



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Iztapalapa

TÍTULO DE LA TESIS

Efectos del cambio climático en los cultivos de caña de azúcar
(*Saccharum officinarum* L.) en México y el Mundo

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Biología

PRESENTA

PEDRO SANTIAGO RAMÍREZ BARRIOS

Fecha

México, Ciudad de México a 12 de diciembre de 2018

La Maestría en Biología de la
Universidad Autónoma Metropolitana
Pertenece al Padrón de
Posgrados de Calidad del CONACyT

El jurado designado por la

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

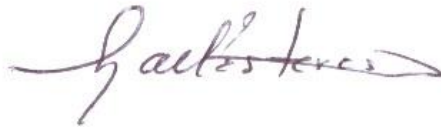
De la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis que presentó

Pedro Santiago Ramírez Barrios

El día 12 de diciembre del año de 2018

Comité tutorial y Jurado

Tutor: Dra. Claudia Ballesteros Barrera

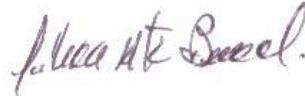


Asesor: Dr. Daniel Jiménez García

Asesor: Dr. Jesús Daniel Grande Cano



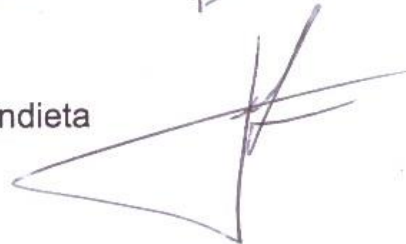
Sinodal: M. en C. Angélica Martínez Bernal



Sinodal: Dra. Rocío Zarate Hernández



Sinodal: Dr. Francisco Gutiérrez Mendieta



DEDICATORIA

A la UAM-I reconocida como una de las mejores universidades en México, por contribuir enormemente en mi formación profesional y por ser mi segunda casa.

A mis padres y mi hermano por todo su apoyo y consejos durante toda mi vida.

A toda mi familia.

A Moon, gracias por estar conmigo, por apoyarme y por todos los maravillosos momentos que hemos vivido.

A mis compañeros y amigos de la licenciatura y maestría por sus consejos y todos los gratos momentos.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

A mi comité tutorial por compartirme sus conocimientos y enseñanzas, por su apoyo y su guía durante todo este proceso.

A mí querida Dra. Claudia Ballesteros Barrera por brindarme su amistad, por todo el apoyo, sus consejos y los jalones de oreja.

Al Dr. Daniel Jiménez García y Dr. Jesús Daniel Grande Cano por su colaboración y su tiempo para realizar el presente trabajo.

A la Dra. Roció Zarate Hernández por su amistad, su apoyo y consejos.

A la M. en C. Angélica Martínez Bernal por su apoyo, su disposición y sus consejos.

A la comisión de la maestría en biología por el apoyo brindado durante todo este tiempo.

Al Dr. Francisco Mendieta Gutiérrez por toda su ayuda y disposición para concretar este proceso

A mi compañeros de laboratorio Osiris Aguilar Romero, Lizzi Martínez Martínez, Sandra Miguel Santiago, Zuriel Lara, Oscar Tapia y Luis Alonso, por sus múltiples aportaciones y consejos.

A Saúl González por el préstamo de tomos del Manual Azucarero Mexicano.

RESUMEN

En la actualidad el cambio climático ha sido señalado como una de las principales amenazas para las especies silvestres y las especies cultivadas. Debido a la intrincada relación entre el clima y las especies, se tiene registro de modificaciones en la distribución, en la fenología y en las interacciones bióticas de especies terrestre y marinas. Se ha observado un aumento de 0.85°C desde 1880 y se espera un aumento de hasta 4.8°C para las siguientes décadas a nivel mundial, en México el incremento podría ser de hasta 3.5°C . Este trabajo evaluó el efecto del cambio climático en el cultivo de caña de azúcar en México y el Mundo, utilizando el modelado de la distribución potencial. Para ello se construyeron bases de datos con la ubicación geográfica de los cultivos azucareros a nivel mundial, y para México se consultaron las principales variedades cultivadas y en particular para aquellos ingenios en categoría de temporal. En cada caso (México y Mundial) se realizaron modelos de nicho ecológico para obtener su distribución potencial en el presente y se realizaron proyecciones a futuro (RCP 2.6 y 4.5 a 2050 y 2070). Se generaron mapas con la distribución potencial para observar los cambios presente versus futuro, además estos cambios fueron evaluados mediante el estadístico Kappa y así conocer el grado de cambio espacial entre las distribuciones.

Los resultados a nivel Mundial sugieren una constancia en la conservación de áreas con condiciones a futuro de hasta 93% respecto del área presente, una ganancia en áreas nuevas para posibles cultivos azucareros de hasta 72% y una pérdida de 7%, coincidiendo ambos escenarios en países como Brasil, Costa Rica

o República Democrática de Congo. Para México los análisis para las principales variedades (CP 72-2086 y MEX 69-290) conservan hasta un 85 % del su área de distribución, la ganancia de áreas potenciales se ve reflejada en mayor porcentaje para aquellos ingenios de temporal aumentando casi el doble de la distribución en el presente y reflejándose en mayor proporción dentro de la Península de Yucatán, la pérdida de áreas asciende hasta un 33% reflejándose principalmente en la región de noreste del país, siendo constante a 2050 y 2070 para ambos escenarios. Finalmente se presenta una tendencia para la permanencia de áreas potenciales para el desarrollo de la caña de azúcar a futuro en el Mundo y para las principales variedades cultivadas en México, además de los altos porcentajes en áreas de ganancia bajo los cuales potencialmente se puede desarrollar la caña de azúcar.

ABSTRACT

Currently, climate change has been pointed out as one of the most important threats to wild and cultivated plant species. Due to the close relationship between climate and species, it has been changes in the distribution, phenology and in the biotic interactions in both terrestrial and marine plant species. Since 1880, the temperature of the world has increased 0.85°C , with expected increases of up to 4.8°C in the next decades, while in Mexico the increase could be up to 3.5°C . The objective of this work was to evaluate the effect of climate change on the cultivation of sugarcane in Mexico and the world, using the modeling of the potential distribution. It was built a database with the geographical location of the sugarcane crops worldwide, and for Mexico the database contains the main rain-fed grown sugarcane varieties. In both cases, ecological niche models were constructed to obtain the potential distribution of the crop in the present and its future projections (RCP 2.6 and 4.5 to 2050 and 2070). The models were evaluated through the Kappa analysis, with the objective of knowing the spatial changes between current and future distributions. Worldwide, the results suggest a future constancy in the conservation of the areas with conditions for the cultivation of sugarcane up to 93% with respect to the present area, an increase in new areas for cultivation of up to 72% and a loss of 7%, with the same pattern in both scenarios in countries such as Brazil, Costa Rica or the Democratic Republic of the Congo. In Mexico, the main varieties of sugarcane grown (CP 72-2086 and MEX 69-290) conserve up to 85% of their current distribution area, while the increase in the potential areas indicates larger areas for the rain-fed cultivated sugarcane, with increases of almost double

the distribution in the present and a greater proportion in the Yucatan Peninsula, the loss of 33% of the cultivated areas, mainly in the northeast region of the country, being constant to 2050 and 2070 for both scenarios. Finally, there is a trend for the future permanence of potential areas for the cultivation of sugarcane in the world and for the main varieties grown in Mexico, as well as increases in new potential areas for cultivation.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	14
<i>El cambio climático a futuro</i>	16
<i>Modelado de nicho ecológico</i>	18
<i>El cambio climático y sus efectos en la agricultura, estudios a futuro</i>	20
<i>El cultivo de caña de azúcar</i>	22
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	26
HIPÓTESIS.....	26
OBJETIVOS.....	26
<i>Objetivos particulares</i>	26
LITERATURA CITADA	27
CAPÍTULO I.....	42
Distribución potencial presente y futura del cultivo de caña de (<i>Saccharum officinarum</i> L.) en México	
INTRODUCCIÓN	43
<i>El cultivo de caña de azúcar en México</i>	43
<i>Varietades de caña de azúcar</i>	44
<i>El cambio climático y los cultivos de México</i>	46
MÉTODOS.....	48
<i>Base de datos de México</i>	48
<i>Datos climáticos</i>	49

<i>Perfiles bioclimáticos</i>	50
<i>Modelado de nicho ecológico y análisis estadísticos</i>	50
RESULTADOS	54
<i>Distribución potencial actual</i>	55
<i>Distribución potencial a futuro</i>	56
DISCUSIÓN.....	69
CONCLUSIONES	74
LITERATURA CITADA	75
CAPÍTULO II.....	85
Distribución potencial presente y futura del cultivo de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L.) en el Mundo	
INTRODUCCIÓN	86
<i>El cultivo de caña de azúcar</i>	86
<i>Condiciones climáticas para el desarrollo de la caña de azúcar</i>	87
<i>Estudios de cambio climático en el cultivo de caña de azúcar</i>	88
MÉTODOS.....	89
<i>Base de datos Mundial</i>	89
<i>Datos climáticos</i>	90
<i>Perfiles bioclimáticos</i>	91
<i>Modelos de nicho ecológico y análisis</i>	91

RESULTADOS	94
<i>Áreas de distribución potencial bajo el escenario RCP 2.6</i>	95
<i>Áreas de distribución bajo el escenario RCP 4.5</i>	96
DISCUSIÓN	103
CONCLUSIONES	108
LITERATURA CITADA	109
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES.....	119
LITERATURA CITADA	123
Anexo A	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de caña de azúcar. A. Sistema radicular. B. Tallo. C. Hoja. D. Flor. (Amaya <i>et al.</i> 1994).	24
Figura 2. Regiones cañeras de México, los puntos en rojo representan los ingenios azucareros (CONADESUCA 2010).	44
Figura 3. Ubicación de los ingenios de temporal y riego en México.	55
Figura 4. A. Distribución potencial al presente de la variedad CP-72-2086. B. Distribución potencial al presente de la variedad MEX 69-290.	57
Figura 5. Distribución potencial al presente de los ingenios de temporal en México.	58
Figura 6. Cambios en la distribución potencial de la variedad MEX 69-290, A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070.	63
Figura 7. Cambios en la distribución potencial de la variedad CP 72-2086. A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070. C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070.	64
Figura 8. Cambios en la distribución potencial de los ingenios de temporal de México. A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070. C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070	65
Figura 9. Porcentajes de cambio de variedades MEX 69-290, CP 72-2086 e ingenios de temporal bajo escenarios de cambio climático.	66
Figura 10. Cambios en la temperatura promedio anual (Bio 1). A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050, D. RCP 4.5 2070.	67
Figura 11. Cambios en la precipitación total anual (BIO 12). A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050, D. RCP 4.5 2070.	68

Figura 12. Distribución potencial en el presente de <i>Saccharum officinarum</i> en el Mundo.	98
Figura 13. Distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo el escenario RCP 2.6 2050 en el Mundo.....	99
Figura 14. Distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo el escenario RCP 2.6 2070 en el Mundo.....	100
Figura 15. Distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo el escenario RCP 4.5 2050 en el Mundo.....	101
Figura 16. Distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo el escenario RCP 4.5 2070 en el Mundo.....	102
Figura 17. Porcentaje de cambio en la distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 de cambio climático en el Mundo.	103

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables bioclimáticas ocupadas para los modelos de nicho ecológico.	51
Cuadro 2. Valores e interpretación del estadístico Kappa (Landis & Koch 1997).	53
Cuadro 3. Porcentajes y área de la distribución potencial de las variedades MEX 69-290, CP 72-2086 y zonas de temporal bajo el escenario RCP 2.6... ..	62
Cuadro 4. Porcentajes y área de la distribución potencial de las variedades MEX 69-290, CP 72-2086 y zonas de temporal bajo el escenario RCP 4.5... ..	62
Cuadro 5. Valores del estadístico Kappa para los escenarios 2.6 y 4.5 hacia el 2050 y 2070.	69
Cuadro 6. Umbrales de temperatura para diferentes etapas fenológicas de la caña (modificado de Bonnett 2014).....	71
Cuadro 7. Máximo y mínimos de variables bioclimáticas de localidades de México. *Temperatura máxima del mes más caliente, ** Temperatura mínima de mes más frío,***Temperatura media del trimestre más seco, ****Temperatura media del trimestre más frío, bajo el escenario RCP 4.5 2070.	72
Cuadro 8. Variables bioclimáticas ocupadas para los modelos de nicho ecológico.	92
Cuadro 9. Valores e interpretación del estadístico Kappa.....	94
Cuadro 10. Porcentajes y área de la distribución potencial de <i>Saccharum officinarum</i> bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 de cambio climático. ...	103

Cuadro 11. Área de distribución potencial en el presente y bajo escenarios de cambio climático. P=Pérdida, Pm=Permanencia, G=Ganancia. El área se representa en km ²	125
Cuadro 12 Porcentajes por país de distribución potencial en el presente y bajo escenarios de cambio climático. P=Pérdida, Pm=Permanencia, G=Ganancia.....	129

INTRODUCCIÓN

El clima se analiza tomando en cuenta factores como la altitud, latitud, la distancia del continente al mar, las corrientes oceánicas, la topografía y con los elementos propios como la temperatura, la precipitación, humedad y presión atmosférica (Carreto *et al.* 2000). El clima es el resultado de la interacción constante y compleja entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y la vida en el planeta (Conde 2011). Al clima se le considera un sistema complejo y dinámico, y para llegar a una denominación climática de un sitio en específico se utilizan datos de por lo menos 30 años de los elementos que confluyen, dicho de otra forma es la descripción estadística en términos de la media y la variabilidad de sus elementos (Casas & Alarcón 1999).

