under predicted climate change in Western Himalaya. *Plos One*, 13(4),1-16. doi:10.1371/journal.pone.0195752
- Tinoco, J., Gómez, J., Monterroso, A. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29, 161-168.
- Tonconi, J. 2015. Producción agrícola alimentaria y cambio climático: un análisis económico en el departamento de Puno, Perú. *IDESIA*, 33(2), 119-136.

- Ulloa, M., Stewart, J., García, E., Godoy, A., Gaytan, M. y Acosta, S. 2006. Cotton Genetic resources in the Western States of Mexico: *in situ* conservation status and germoplasm collection for *ex situ* preservation. *Genetic resources and crop evolution*, 53, 653-668. doi 10.1007/s10722-004-2988-0
- Ureta, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. y Álvarez-Buylla, E. 2012. Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*, 18 1073-1082. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02607.x
- Vargas, G. y Leo, J. 2003. Calentamiento global de la Tierra. Un ejercicio econométrico. *Momento Económico*, 125, 30-38.
- Vergara, W., Rios, A., Trapido, P. y Malarín, H. 2014. Agricultura y Clima Futuro en América Latina y el Caribe: Impactos sistémicos y posibles respuestas. Documento de Debate. Banco Interamericano de Desarrollo. 15 pp.
- Vidal-Zepeda, R. 2005. Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Vila, M. 2016. Estudio de los cambios en los patrones de oleaje en la costa catalana debido al efecto del cambio climático. Tesina final de carrera. Escola de Camins. 71 pp.
- Vinent, E. y Fajardo, O. 2007. Parámetros agrícolas de ocho cultivares de algodón (*Gossypium hirsutum*) obtenidos en Cuba. *Ciencia e investigación agraria*, 34(2), 151-158.
- Vizcarra, C., Barrera, H., Quezada, M. 1993. Monografía del cultivo de cacahuete (*Arachis hypogaea* L). Tesis de licenciatura. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.
- Waizel, S., Waizel, J., Magaña, J., Campos, P. y San Esteban, J. 2012. Cacao y chocolate: seducción y terapéutica. *Anales médicos*, 57( 3), 236-245.

Wan, J., Wang, C., y Yu, F. 2016. Impacts of the spatial scale of climate data on the modeled distribution probabilities of invasive tree species throughout the world. *Ecological Informatics*, 36, 42-49. doi:10.1016/j.ecoinf.2016.10.001

Warren, D. y Seifert, S. 2011. Ecological Niche Modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological applications*, 21(2), 335-342. doi:10.1890/10-1171.1

Wood, G. 1985. Environment. In: Wood, R y Lass, R, editors. Cocoa. P. 681-698

Wintle, B., Kavanagh, R., McCarthy, M. y Burgman, M. 2005. Estimating and dealing with detectability in occupancy surveys for forest owls and arboreal marsupials. *Journal of Wildlife Management*, 69(3), 905-917. doi:10.2193/0022-541x(2005)069[0905:eadwdi]2.0.co;2

Yang, X., Kushwaha, S. Saran, S. y Xu, J. 2013. MaxEnt modelling for predicting the potential distribution of medicinal plant *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills *Ecological Engineering*, 51, 83-87. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.12.004

Zarazúa, V. 2011. Evaluación del Cambio Climático y sus Impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y agave de la región Ciénega de Chapala: análisis retrospectivo y prospectivo. Tesis doctoral. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.