Un componente esencial para el clima es la atmósfera, la cual se compone en mayor proporción de nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), y en menor cantidad argón (Ar), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua; estos tres últimos, junto con el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), tienen la propiedad de absorber parte de la radiación solar que sale de la Tierra (Fortín 2006), a este proceso se le denomina efecto invernadero el cual se modifica cuando las concentraciones de los gases en la atmósfera cambian (Barros 2005).

El efecto invernadero es un mecanismo natural de la Tierra, pero a raíz de la intensificación de las actividades humanas se ha incrementado la presencia de los gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el CO_2 , CH_4 y N_2O , provocando así el calentamiento global (Garduño 2004; Caballero *et al.* 2007), que

ha alterado los patrones climáticos y causado la acentuada variabilidad climática que se observa actualmente (Le Treut *et al.* 2007; Rosenzweig *et al.* 2008). Entre los factores esenciales para este aumento se indica el crecimiento poblacional de los últimos 200 años (IPCC 2007; Le Treut *et al.* 2007). Durante el siglo XVIII se llevó a cabo la revolución industrial, la cual se considera como uno de los eventos que desencadenó la ampliación del impacto del ser humano hacia los ecosistemas (Hughes 2000; Taylor 2002; Houghton 2005; Zamora *et al.* 2016).

La temperatura media de la Tierra y del océano ha aumentado 0.85°C de 1880 al 2012 (Stocker *et al.* 2013). Los últimos 100 años han sido los más calientes de los últimos 1,000 años (Mann & Jones 2003). Los aumentos en la temperatura han traído como consecuencia un incremento en el nivel del mar por efecto de la reducción de los glaciares y casquetes polares (IPCC 2013); se tienen registros de un calentamiento en la Antártica de alrededor de 2.5°C desde 1945 (Vaughan & Doake 1996). Los cambios en la precipitación se estiman como incrementos y decrementos en el Mundo; en particular para el Hemisferio Norte se registra un aumento desde 1901 (IPCC 2013). En México desde la década de 1960 el clima ha sido más cálido, la temperatura promedio del país ha aumentado 0.85°C y la cantidad de días frescos se ha reducido desde los años setenta (INECC 2016). Por su parte, los datos de las últimas décadas (1945-1995) muestran una tendencia al aumento de la precipitación para el noroeste del país y un decremento para el sur (Magaña *et al.* 2004).

Debido a la relación existente entre el clima y la biodiversidad, se tiene registro de los cambios en la biodiversidad terrestre (Smith *et al.* 2018), en su fenología

(Körner & Basler 2010; Parmesan & Hanley 2015), en su distribución (Huges 2000; Root *et al.* 2003; Parmesan 2006), modificaciones en las interacciones bióticas (Walther *et al.* 2002), y de igual forma se han registrado para especies marinas (Parmesan 2006; Brown *et al.* 2016).

El cambio climático a futuro

Actualmente se han desarrollado una serie de investigaciones con el objeto de conocer los efectos del cambio climático en los siguientes decenios. Parte del conocimiento de cómo serán estos impactos, es para la generación de los modelos de circulación general (MCG). Cada MCG intenta describir enlaces mecánicos de procesos de las interacciones entre la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y los hielos marinos que dan lugar al clima (IPCC 2001; Kang *et al.* 2009). Los resultados de los MCG dan lugar a la construcción de escenarios de cambio climático, los cuales representan una aproximación de un futuro en función de diversas áreas; socioeconómica, tecnológica, las emisiones de gases de efecto invernadero y las condiciones climáticas. Los escenarios ayudan a evaluar la incertidumbre sobre las respuestas del sistema climático y el sistema terrestre ante las contribuciones humanas, el rango de los impactos del clima a futuro, la implicaciones de diferentes aproximaciones de mitigación y la adaptación (Moss *et al.* 2010; Van Vuuren *et al.* 2011).

Los escenarios de cambio climático han sido nombrados trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés), cada RCP describe cambios en el forzamiento radiativo o climático que ocurren en el balance

energético del sistema climático (IPCC 2013). El escenario a futuro con el menor forzamiento radiativo es el RCP 2.6, el cual refleja emisiones de gases de efecto invernadero bajas, reduciéndose considerablemente a medida que avanza el tiempo, establece producciones limitadas por ejemplo aquellas de origen animal, y asume una intervención importante de políticas para la reducción de gases de efecto invernadero (Van Vuuren *et al.* 2011; Rogeli *et al.* 2012). En el RCP 4.5 el forzamiento radiativo se estabiliza antes del 2100 a causa de una serie de tecnologías para reducir las emisiones de gases principalmente en actividades agrícolas. El RCP 6.0 estabiliza los forzamientos después del año 2100, con el uso de tecnologías para la reducción de los gases de efecto invernadero mientras el uso de las tierras para el cultivo aumenta. El RCP 8.5 se caracteriza por un gran aumento de los gases de efecto invernadero, un importante aumento en la población mundial y un importante uso de la tierras de cultivo y de pastizales (Van Vuuren *et al.* 2011; Wayne 2013).

A partir de los diferentes escenarios de cambio climático se han planteado cambios en la temperatura del planeta, es decir, la temperatura media global puede aumentar de 0.3°C a 4.8 °C durante los próximos 100 años (IPCC 2013). Este incremento en la temperatura puede ser de menor intensidad en las regiones cercanas al ecuador y de mayor intensidad en las zonas cercanas a los polos, las estaciones en latitudes altas tenderán a ser más largas, la temperatura en invierno tenderá a incrementarse con más rapidez que las de verano (Smith & Almaraz 2004). Dependiendo del sitio se esperan tanto aumentos como decrementos en la precipitación (Kang *et al.* 2009). Para México se tiene contemplado un posible

aumento entre 2.5 y 3.5°C (INECC 2016), y un decremento en la precipitación de hasta el 35% en los próximos 100 años (IMTA 2015).

En la literatura existen numerosas metodologías y herramientas para el análisis del cambio climático a futuro y su impacto en las especies biológicas; entre este gran conjunto de posibilidades, el modelado de nicho ecológico, permite conocer distintos aspectos de la relación entre las especies biológicas y el clima, además de conjuntar información conocida en el presente y añadir perspectivas de cambio climático a futuro.

Modelado de nicho ecológico

La generación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los avances tecnológicos de los últimos 20 años y el desarrollo de técnicas estadísticas aplicadas, ha permitido la expansión de herramientas para el análisis de patrones espaciales de presencia y ausencia de especies tanto silvestres como cultivadas, permitiendo el impulso de la investigación científica predictiva (Ballesteros *et al.* 2011; Mateo *et al.* 2011).

Actualmente el modelado de nicho ecológico es uno de los métodos más utilizados para estimar la distribución geográfica potencial de las especies (Guisan & Thuiller 2005), analizando diversos temas, como especies exóticas (Palma-Ordaz & Delgadillo-Rodríguez 2014), conservación (Raxwothy *et al.* 2003; Botello *et al.* 2015), la reintroducción de especies (Martínez-Meyer *et al.* 2006), y para conocer el posible impacto del cambio climático sobre la biodiversidad (Peterson *et al.* 2002; Trejo *et al.* 2011) y en especies cultivadas (Lira *et al.* 2009,

Ballesteros-Barrera *et al.* 2011; Ureta *et al.* 2012; Beck 2013).

Este nuevo campo de modelado de nichos ecológicos o del espacio climático de las especies, tiene como fundamentos la teoría del nicho ecológico propuesta por Grinnell (1917) y Hutchinson (1957), la cual define al nicho como la gama de condiciones bajo las cuales las especies pueden subsistir dentro de sus poblaciones por largos periodos de tiempo sin la necesidad de desplazarse a otros hábitats, es decir se refiere a los límites de tolerancia de las especies tanto climáticas como de sus interacciones interespecíficas (Eliosa *et al.* 2010; Peterson 2003).

El nicho ecológico de una especie se puede dividir en nicho fundamental y nicho realizado; el primero trabaja bajo la ausencia de las interacciones bióticas (competencia, depredación o enfermedades) y el conjunto de condiciones ambientales que permite a una población contar con tasas de crecimiento positivas, mientras que el nicho realizado es el resultado del nicho fundamental más la presencia de las interacciones bióticas de la especie (Soberón & Miller 2009).

Dentro de la teoría de nicho ecológico existe el concepto del conservadurismo del nicho, el cual considera que las especies tienden a mantener sus nichos constantes a través de largos periodos de tiempo (Peterson *et al.* 1999), bajo esta idea surge la posibilidad teórica y práctica de proyectar en diferentes escenarios y espacios climáticos el nicho de las especies tanto a futuro (Peterson *et al.* 2004; Hannah *et al.* 2007; Fera *et al.* 2013) como al pasado (Martínez-Meyer *et al.* 2004; Nogués-Bravo *et al.* 2008; Roberts & Hamann 2012) y lograr expresarlo como su

distribución geográfica potencial.

El área de distribución de una especie es una expresión compleja tanto de su historia evolutiva como ecológica; entre los factores que determinan el área de distribución de una especie se encuentran: 1) Las condiciones abióticas que imponen límites fisiológicos y determinan la capacidad o tolerancia de una especie en un área. 2) Las condiciones bióticas o interacciones interespecíficas, pudiendo ser positivas como el mutualismo o negativas como el parasitismo. 3) Las regiones accesibles para la dispersión y establecimiento. 4) La capacidad evolutiva de las poblaciones ante la adaptación a nuevas condiciones, el cual puede ser analizado mediante el análisis de la evolución del nicho (Soberón & Peterson 2005; Soberón & Nakamura 2009; Barve *et al.* 2011).

Los modelos de nicho ecológico basan su análisis en localidades de presencia o registro puntual georreferenciado y su asociación con variables, ambas fuentes se procesan por medio de un algoritmo, que en esencia extrapola a partir de las presencias y su correspondencia ambiental, a fin de identificar áreas de presencia y traducirlo en la geografía generando el área de distribución potencial para la especie (Soberón & Peterson 2005; Ballesteros-Barrera 2011; Mateo *et al.* 2011).

El cambio climático y sus efectos en la agricultura, estudios a futuro

Al igual que la biodiversidad está expuesta a los efectos del cambio climático, los sistemas agrícolas también lo están; el vínculo entre la agricultura y el clima puede tener diferentes efectos como la alteración de la frecuencia e intensidad de plagas o enfermedades, la disponibilidad de agua para riego o aumentos en la

evapotranspiración (Siikamäki 2008; Ruiz *et al.* 2011). Dependiendo de la región en el mundo, los cambios pueden ser positivos o negativos (Adams *et al.* 1999; Piao *et al.* 2010).

Los aumentos en la temperatura pueden provocar una modificación en los ciclos fenológicos como su acortamiento (Hatfield *et al.* 2011), una caída prematura de hojas o cambios en las fechas de floración, maduración o cosecha (Moriondo *et al.* 2011; Ruiz *et al.* 2011; Granados *et al.* 2014; Kassie *et al.* 2015). Incluso un posible movimiento de las zonas de cultivo (Yang *et al.* 2015), o reducciones en las áreas aptas para cultivar (Ruiz *et al.* 2000).

Los potenciales efectos que podría tener el cambio climático a futuro sobre los diferentes cultivos en el mundo han sido estudiados con ayuda de los diferentes escenarios a futuro. Para el cultivo del maíz dentro de los siguientes 100 años, a causa de aumentos en la precipitación se plantean posibles incrementos en producción o rendimiento en diferentes países como Estados Unidos (Southworth *et al.* 2000; Tubiello *et al.* 2002), Tanzania (Rowhani *et al.* 2011), Panamá (Ruanea *et al.* 2013). Contrario a lo anterior, debido a los decrementos en la precipitación, países como Irán serán altamente vulnerables (Gohari *et al.* 2013).

Algunos otros cultivos estudiados como el trigo pueden presentar disminuciones en rendimiento como en la reducción de la precipitación (Luo *et al.* 2005; Özdoğan 2011); con el incremento de la temperatura, cultivos como el arroz podrían presentar mejoras en el rendimiento (Mall *et al.* 2004; Ohta & Kimura 2007; Chavas *et al.* 2009).

En México se tiene evidencia de reducciones en la aptitud del cultivo de maíz

debido a las variaciones climáticas entre los años de 1972-1996 (Ruiz *et al.* 2000); los diferentes estudios realizados proponen reducciones en el área de distribución del maíz (Ballesteros-Barrera *et al.* 2011; Tinoco *et al.* 2011), posibles disminuciones en el rendimiento (Flores *et al.* 2014), además de condiciones más restrictivas para su cultivo (Monterroso *et al.* 2011).

El cultivo del café potencialmente puede reducir su área de distribución actual (CIAT 2012), o bien se pueden presentar modificaciones positivas o negativas en las zonas óptimas de los cultivos, como en el algodón (Ramírez-Ojeda *et al.* 2014), en la chía (Orozco *et al.* 2014) o en el cultivo de la uva (Ruiz *et al.* 2014).

Ante este panorama, los efectos que puede generar el cambio climático en los diversos cultivos en el Mundo se ha convertido en una de las principales líneas de investigación en desarrollo en la actualidad; la generación de este conocimiento permite generar parte del conocimiento para la toma de decisiones futuras (Rosenzwing & Hillel 2007; Altieri & Nicholls 2008).

El cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es la principal fuente para la extracción de azúcar en el mundo (Humbert 1974). Actualmente se cultivan cerca de 27 millones de hectáreas repartidas en 113 países en todo el mundo. Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán y México se consideran los países con mayor área dedicada al cultivo y con mayor producción (FAOSTAT 2017).

La caña de azúcar es una gramínea de clima tropical y subtropical; prospera en lugares cálidos y soleados. La morfología de la caña de azúcar (Figura 1) consta

de un sistema radicular a partir del cual se desprender raíces superficiales y de anclaje. El tallo es uno de los órganos más importantes de la caña, ya que en él se almacenan los azúcares que posteriormente serán extraídos y procesados. El número, diámetro, color del tallo dependen principalmente de las variedades, el tallo se compone de nudos y entrenudos, los primeros constituyen una zona dura y más fibrosa de crecimiento se conforma por el anillo de crecimiento, una banda de raíces, cicatriz foliar, el nudo, un anillo ceroso y la yema, esta última representa una importante estructura ya que a partir de esta se pueden generar nuevos tallos además de ser un carácter importante para diferenciar variedades. Las hojas se originan de los nudos de manera alterna a lo largo del tallo. La caña de azúcar posee un sistema floral en inflorescencia de tipo panícula en forma de espiga a partir de la cual después de la fertilización da origen a un fruto cariósido de forma ovalada de 0.5 mm de ancho y 1.5 mm de largo (Almaya *et al.* 1995).

Su domesticación ocurrió hace más de 2,000 años en Nueva Guinea, de donde se expandió hacia China, India, Persia Arabia, Egipto y Europa (Aitken & McNeil 2009). Fue transportada a América por Cristóbal Colón en 1493 y traída a México por Hernán Cortés en 1519, iniciando su propagación y producción en el estado de Veracruz (Moreno 2010).

El cultivo de caña de azúcar en países de Asia y de América Latina desempeña un papel muy importante en la generación de empleos e ingresos para la población (Moreno 2010). En México constituye el principal motor económico de muchas regiones del país (Moreno 2010; Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

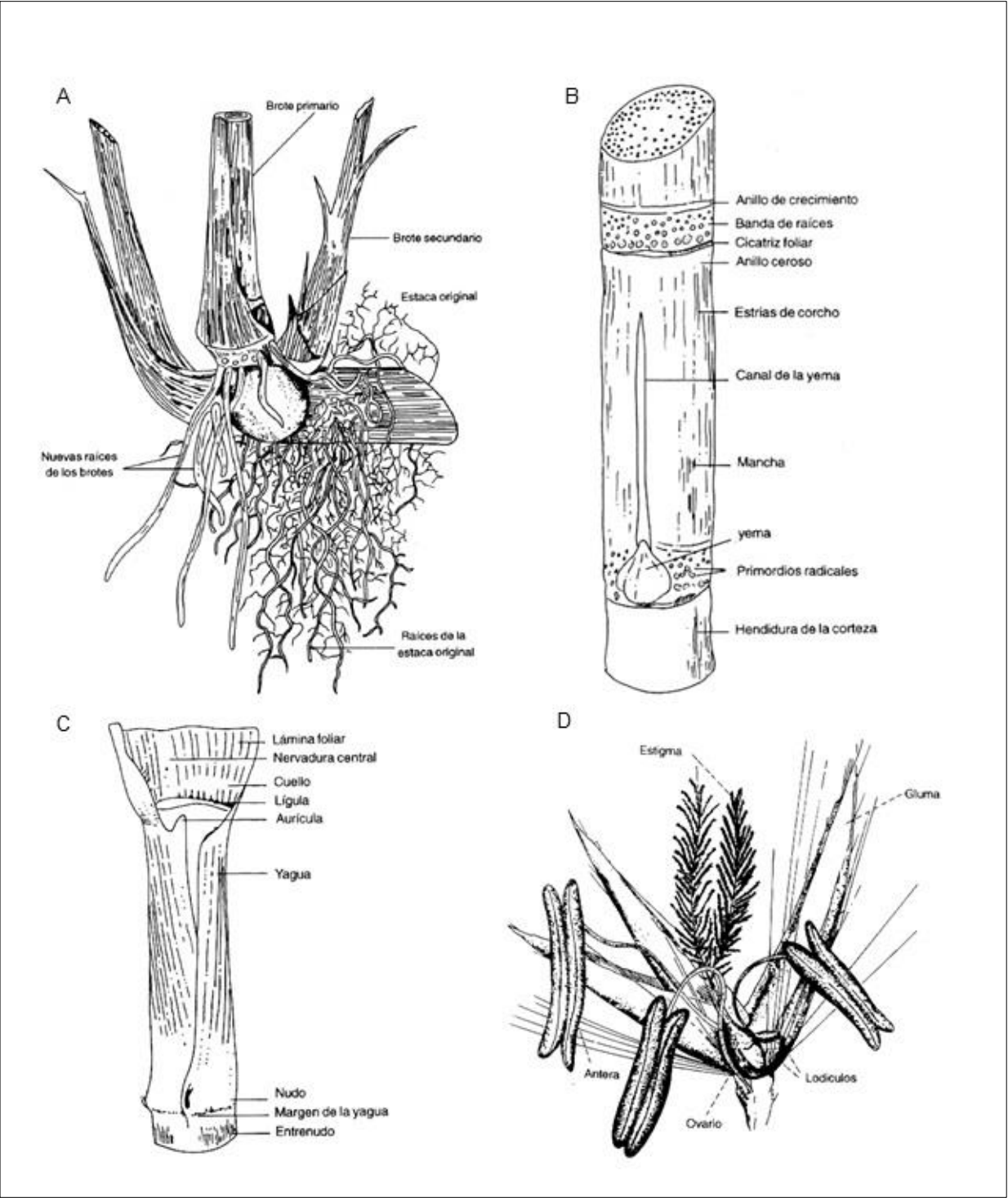


Figura 1. Morfología de caña de azúcar. A. Sistema radicular. B. Tallo. C. Hoja. D. Flor. (Amaya *et al.* 1994).

A nivel mundial, los efectos del cambio climático en la caña de azúcar han dado como resultado una respuesta positiva en los cultivos de Tailandia (Jintrawet & Prammanee 2005) y Australia (Park *et al.* 2007); en Brasil los estudios señalan

respuestas positivas (Marin *et al.* 2013; Singels *et al.* 2014) o negativas (Dos Santos & Sentelhas 2012), de igual manera que en Sudáfrica, con respuestas favorables (Singels *et al.* 2014) o desfavorables (Deressa *et al.* 2005). Otra respuesta reportada es la constancia en la producción ante eventos de cambio climático en Ghana (Black *et al.* 2014), o perjuicios para los cultivos como lo propusieron Cheeroo-Nayamuth & Nayamuth (2001) y Nayamuth (2005) en las Islas Mauricio. En México Bravo-Mosqueda *et al.* (2012) mencionan que para mantener la producción bajo los efectos de cambio climático se debe aumentar el riego a fin de minimizar las respuestas negativas.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles serán las áreas potencialmente cultivables de la caña de azúcar ante los eventos de cambio climático a futuro?

HIPÓTESIS

Las zonas de cultivo de caña de azúcar que actualmente son aptas se verán afectadas por los posibles cambios en temperatura y precipitación a causa del cambio climático, desplazándose hacia lugares que presenten condiciones óptimas y dentro de los límites de tolerancia.

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto del cambio climático a futuro sobre los cultivos de caña de azúcar en México y el mundo.

Objetivos particulares

Análisis para los años 2050 y 2070

- Analizar la distribución potencial de la caña de azúcar a nivel mundial.
- Determinar zonas vulnerables donde se perderán las condiciones ambientales para su cultivo.
- Determinar zonas donde no se verán afectados los cultivos, debido a que se mantendrán dichas condiciones.
- Determinar zonas que podrían volverse adecuadas para su cultivo.
- Identificar las variedades de caña con alto rendimiento y alto porcentaje de siembra y su comportamiento ante el cambio climático a futuro.
- Estimar los beneficios o afectaciones del cambio climático para las regiones con régimen de temporal.

LITERATURA CITADA

- Adams RM, Hurd BH, Reilly J. 1999. A review of impacts to U. S. agricultural resources. Pew Center on Global Climate Change.
- Altieri AM & Nicholls C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*. **3**:7-28.
- Almaya EA, Cook JH, Pilar HA, Irvine JE. 1995. Biología. Cassalet D, Torres AJS, Isaac RCH eds. El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. Cenicaña.
- Aitiken K & McNeil M. 2009. Diversity analysis. In Henry RJ, Kole C, eds. Genetics Genomics and Breeding of Sugarcane. USA New Hampshire: *Science Publ. Enfield*, 19-42.
- Ballesteros-Barrera C. 2011. Efecto del cambio climático en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense del pleistoceno al siglo XXI. Sánchez RG, Ballesteros BC, Pavón NP, eds. En Cambio Climático: aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. p. 89-99.
- Ballesteros BC, Jiménez GD, Hernández CG. 2011. El impacto potencial del cambio climático sobre los agroecosistemas. El caso del cultivo del maíz, proyecciones a futuro. En: Aragón GA, Jiménez GD, Huerta LM, eds. *Manejo Agroecológico de Sistemas. Vol. II*. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. p. 1-14.

- Barve N, Barve V, Jiménez-Valverde A, Lira-Noriega A, Maher SP, Peterson AT, Soberón J, Villalobos F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*. **222**: 1810-1819.
- Barros V. 2005. El cambio climático global. Buenos Aires: Libros del Zorzal.
- Black E, Luigi VP, Verhoef A, Vianna CS, Osborne T, Van den Hoof C. 2012. Cultivating C4 crops in a changing climate: sugarcane in Ghana. *Environmental Research Letters*. **7**: 1-10.
- Bravo-Mosqueda EG, Medina-García JA, Ruíz-Corral AD, Báez-González, Mariles-Flores V. 2012. Cambio Climático y su Impacto Potencial en el Sistema Producto Caña de Azúcar en el Área de Abasto del Ingenio Adolfo López Mateos. *INIFAP. Publicación Especial* Núm. 11. Oaxaca, México.
- Beck J. 2013. Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? *Climate Change*. **116**: 177-189.
- Botello F, Sánchez-Cordero V, Ortega-Huerta MA. 2015. Disponibilidad de hábitats adecuados para especies de mamíferos a escalas regional (estado de Guerrero) y nacional (México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **86**: 226-237.
- Brown CJ, Mary IO, Poloczanska ES, Schoeman DS, Buckley LB, Burrows MT, Duarte CM, Halpern BS, Pandolfi JM, Parmesan C, Richardson AJ. 2016. Ecological and methodological drivers of species' distribution and phenology responses to climate change. *Global Change Biology*. **22**: 1548-1560.

- Caballero M, Lozano S, Ortega B. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*. **8**(10): 2-12.
- Carreto F, González PR y Villavicencio VJJ. 2000. *Geografía General*. México: Universidad Autónoma del Estado de México. 124-126 p.
- Casas CMC & Alarcón JM. 1999. *Meteorología y clima*. Barcelona España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chavas DR, Izaurralde RC, Thomson AM, Gao X. 2009. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*. **149**: 1118-1128.
- Cheeroo-Nayamuth FB & Nayamuth RAH. 2001. Climate change and sucrose production in Mauritius. Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist). **24**: 107-112.
- CIAT. 2012. Escenarios del Impacto del Clima a Futuro en Áreas de Cultivo de Café en México. Informe final. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 44 p.
- Conde C. 2011. México y el cambio global. SEMARNAT. México.
- Conde AC & Gay GC. 2008. *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM.
- Deressa T, Hassan R, Poonyth D. 2005. Measuring the impact of climate change on South African agriculture: the case of sugar-cane growing regions. *Agrekon*. **44**(4): 524-542.

- Dos Santos DL & Sentelhas PC. 2012. Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of Sao Paulo, Brazil. *Revista Ambiente y Agua*. **7**(2): 7-17.
- Eliosa LHR, Nieto MOA, Navarro CMC. 2010. Conservadurismo del nicho ecológico un enfoque integral de la evolución. *Ciencias*. **98**: 64-69.
- FAOSTAT. 2017. Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>> (Fecha de Consulta 20 de abril de 2017).
- Feria ATP, Sanchez-Rojas G, Ortiz-Pulido R, Bravo-Cadena J, Calixto PE, Dale JM, Duberstein JN, Illoldi-Rangel P, Lara C, Valencia-Herverth J. 2013. Estudio del cambio climático y su efecto en las aves en México: enfoques actuales y perspectivas futuras. *Hutzi*. **14**: 47-55.
- Flores LHE, Ruiz CJA, De la Mora OC, Zarazúa-Villaseñor P, Chávez DAA. Ramírez VH, Velásquez VMA. 2014. Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano de maíz temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **10**: 2007-2020.
- Fortín F. 2006. *Para comprender el clima y el medio ambiente*. Bogotá: Guías del Conocimiento. Panamericana.
- Garduño R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? Martínez J, y Fernández A, eds. *Cambio climático: una visión desde México*. México: Instituto Nacional de Ecología. 29-39.
- Granados RR, Medina BM, Peña Manjarrez V. 2014. Variación y cambio climático

- en la vertiente del Golfo de México Impactos en la cafecultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **5**(3):473-485.
- Grinnell J. 1917. Field test of theories concerning distributional control. *The American Naturalist*. **51**: 115-118.
- Gohari A, Eslamian S, Abedi-Koupaei J, Massah AB, Wang D, Madani K. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran Zayandeh-Rud River Basin. *Science of total Environment*. **442**: 405-419.
- Guisan A & Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. **8**: 993-1009.
- Jintrawet A & Prammanee P. 2005. Simultating the Impact of climate change on sugarcane production systems in Thailand. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **25**: 64-68.
- Hannah L, Midgley G, Andelman S, Araújo M, Hughes G, Martínez-Meyer E, Pearson R, Williams P. 2007. Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*. **5**(3): 131-138.
- Hatfield JL, Boote KL, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate Impacts on Agriculture Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*. **103**(2): 351-370.
- Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already. *Tree*. **15**(2): 56-61.
- Humbert RP. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. México D.F; CECOSA.

- Houghton J. 2005. Global warming. *Reports on Progress in Physics*. **68**: 1343-1403.
- Hutchinson GE. 1957. Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. **22**: 415-42.
- IMTA. 2015. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- INECC. 2016. Efectos del cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. < <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>> (Fecha de consulta marzo 23,2017).
- IPCC. 2001. Climate Change 2001. Third Assessment Report. <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/> (Fecha de consulta noviembre 20, 2015).
- IPCC. 2007. *Cambio Climático 2007 Informe de Síntesis Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Suecia.
- IPCC. 2013. *Cambio Climático 2013 Bases Físicas*. Grupo de Trabajo I contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Suiza.
- Kang Y, Khan S, Ma X. 2009. Climate change impacts on yield, crop water productivity and food security – A review. *Progress in Natural Science*. **19**: 1665-1674.
- Kassie BT, Asseng S, Rotter RP, Hengsdijk H, Ruane AC, Van Ittersum MK. 2015.

- Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models. *Climate Change*. **129**: 145-158.
- Körner C, Basler D. 2010. Phenology under global warming. *Science*. **327**(5972): 1461-1462.
- Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, Ding Y, Mauritzen C, Mokssit A, Peterson T, Prather M. 2007: Historical Overview of Climate Change. *In*: Climate Change 2007, Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, eds. *The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. p. 93-127.
- Lira R, Téllez O, Dávila P. 2009. The effect of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*. **56**: 691-703.
- Luo Q, Bellotti W, Williams M, Byan B. 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*. **132**: 273-285.
- Magaña V, Matías MJ, Morales R, Millán C. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En: Martínez J, y Fernández A, eds. *Cambio climático: una visión desde México*. México: Instituto Nacional de Ecología. p. 203-213.

- Mall RK, Lal M, Bhatia VS, Rathore LS, Singh R. 2004. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*. **121**:113-125.
- Mann ME & Jones PD. 2003. Global Surface temperatures over the past two millenia. *Geophysical Research Letters*. **30**(15): 1820.
- Marin RF, Jones JW, Singels A, Royce F, Assad ED, Pellegrino GQ, Justino F. 2013. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climate change*. **117**: 227-239.
- Martínez-Meyer E, Peterson AT, Hargrove W. 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammals species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*. **13**: 305-314.
- Martínez-Meyer E, Peterson AT, Servin JI, Kiff FL. 2006. Ecological niche modelling and prioritizing areas for species reintroductions. *Oryx*. **40**(4): 411-418.
- Mateo RG, Felicísimo MA, Muñoz J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*. **84**: 217-240.
- Monterroso RAI, Conde-Álvarez C, Rosales-Dorantes G, Gómez-Díaz JD, Gay-García C. 2011. Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmosfera*. **24**(1): 53-67.
- Moreno SJC. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. Tesis, Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. 129.

- Moriondo M, Giannakopoulos C, Bindi M. 2011. Climate change impacts assessment the role of climate extremes in crop yields simulation. *Climate Change*. **104**:674-701.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant J.P., Wilbanks TJ. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. **463**: 747-756.
- Nayamuth AR. 2005. Climate change: impacts, Adaptation and implications for a sustainable sugarcane industry. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **25**: 69-77.
- Nogués-Bravo D, Rodríguez J, Hortal J, Batra P, Araújo MB. 2008. Climate Change, Humans, and the Extinction of Woolly Mammoth. *PLoS BIOLOGY*. **6**(4): 0685-0692.
- Ohta S & Kimura A. 2007. Impacts of climate change on the temperature of paddy waters and suitable land for rice cultivation in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*. **147**:186-189.
- Orozco RG, Durán PN, González ED, Zarazúa VP, Ramírez OG, Mena MS. 2014. Proyecciones de cambio climático y potencial productivo para *Salvia hispánica* L. en las zonas agrícolas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **10**:1831-1842.

- Özdoğan M. 2011. Modelling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **14**:1-12.
- Palma-Ordaz S & Delgadillo-Rodríguez J. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*. **92**(4): 587-597.
- Parmesan C. 1996. Climate and species' range. *Nature*. **382**: 765-766.
- Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. **37**:637-669.
- Parmesan C & Hanley ME. 2015. Plants and climate change: complexities and surprises. *Annals of Botany*. **116**: 849-864.
- Park S, Howden M, Horan H. 2007. Evaluating the impact of and capacity for Adaptation to climate change on sectors in the sugar industry value chain in Australia. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **26**: 312-326.
- Peterson AT, Soberón J, Sánchez-Cordero V. 1999. Conservatism of Ecological Niches in Evolutionary Time. *Science*. **285**: 1265-1267.
- Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sánchez-Cordero V, Soberón J, Buddemeier RH, Stockwell DR. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. **416**: 626-629.
- Peterson AT. 2003. Predicting the Geography of Species' Invasions via Ecological Niche Modeling. *The Quarterly Review of Biology*. **78**(4): 419-433.
- Peterson AT, Martínez-Meyer E, González-Salazar C, Hall PW. 2004. Modeled

- climate change effects on distributions of Canadian butterfly species. *Canadian Journal of Zoology*. **82**: 851-858.
- Piao S, Ciais P, Huang Y, Shen Z, Peng S, Li J, Zhou L, Liu H, Ma Y, Ding Y, Friedlingstein P, Liu C, Tan K, Yu Y, Zhang T, Fang J. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*. **467**: 43-51.
- Ramírez-Ojeda G, Ruiz-Corral J, Pérez-Mendoza C, Villavicencio-García R, Mena MS, Durán-Puga N. 2014. Impacto del cambio climático en la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **10**: 1885-1895.
- Raxwothy CJ, Martínez-Meyer E, Horning N, Nussbaum RA, Scheider GE, Ortega-Huerta MA, Peterson T. 2003. Predicting distribution of known and unknown reptil species in Madagascar. *Nature*. **426**: 837-841.
- Roberts DR & Hamann A. 2012. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: a palaeocological perspective. *Global Ecology and Biogeography*. **21**: 121-133.
- Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R. 2012. Global warming under old new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*. **2**:248-253.
- Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C, Punds AJ. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*. **421**: 57-60.
- Rosenzweig C, Hillel D. 2007. Agriculture and Climate Change. *Phi Kappa phi*. **87**: 19-24.

- Rosenzweig C, Karoly D, Vicarelli M, Neofotis P, Wu Q, Casassa G, Menzel A, Root TL, Estrella N, Seguin B, Tryjanowski P, Liu C, Rawlins S, Imeson A. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*. **453**: 353-358.
- Rowhani P, Lobell DB, Linderman M, Ramankutty N. 2011. Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology*. **151**: 449-460.
- Ruane AC, DeWayne CL, Horton RM, Gordón R, McCollum R, Brown D, Killough B, Goldberg R, Greeley AP, Rozenweig C. 2013. Climate change impact uncertainties for maize in Panama: Farm information climate, and yields sensitivities. *Agriculture and Forest Meteorology*. **170**: 132-145.
- Ruiz CJA, Ramírez DJL, Flores MFJ, Sánchez GJJ. 2000. Cambio climático y efectos sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. **23**(2): 183-193.
- Ruiz CJA, Medina GG, Ramírez DJL, Flores LHE, Ramírez OG, Manríquez OJD, Zarazúa VP, González EDR, Díaz PG, De la Mora OC. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **2**: 309-323.
- Ruiz CJA, Sánchez GJJ, Ramírez OG, Ramírez DJL, Durán PN, Cruz LL, Medina GG, Rodríguez MV, Zarazúa VP. 2014. Cambio climático en México y distribución potencial del grupo racial de maíz cónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **10**: 1871-1883.

- Siikamáki J. 2008. Climate Change and U.S. Agriculture: Examining the Connections. *Environment*. **50**(4): 36-49.
- Singels A, Jones M, Marin F, Ruane A, Thorburn P. 2014. Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro Model. *Sugar Tech*. **16**(4):347-355.
- Smith DL, Almaraz JJ. 2004. Climate change and crop production: contributions, impact and adaptations. *Canadian Journal of Plant Pathology*. **26**: 253-266.
- Smith P, Price J, Molotoks A, Warren R, Malhi Y. 2018. Impacts on terrestrial biodiversity of moving from a 2°C to 1.5°C target. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **376**: 20160456.
- Soberón J & Miller CP. 2009. Evolución de los nichos ecológicos. *Miscelánea Matemática*. **49**:83-99.
- Soberón J & Nakamura M. 2009. Niches and Distributional Areas: Concepts, Methods, and Assumptions. *National Academy of Sciences of the United States of America*. **106**:19644-19650.
- Soberón J & Peterson T. 2005. Interpretation of Models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*. **2**:1-10.
- Southworth J, Randolph JC, Habeck M, Doering OC, Pfeifer RA, Rao DG, Johnston JJ. 2000. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the Midwestern United State. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **82**: 139-158.

Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna KK, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P. 2013: Resumen técnico. En Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds. *Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. p. 33- 182.

Taylor FW. 2002. The greenhouse effect and climate change revisited. *Reports on Progress in Physics*. **65**: 1-25.

Tinoco RJA, Gómez-Díaz JD, Monterroso-Rivas AI. 2011, Efectos del cambio climático en la distribución potencial de maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*. **29**(2): 161-168.

Trejo I, Martínez-Meyer E, Calixto-Pérez E, Sánchez-Colón S, Vázquez TR, Villers-Ruiz I. 2011. Analysis of the effect of climate change on plant communities and mammals in Mexico. *Atmósfera*. **24**(1): 1-14.

Tubiello FN, Rosenzweig C, Goldberg RA, Jagtap S, Jones JW. 2002. Effects of Climate Change on US crop production: simulation results using different GCM scenarios. Part I: Wheat, potato, maize, and citrus. *Climate Reserch*. **20**: 259-270.

- Ureta C, Martínez-Meyer E, Perales HR, Álvarez-Buylla ER. 2012. Projecting the effects of climate change on the distributions of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*. **18**: 1073-1082.
- Van Vuuren DP, Edmons J, Kainuma M, Riaji K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram, T, Krey, V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose SK. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*. **109**: 5-31.
- Vaughan DG, Doake CSM. 1996. Recent atmospheric warming a retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*. **379**: 323-331.
- Wayne GP. 2013. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. *Skeptical Science*.
- Walther G-R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*. **416**: 389-395.
- Yang X, Chen F, Lin X, Liu X, Zhang H, Zhao J, Li K, Ye Q, Li Y, Lv S, Yang P, Wu W, Li Z, Lal R, Tang H. 2015. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*. **208**: 76-84.
- Zamora EM, Hernández HA, Pérez MO, Benítez BG, Ibáñez BS. 2016. Cambio global: el Antropoceno. *Ciencia ergo-sum*. **23** (1): 67-75.

CAPÍTULO I

Distribución potencial presente y futura del cultivo de caña de
azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en México

INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar en México

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es la principal fuente para la extracción de azúcar en el mundo (Humbert 1974). Es una gramínea de clima tropical y subtropical, domesticada hace más de 2,000 años en Nueva Guinea, de ahí fue llevada a China, India, Persia, Arabia, Egipto y Europa (Aitiken & McNeil 2009). Después de la conquista de México, fue traída por Hernán Cortes quien la introdujo en el estado de Veracruz, donde hasta el momento se ha desarrollado su cultivo (Moreno 2010). La dispersión de la caña de azúcar en México se generó por las vertientes del Pacífico y del Golfo, además de las regiones centrales del país, como Puebla y Morelos (Crespo *et al.* 1988; Salgado *et al.* 2012).

La producción de caña constituye el principal motor económico de muchas regiones del país, se desarrolla en 15 entidades federativas (Figura 2) y 227 municipios debido a que genera 450 mil empleos directos y 2.2 millones indirectos, (Moreno, 2010; Bravo-Mosqueda *et al.*, 2012). Actualmente se procesa en 57 ingenios y genera poco más del 0.5% en el producto interno bruto, un 2.32% en el producto del sector manufacturero y un 12.5% del producto del sector alimentario. Tiene una considerable magnitud en el mercado, en general se consume de manera doméstica y tiene una importante demanda por parte de la industria alimenticia (Salgado *et al.* 2012).

Al igual que otros cultivos la humedad, temperatura y luminosidad son factores determinantes para su desarrollo, creciendo en zonas de alta temperatura y radiación solar (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012). Como son el estado de Veracruz

que es el líder productor de azúcar, con una producción de 2, 620,194 toneladas que representan el 38% de la producción nacional, seguido de estados como Oaxaca y Tabasco.

En 2008-2009 la producción de caña disminuyó, debido a factores climatológicos, principalmente por la menor cantidad de lluvia en la mayor parte del país durante la época de maduración de la caña y por incremento en precios de fertilizantes y agotamiento del suelo cañero (Hernández-Cázares 2014).



Figura 2. Regiones cañeras de México, los puntos en rojo representan los ingenios azucareros (CONADESUCA 2010).

Variedades de caña de azúcar

Actualmente los ingenios emplean las variedades más rendidoras en campo y fábrica, resistentes a plagas y enfermedades y adecuadas a las condiciones agroclimáticas de las regiones. En México el 55% de la superficie donde se

siembra caña de azúcar está ocupada por variedades que se han producido en México, mientras que, el 45% se encuentra sembrado con variedades extranjeras (Senties-Herrera & Gómez-Merino 2014).

Hasta la primera mitad del siglo XX la industria azucarera dependía de variedades extranjeras, para 1979 el 34.7% es ocupado por variedades mexicanas. Entre las distintas variedades en el mercado el recambio de estas en el país ha propiciado el establecimiento de organismos provenientes de Canal Point EE.UU., Hawái, Java o Sudáfrica (IMPA 1981). A partir de 1980 los campos azucareros se sustentaban de pocas variedades como B 4362, L 60-14 MEX 55-32, NCO 310, CO 997, MEX 68-P-23, MEX 79-431, MEX 69-290 y CP 72-2086 las dos últimas se han convertido en las de mayor importancia para la producción en México en años recientes (Senties-Herrera & Gómez-Merino 2014). Cada variedad consta de límites temporales de producción y rendimiento máximo el cual decae gradualmente a medida que pasa el tiempo, cuando la disminución llega a su máximo, se hace necesario una sustitución.

Las diferencias en el uso de las variedades de caña se establece dependiendo directamente de las condiciones para las cuales fue desarrollada, pues unas se establecen bien en zonas elevadas, otras en las partes bajas o intermedias y algunas tienen un amplio rango de adaptación, además de los diferentes requerimientos de riego y su frecuencia. Los factores del clima sobre la caña y tipo de suelo donde se cultiva son otro de los componentes para tomar en cuenta en el establecimiento de las variedades (Sánchez 1997).

El cambio climático y los cultivos de México

Una de las principales causas de alteración del sistema climático en la actualidad es el calentamiento global, se ha estimado un aumento de 0.85 °C de 1880 a 2012 (Stocker *et al.* 2013). Los cambios de los efectos del cambio climático han sido documentados en la biodiversidad con modificaciones fenológicas, en su distribución o en sus relaciones bióticas (Parmesan 2006; Körner & Basler 2010; Parmesan & Hanley 2015; Smith *et al.* 2018), además de la inminente amenaza para la agricultura, generando cambios positivos o negativos en rendimiento y producción (Siikamäki 2008; Hatfield *et al.* 2011; Moriondo *et al.* 2011).

En México desde la década de 1960 ha sido más cálido, la temperatura promedio del país ha aumentado 0.85°C y la cantidad de días frescos se ha reducido desde los años setenta (INECC 2016). Se tiene contemplado un posible aumento entre 2.5 y 3.5°C (INECC 2016), y un decremento en la precipitación para los próximos 100 años de hasta el 35% (IMTA 2015). Se prevé que el noreste del país estará impactado por las sequías y el sureste por inundaciones, los climas templando tenderán a reducirse, mientras los secos ocuparán mayores superficies, estados como Guanajuato, San Luis Potosí, Tlaxcala, Estado de México y Veracruz hacia el 2050 podrían ser altamente vulnerables a los incrementos en la temperatura (FAO 2012).

Al igual que a nivel mundial los efectos del cambio climático para México pueden ser tanto positivos como negativos, esto debido al cultivo y la región del país donde nos encontremos, Bellon *et al.* (2011) proponen que los agricultores de zonas altas son altamente vulnerables al cambio climático. En el caso particular de

cultivos como el maíz de acuerdo con Tinoco-Rueda *et al.* (2011) la superficie propicia para el cultivo se verá reducida a futuro, debido a la reducción de la disponibilidad de humedad en el suelo. Esta reducción de las zonas con condiciones óptimas para el cultivo ha sido observada en otros estudios como el realizado por Ballesteros-Barrera *et al.* (2011) y Monterroso *et al.* (2011). Por el contrario Granados y Sarabia (2013), encuentran un potencial beneficio para el cultivo de maíz en la ciudad de Toluca, Estado de México, a causa del aumento en la temperatura.

En el caso del café CIAT (2012) y Gay *et al.* (2006) mencionan que por el aumento potencial de la temperatura el cultivo del café será menos viable de acuerdo a lo que es actualmente, incluso llegando a modificar su fases fenológicas. En algunas especies de la familia Curcubitaceae se espera un panorama perjudicial con reducciones drásticas en el área potencial a futuro (Lira *et al.* 2009). Para el cultivo de *Morus alba* en el peor de los casos se espera una retracción en las zonas con aptitud ambiental (Durán *et al.* 2016). Mientras que Medina-García *et al.* (2016) sugieren disminuciones del área donde actualmente se desarrolla el frijol a causa del aumento en la temperatura.

Entre los estudios que han dado cuenta de posibles efectos positivos a futuro, Ramírez-Ojeda *et al.* (2012) indican, para el cultivo de algodón una ampliación en el área de su distribución. En el cultivo de Chía (*Salvia hispanica*) incrementos en la superficie con condiciones óptimas (Orozco *et al.* 2014). Para el cultivo de durazno (*Prunus persica*) no se espera un impacto que genere alteraciones para el desarrollo del cultivo (Medina-García *et al.* 2014). Mientras que, para la caña de

azúcar Bravo-Mosqueda *et al.* (2012) indican que a causa del aumento de la temperatura y para continuar con la producción es necesario el aumento de riego para cultivos.

El presente trabajo evalúa el efecto del cambio climático sobre el cultivo de caña de azúcar en México en dos ventanas temporales (2050 y 2070), bajo los escenarios de cambio RCP 2.6 y RCP 4.5. Para evaluar los cambios en la distribución se utilizó el modelado de nicho ecológico, método que ha sido catalogado como uno de los mejores para estimar la distribución geográfica potencial de las especies (Guisan & Thuiller 2005), y ha sido utilizado en diferentes aspectos de la biología, por ejemplo, el efecto del cambio climático y su impacto en la biodiversidad (Peterson *et al.* 2002; Trejo *et al.* 2011) y en especies cultivadas (Ureta *et al.* 2012; Beck 2013; Mi *et al.* 2017).

MÉTODOS

Base de datos de México

Se construyeron bases de datos con información de ingenios y zonas de abastecimiento de caña de azúcar en México a partir de la literatura existente, especialmente la del Manual Azucarero Mexicano (MAM) que incluye información de 1984 al 2015, de donde se obtuvo la información de cada variedad utilizada, su porcentaje o cantidad de ha, por año y por ingenio. Posteriormente se seleccionaron las variedades con una siembra mayor a 27 años, con el mayor porcentaje de siembra dentro de cada ingenio, y con el mayor porcentaje de siembra en el país. También se realizó una investigación bibliográfica acerca de

las principales variedades sembradas en México. Con estos filtros se seleccionaron las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086, de las cuales se realizó una investigación sobre las condiciones bajo las cuales se siembran, información que se presenta en la primera parte de los resultados.

Se ajustó una clasificación de riego y temporal por ingenio de acuerdo al MAM 2015, donde los ingenios con una cantidad mayor a 30% de utilización del riego se catalogaron como ingenios de riego y aquellos con valores menores a 30% se clasificaron como ingenios de temporal; de esta forma el umbral del ingenios en régimen de temporal fue más restrictivo y se enfocó en aquellos lugares donde la precipitación influye de manera más directa en los cultivos.

El lugar de presencia para cada variedad se igualó a la coordenada geográfica del ingenio, debido a la cercanía que estos presentan con los sitios reales de cultivo y a la poca información para colocar una presencia en el lugar exacto donde se cultiva cada variedad dentro del ingenio.

Datos climáticos

Los datos climáticos para el presente y futuro se obtuvieron de Hijmans *et al.* (2005) del portal Worldclim (<http://worldclim.org/version1>) en su versión 1.4, formato raster con una resolución espacial de 30 arco-segundos (~1 km a nivel del ecuador). Los datos para el presente abarcan una climatología temporal de 1960 a 1990; a futuro se emplearon dos ventanas temporales 2050 (2041-2060) y 2070 (2061-2080) basados en dos escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 4.2 (Van Vuuren *et al.* 2011; Wayne 2013), conforme al modelo de circulación general

GFDL-CM3 (Donner *et al.* 2011). Toda la información climática a futuro tomó en cuenta la modelación del clima fase 5 (CMIP5) del IPCC (2013). Se ocuparon 19 variables bioclimáticas (Cuadro 1), las cuales expresan los patrones climáticos extremos, estacionales y anuales (Ureta *et al.* 2011). Del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Gesh & Larson 1996) <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30> se obtuvieron variables topográficas pendiente, aspecto y elevación, con una resolución espacial de 30 arco-segundos.

Perfiles bioclimáticos

Con las variables climáticas del presente, del futuro y el conjunto de los registros de la especie se generaron perfiles bioclimáticos de las 19 variables y tres topográficas por medio del SIG ArcGIS 10 y con la herramienta Extract Values to Multi Points se extrajeron los datos de cada variable por cada punto en la geografía. Del conjunto de datos obtenidos se calculó la media, mediana, máximos y mínimos de cada variable. Para el presente los perfiles bioclimáticos funcionan como indicadores de la tolerancia climática de la especie y al comparar los datos de cada variable en el presente versus futuro detectando los aumentos o decrementos en la temperatura y precipitación, además de mostrar aquellas zonas con cambios de mayor o menor magnitud.

Modelado de nicho ecológico y análisis estadísticos

Los modelos de nicho ecológico se realizaron con el algoritmo MaxEnt (Philips 2006), en su versión 3.4.1, para generar la distribución potencial para el conjunto de datos de las variedades CP 72-2086, MEX 69-290 y las zonas de temporal, al

presente y su proyección bajo dos escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y RCP 4.5) y dos ventanas temporales (2050 y 2070), el resultado de cada combinación calcula la distribución más probable para una especie, expresando el valor más idóneo del hábitat de la especie como una función de las variables ambientales.

Cuadro 1. Variables bioclimáticas ocupadas para los modelos de nicho ecológico.

Abreviatura	Variable bioclimática
Bio 1	Temperatura promedio anual
Bio 2	Rango de temperatura diurno medio (promedio de todos los meses (Temp Max-Temp Min)
Bio 3	Isotermalidad (Bio 2/Bio 7)*100
Bio 4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar *100)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más caliente
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango de temperatura anual (Bio 5 – Bio 6)
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 11	Temperatura media del trimestre más caliente
Bio 12	Precipitación total anual
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más caliente
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío

Para la modelación se fijó un número máximo de iteraciones (500), un límite de convergencia (0.00001), el tipo de ejecución fue la predeterminada por el algoritmo, una selección de clases de entidad (función automática), el número de máximo de puntos de fondo (10,000), y los valores de regularización (1) como la

configuración predeterminada para rechazar datos duplicados de presencias en dentro de las celdas de cada raster. El área bajo la curva (AUC) del diagrama de curva operacional (ROC por sus siglas en inglés) se seleccionó lo predeterminado por el algoritmo. Se incluyeron las opciones para generar curvas de respuesta a las variables y un análisis de Jackknife a fin de conocer las variables con mayor importancia y aporte para el desarrollo de los modelos. Se estableció un umbral de corte bajo el 10 percentil.

Se obtuvo un único modelo para cada combinación de ventanas temporales (2050 y 2070) con escenarios de cambio climático (RC 2.6 y RCP 4.5), más el modelo al presente. Los cinco modelos se procesaron en el SIG IDRISI 17.0, se generó una reclasificación de acuerdo al valor de 10 percentil, para obtener una salida binaria presencia-ausencia. Posteriormente se aplicó una tabulación cruzada e intersección de mapas (CROSSTAB) añadiendo la opción para obtener el índice Kappa el cual determina las diferencias entre el modelo generado para el presente y lo generado para el futuro, bajo el cual se pueden analizar los cambios en la distribución potencial, Kappa trabaja con valores de 0 a 1, donde números cercanos a 0 indica mayor grado de discordancia y números cercanos a 1 indican mayor grado de concordancia, los diferentes valores que puede tomar Kappa se muestran en el Cuadro 2 (Landis & Koch 1977; Cerda & Villarroel 2008).

Las salidas de CROSSTAB para los modelos binarios a futuro, se clasificaron como zonas de pérdida como aquellas que en el presente cuentan con condiciones óptimas que a futuro desaparecen, zonas de permanencia las cuales presentan condiciones óptimas en el presente y futuro, zonas de ganancia

aquellas que en el presente no cuentan con condiciones óptimas y que a futuro se hacen visibles. De cada categoría se obtuvo la cantidad en kilómetros cuadrados y se comparó el total con la distribución potencial en el presente para obtener valores porcentuales.

Se generaron operaciones de resta para las variables de temperatura promedio anual (Bio 1) y la precipitación total anual (Bio 12) para todo México a fin de localizar áreas con los mayores incrementos de temperatura y decrementos en precipitación que pudiesen representar afectaciones en las regiones azucareras en especial para las zonas de temporal, además de empalmarse con la distribución potencial y explicar los cambios en la distribución potencial para las zonas de pérdida, ganancia y permanencia.

A partir de los perfiles bioclimáticos se generó un análisis de varianza múltiple (MANOVA) bajo el criterio de Lambda de Wilks, para conocer si existían diferencias significativas entre el perfil bioclimático del presente versus futuro.

Cuadro 2. Valores e interpretación del estadístico Kappa (Landis & Koch 1997).

Valor del estadístico Kappa	Interpretación
<0.00	Pobre o poco, escaso
0.00-0.20	Leve
0.21-0.40	Razonable
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial, considerable
0.81-1.00	Casi perfecto

RESULTADOS

Se obtuvieron un total de 57 ingenios que han trabajado de 1985 a 2015, de los cuales 22 son de temporal y 35 de riego. 12 ingenios se localizan en Veracruz, tres en Oaxaca, dos en Tabasco y San Luis Potosí, y uno en Campeche, Chiapas y Nayarit. Veracruz encabeza los ingenios de riego con 10 ingenios, Jalisco con seis, Michoacán y Sinaloa tres, Morelos, Puebla, San Luis Potosí y Tamaulipas presentan dos ingenios y Chiapas, Colima, Nayarit, Quintana Roo y Tabasco cuentan con uno (Figura 3).

Entre las variedades seleccionadas, la MEX 69-290 se cultiva en México desde hace más de 30 años, sembrándose en todos los ingenios y ocupando el 29% del total de la superficie sembrada en el país (Sentíes-Herrera & Gómez-Merino 2014), y se adapta en ingenios de temporal y de riego con facilidad, en alturas de 0 a 300 msnm (SAGARPA 2015). De acuerdo con los registros de presencia para el país se siembra de 19.0 a 28.0°C, con una media de 23.9°C; precipitaciones totales anuales de 300 a 3,300 mm y una media de 1,475 mm; y en altitudes de 0 a 1,480 msnm. La variedad CP 72-2086 fue generada en Florida en 1967 (Miller *et al.* 1984) y actualmente es cultivada en un 36% en México (Sentíes-Herrera & Gómez-Merino 2014). Con base en las localidades de presencia se cultiva en temperaturas entre 19.0 a 28°C, con precipitaciones totales anuales entre 300 a 3,300 mm y en altitudes desde 0 hasta 1,480 msnm. La temperatura media es de 23.8°C y la media de la precipitación es de 1,457 mm. Los ingenios de temporal se localizan principalmente en la parte este del país, cultivándose en altitudes de los 0 a los 1,100 msnm, con temperaturas entre los 20.0 y los 28.0°C, y

precipitaciones de 1,200 a 3,300 mm. El promedio de la temperatura y precipitación para el conjunto de las zonas de temporal es de 24.4°C y de 1,960.4 mm respectivamente.

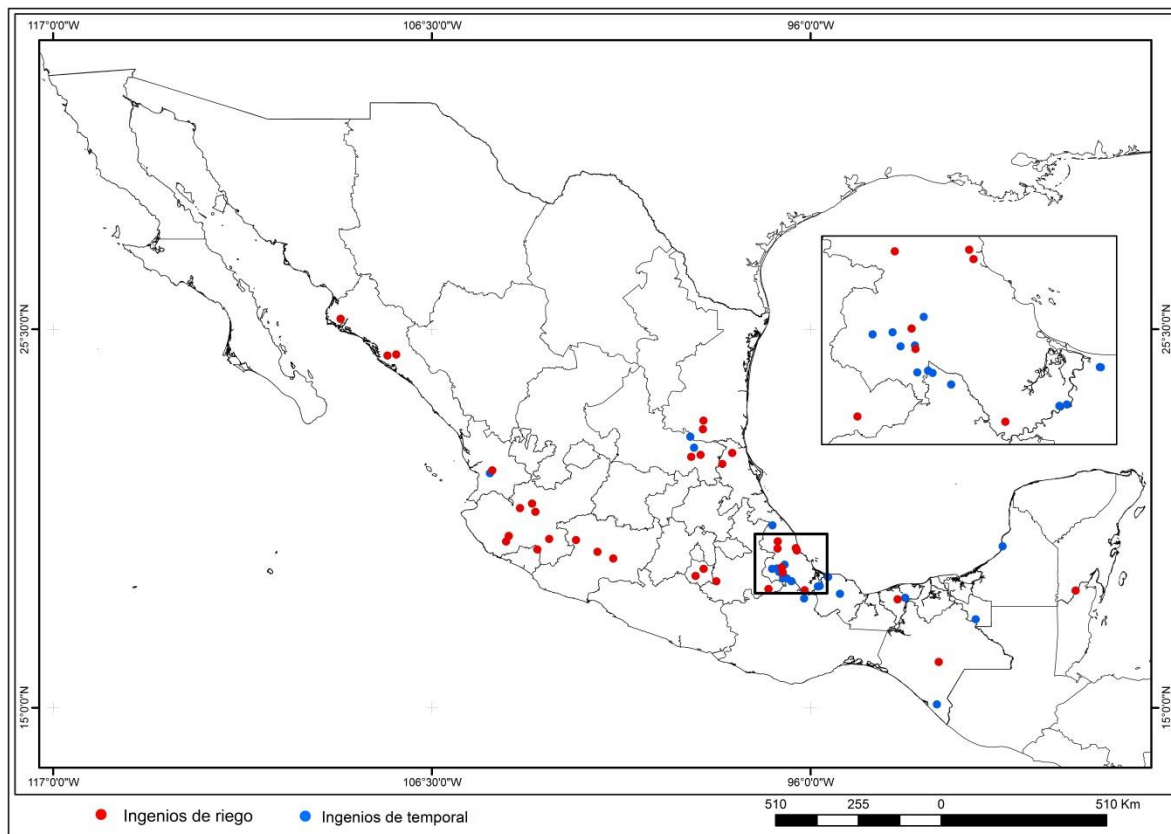


Figura 3. Ubicación de los ingenios de temporal y riego en México.

Distribución potencial actual

El valor de AUC para los modelos de las variedades CP 72-2086, MEX 69-290 y de los registros de regiones de temporal fue superior a 0.918. Las variables de mayor importancia y aportación al modelo para la CP 72-2086 y MEX 69-290 son la precipitación del trimestre más húmedo (Bio 16), la temperatura mínima del mes más frío (Bio 6) y la temperatura mínima del mes más seco (Bio 9), mientras que las zonas de temporal la precipitación del mes más húmedo (Bio 12), la

precipitación del mes más seco (Bio 14) y la precipitación del trimestre más húmedo (Bio 16) representan las variables de mayor importancia para la construcción del modelo de distribución potencial.

El área de distribución potencial de las variedades es similar; para la CP 72-2086 (Figura 4A) es de 286, 687 km² y la MEX 69-290 (Figura 4B) se extiende en 345,080 km²; ambas abarcan zonas adyacentes a las que actualmente cultivan y se extienden a zonas potenciales de cultivo en el presente dentro de estados como Yucatán, sur de Guanajuato y Estado de México, o el suroeste de Oaxaca.

Para las zonas de temporal el área de distribución abarca 77,751.75 km², incluye la zona de alta producción en Veracruz centro y continúa por el noreste de Oaxaca y suroeste de Veracruz; algunos de los sitios potenciales son el norte de Puebla y el suroeste de Campeche (Figura 5).

Distribución potencial a futuro

Bajo el escenario RCP 2.6 a futuro para el 2050 la variedad MEX 69-290 permanece con el 82 % (282,922 km²) mientras que hacia el 2070 decrece alrededor de dos mil km² (1%); la pérdida de áreas con condiciones en 2050 es de 18% (62,158 km²), de manera disgregada en el país y concentrándose en el norte de Veracruz, sur de Tamaulipas y sureste de San Luis Potosí con posibles afectaciones a los ingenios de Panuco, El Higo e Independencia. Para el 2070 el resultado es similar y solo presenta cambios con un aumento de pérdida del 1%. La ganancia de áreas hacia el 2050 es de casi 94 mil km², extendiéndose en diferentes zonas del país como el centro de Tabasco, en las costas de Chiapas o

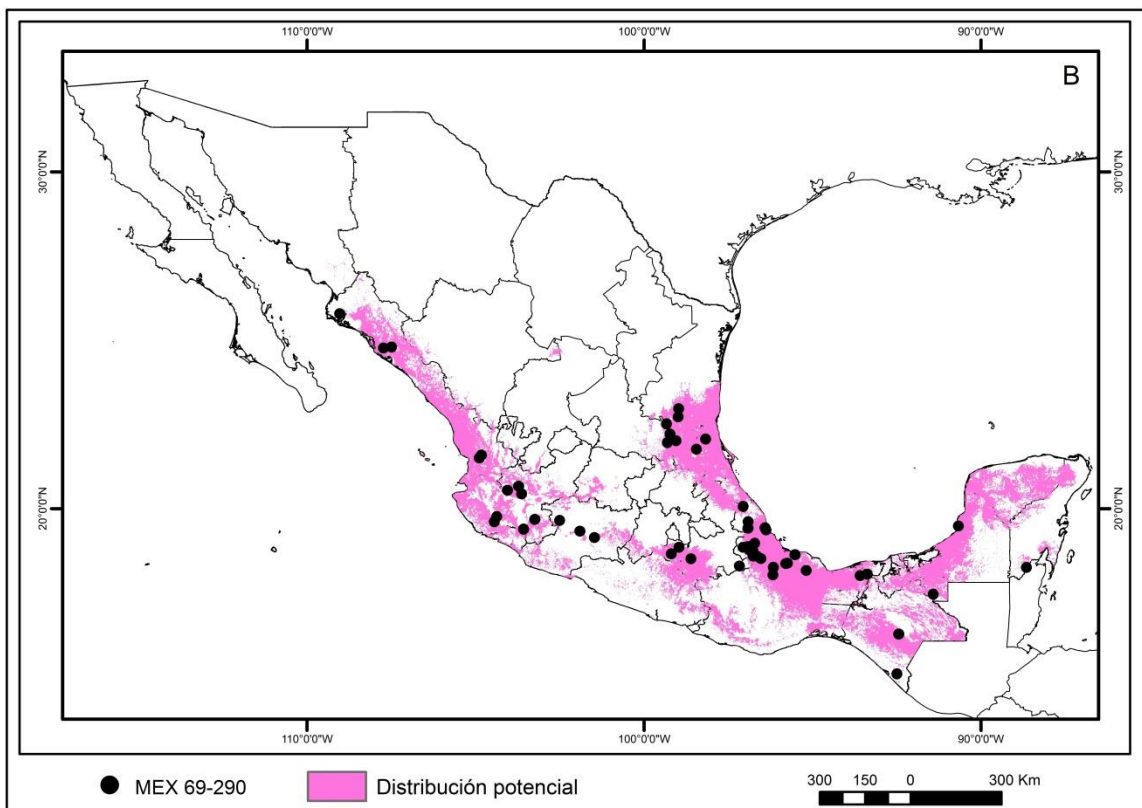
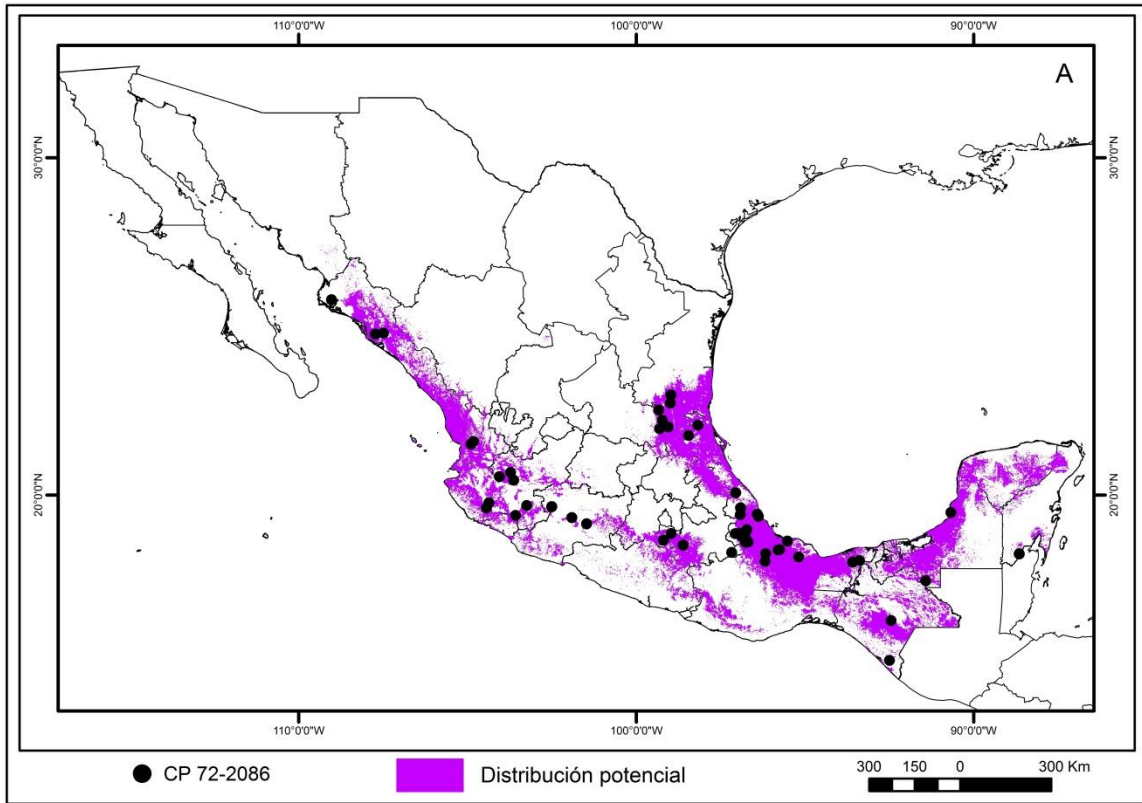


Figura 4. A. Distribución potencial al presente de la variedad CP-72-2086. B. Distribución potencial al presente de la variedad MEX 69-290.

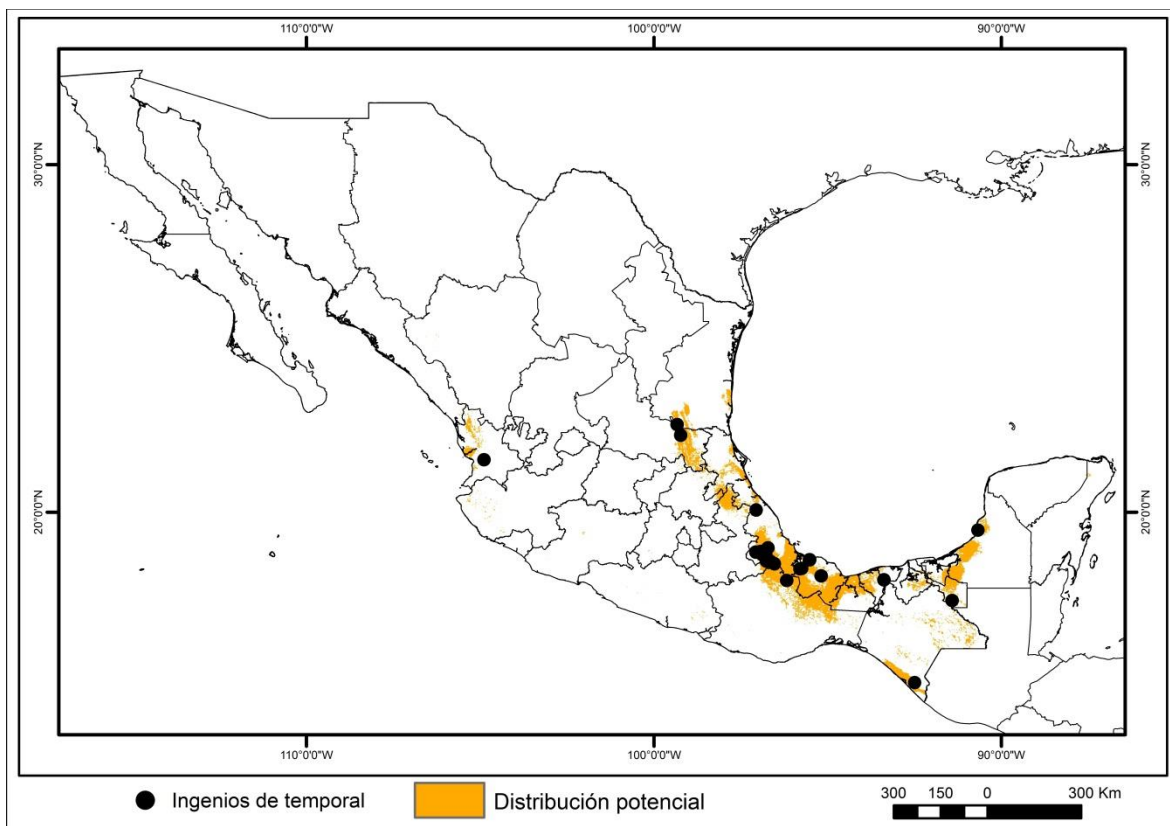


Figura 5. Distribución potencial al presente de los ingenios de temporal en México.

en el sur de Campeche y Quintana Roo. Mientras que hacia el 2070 aumenta a 124,110 km² (35%), presentándose de manera más concentrada en los estados de Quintana Roo y Campeche e incluso extendiéndose hacia el estado de Sonora en su parte sureña (Cuadro 3, Figuras 6A, 6B y 9).

Para la variedad CP 72-2086 la permanencia de áreas en el 2050 es del 76 % (218,819 km²) y para el 2070 disminuye a un 74%, conservando en ambos casos las áreas con alta producción en México como el centro de Veracruz. En el 2050 la pérdida de áreas es de 24 % y de igual forma que la MEX 69-290 los ingenios de Panuco, el Higo e Independencia presentan pérdidas en 2050 y 2070, y para el ingenio Pujiltepec en el centro de Chiapas la pérdida se acentúa hacia 2070. La ganancia de áreas en el 2050 es de 29% (83,078 km²) y en el 2070 incrementa a

40% (113,395 km²) extendiéndose en la península de Yucatán en los estados de Campeche y Quintana Roo (Cuadro 3, Figuras 7A, 7B y 9).

Las zonas de temporal permanecen en un 77% (59,557 km²) en el 2050 y en el 2070 se incrementan a 75% (58,105 km²); en ambas ventanas temporales las áreas que se conservan se localizan en el centro de Veracruz y norte de Oaxaca, además de la costa de Chiapas. La pérdida de áreas se concentra en el estado de San Luis Potosí y norte de Veracruz, la cifra más alta se presenta para el 2070 con 19,646 72 km². Las zonas de ganancia incrementan de 56,113 72 km², en 2050 a 77,032 km² en 2070; esta última cifra representa casi el doble del área potencial en el presente; dicha ganancia principalmente se esparce en los estados de Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Cuadro 3, Figuras 8A, 8B y 9).

Dentro del escenario RCP 4.5 la respuesta de la MEX 69-290 para el 2050 la permanencia asciende a 84% (290,433 km²) y decrece a 77% en el 2070, la pérdida de áreas aumenta de 2050 a 2070, de 16 % a 23%, mientras que la ganancia decrece de 41 % a 39%, para la Península de Yucatán la respuesta en ambas ventanas temporales es similar al escenario RCP 2.6, siendo más evidente el aumento en áreas de ganancia para el 2050. De igual manera la respuesta ante el cambio climático ocurre con pérdidas y ganancias para la región del norte de Veracruz y sur de San Luis Potosí y con permanencia en la región centro de Veracruz (Cuadro 4, Figura 6C, 6D y 9).

Para la variedad CP 72-2086 los efectos ocurren de manera similar con decrementos en la permanencia y aumentos en la pérdida de $\pm 3\%$ de áreas de 2050 a 2070 y solo siendo constante los valores de ganancia manteniéndose en

un 43% para ambas ventanas temporales (Cuadro 4, Figuras 7C, 7D y 9). Las zonas de temporal decrecen en permanencia de 73% (56,686 km²) a 67% (52,466 km²) de 2050 a 2070, la pérdida aumenta de 27% a 33%, presentándose en las zonas donde convergen los estados de San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, y solo para el 2070 el este de Puebla y norte de Oaxaca podrían ser afectados. La ganancia de áreas decrece, en 2050 casi se duplica de las áreas potenciales actuales contando con un 97% y para el 2070 decrece a 80% en ambos casos la Península de Yucatán y el estado de Tabasco resalta por la cantidad de áreas potencialmente cultivables a futuro (Cuadro 4, Figura 8C, 8D y 9).

Los cambios observados en la distribución pueden explicarse mediante los cambios en la temperatura promedio anual (Bio 1) y precipitación total anual (Bio 12). Por ejemplo, para el escenario RCP 2.6 la temperatura promedio anual hacia 2050 y 2070 presenta un aumento de 1.6 hasta 3.0°C, mientras que bajo el escenario RCP 4.5 la temperatura aumenta hasta 3.8°C (Figura 10); por su parte, la precipitación en el escenario RCP 2.6 varía en reducciones de hasta 247 mm e incrementos de 761 mm y bajo el RCP 4.5 disminuciones máximas de 500 mm contra aumentos de 482 mm (Figura 11) en todo el país. Basándose en el escenario más drástico, en el 2070 en las áreas de pérdida se podrían experimentar decrementos de precipitación de 159 y hasta 500 mm y aumentos de temperatura de 3.1 a 3.8°C; en las zonas de permanencia, por ejemplo el centro de Veracruz y norte de Oaxaca, la temperatura puede aumentar hasta 3.1°C y los cambios en la precipitación pueden disminuir de 56 a 158 mm; en las zonas de ganancia como la Península de Yucatán la temperatura aumentará hasta

2.9° en el sur de Campeche, con un decremento en la precipitación de hasta 97 mm para las parte más norteñas en Yucatán y Quintana Roo, con aumentos progresivos de hasta 482 mm a medida que se desplaza hacia Campeche, Chiapas y Tabasco.

Cuadro 3. Porcentajes y área de la distribución potencial de las variedades MEX 69-290, CP 72-2086 y zonas de temporal bajo el escenario RCP 2.6.

Variedad	RCP 2.6												
	2050						2070						
	Presente (km ²)	Pérdida (km ²)	%	Ganancia (km ²)	%	Permanencia (km ²)	%	Pérdida (km ²)	%	Ganancia (km ²)	%	Permanencia (km ²)	%
MEX69-290	345,080	62,158	18	93,994	27	282,922	82	65,065	19	124,110	35	280,015	81
CP 72-2086	286,687	67,868	24	83,078	29	218,819	76	73,235	26	113,395	40	213,452	74
TEMPORAL	77,752	18,195	23	56,113	72	59,557	77	19,646	25	77,032	99	58,106	75

Cuadro 4. Porcentajes y área de la distribución potencial de las variedades MEX 69-290, CP 72-2086 y zonas de temporal bajo el escenario RCP 4.5.

Variedad	RCP 4.5												
	2050						2070						
	Presente (km ²)	Pérdida (km ²)	%	Ganancia (km ²)	%	Permanencia (km ²)	%	Pérdida (km ²)	%	Ganancia (km ²)	%	Permanencia (km ²)	%
MEX 69-290	345,080	54,647	16	142,916	41	290,433	84	77,662	23	134,673	39	267,418	77
CP 72-2086	286,687	67,745	24	123,484	43	218,942	76	78,378	27	124,025	43	208,309	73
TEMPORAL	77,752	21,066	27	75,293	97	56,686	73	25,286	33	62,422	80	52,466	67

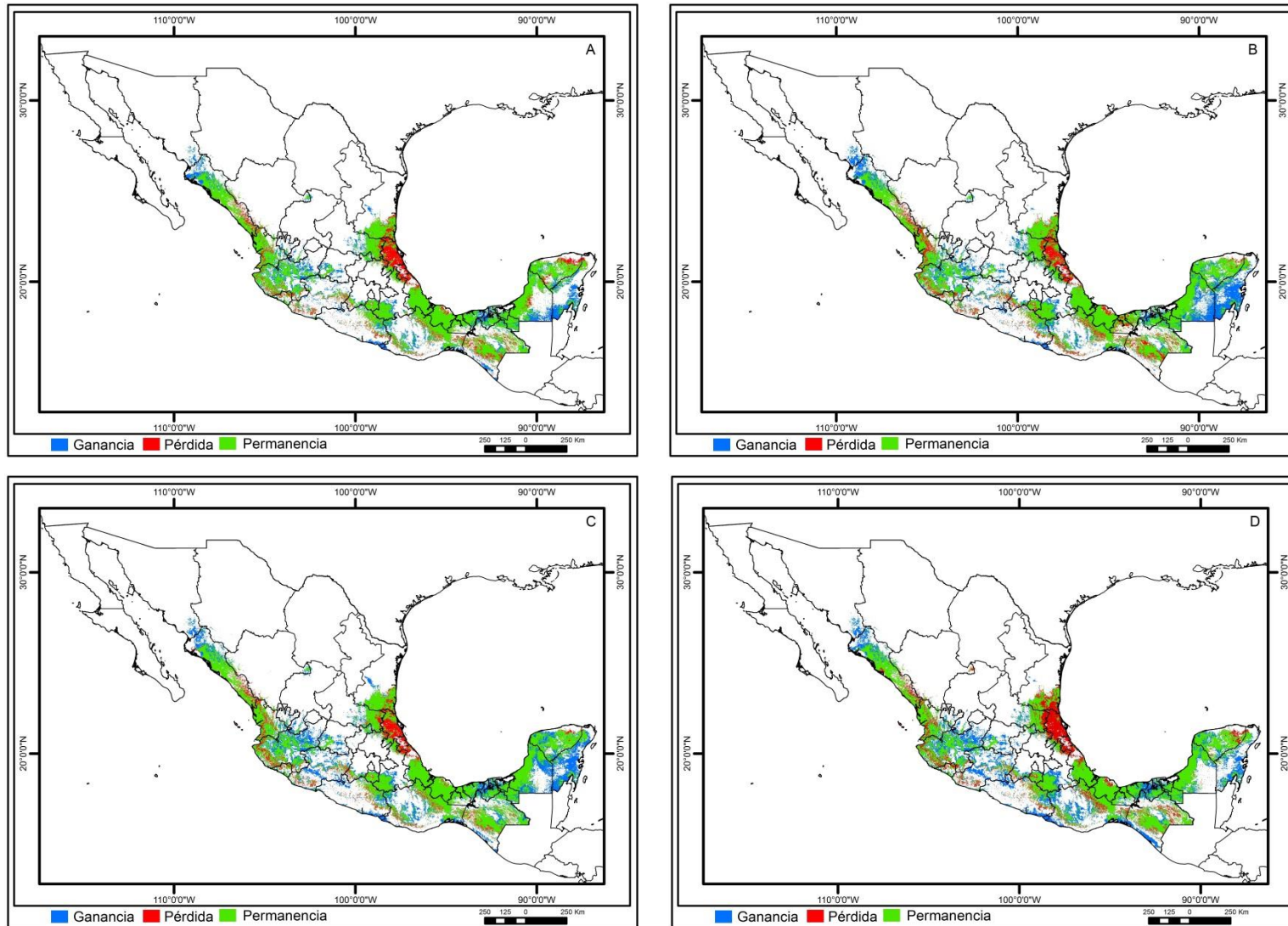


Figura 6. Cambios en la distribución potencial de la variedad MEX 69-290, A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070.

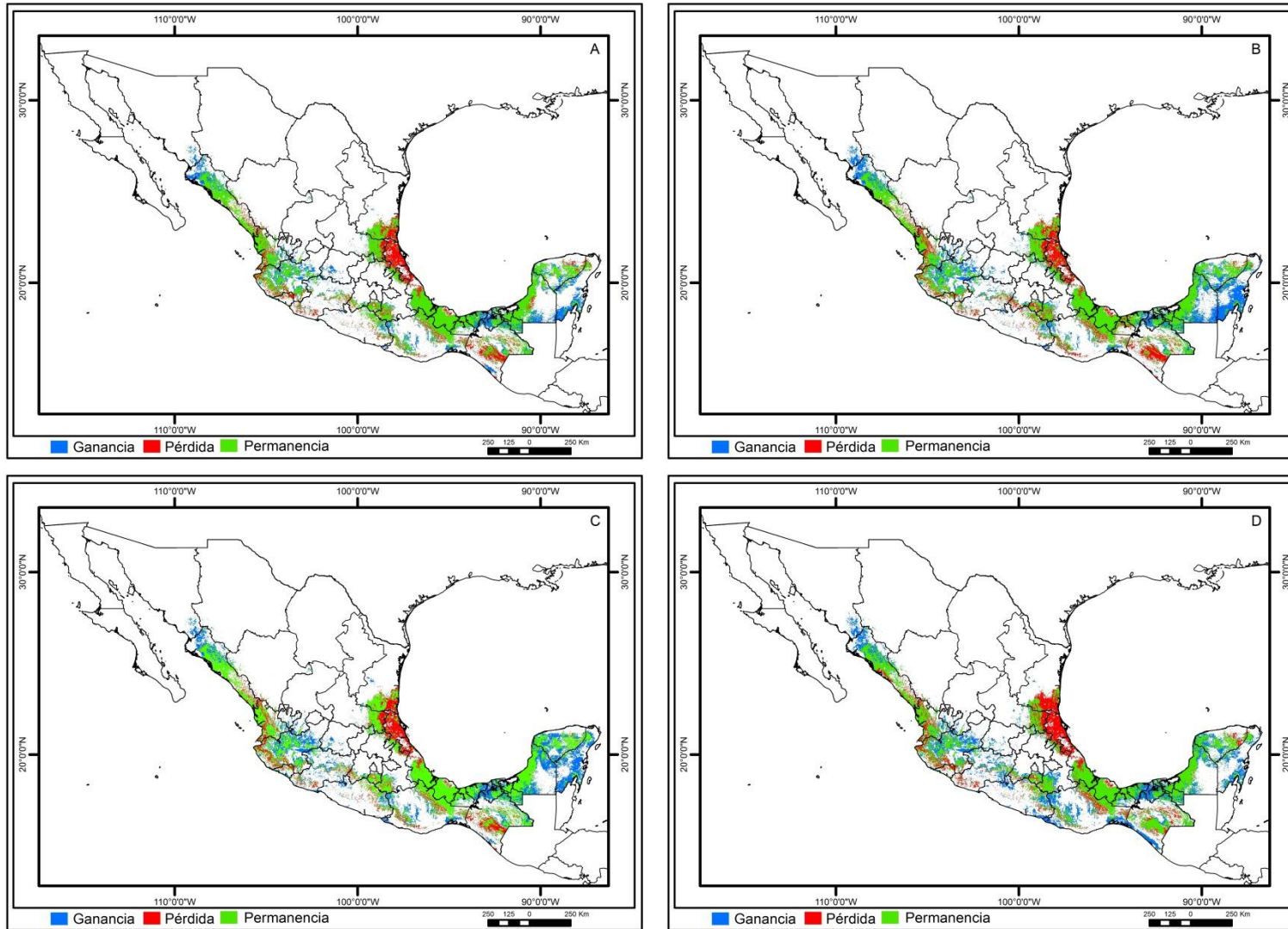


Figura 7. Cambios en la distribución potencial de la variedad CP 72-2086. A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070. C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070.

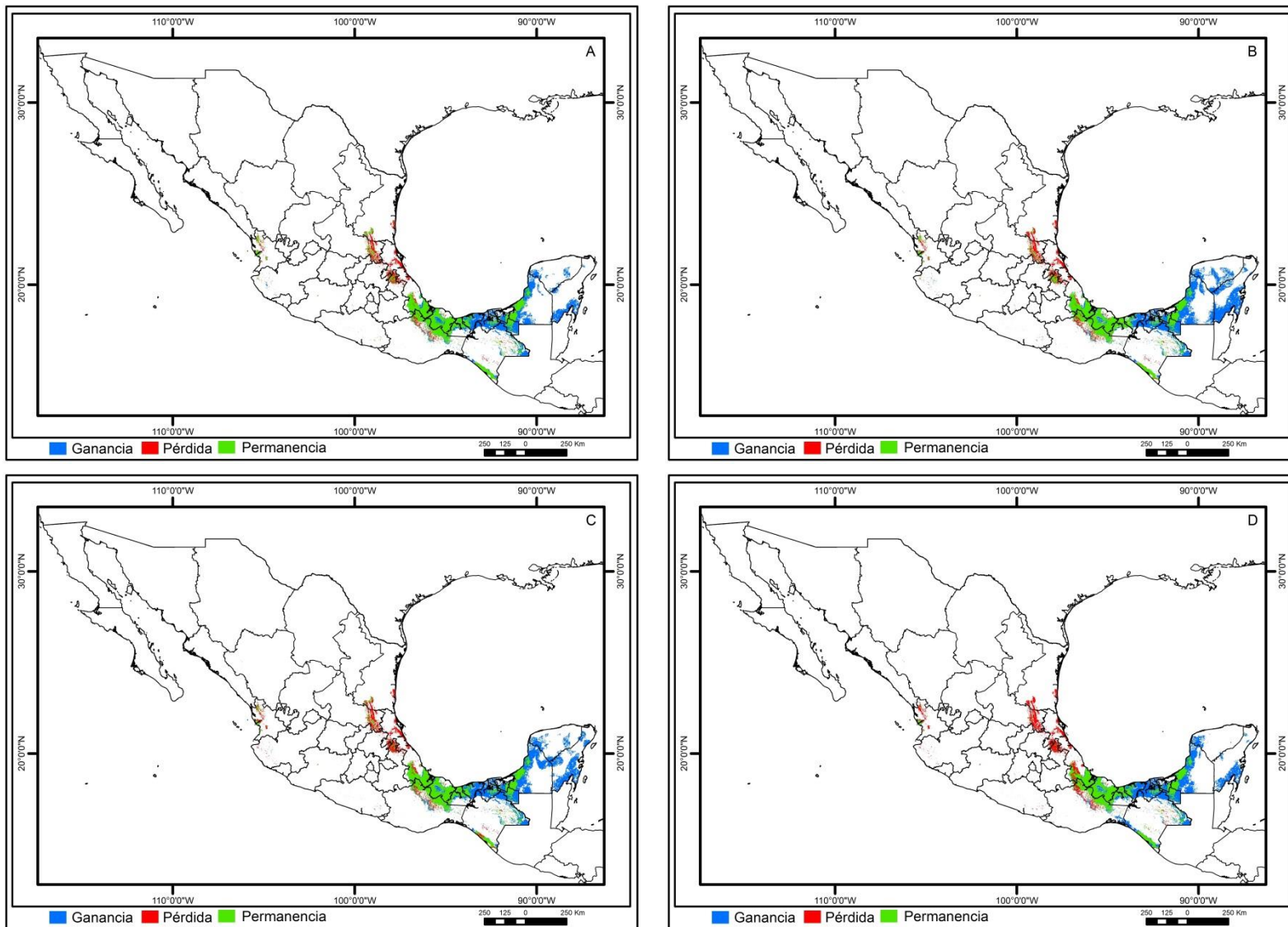


Figura 8. Cambios en la distribución potencial de los ingenios de temporal de México. A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070. C. RCP 4.5 2050. D. RCP 4.5 2070

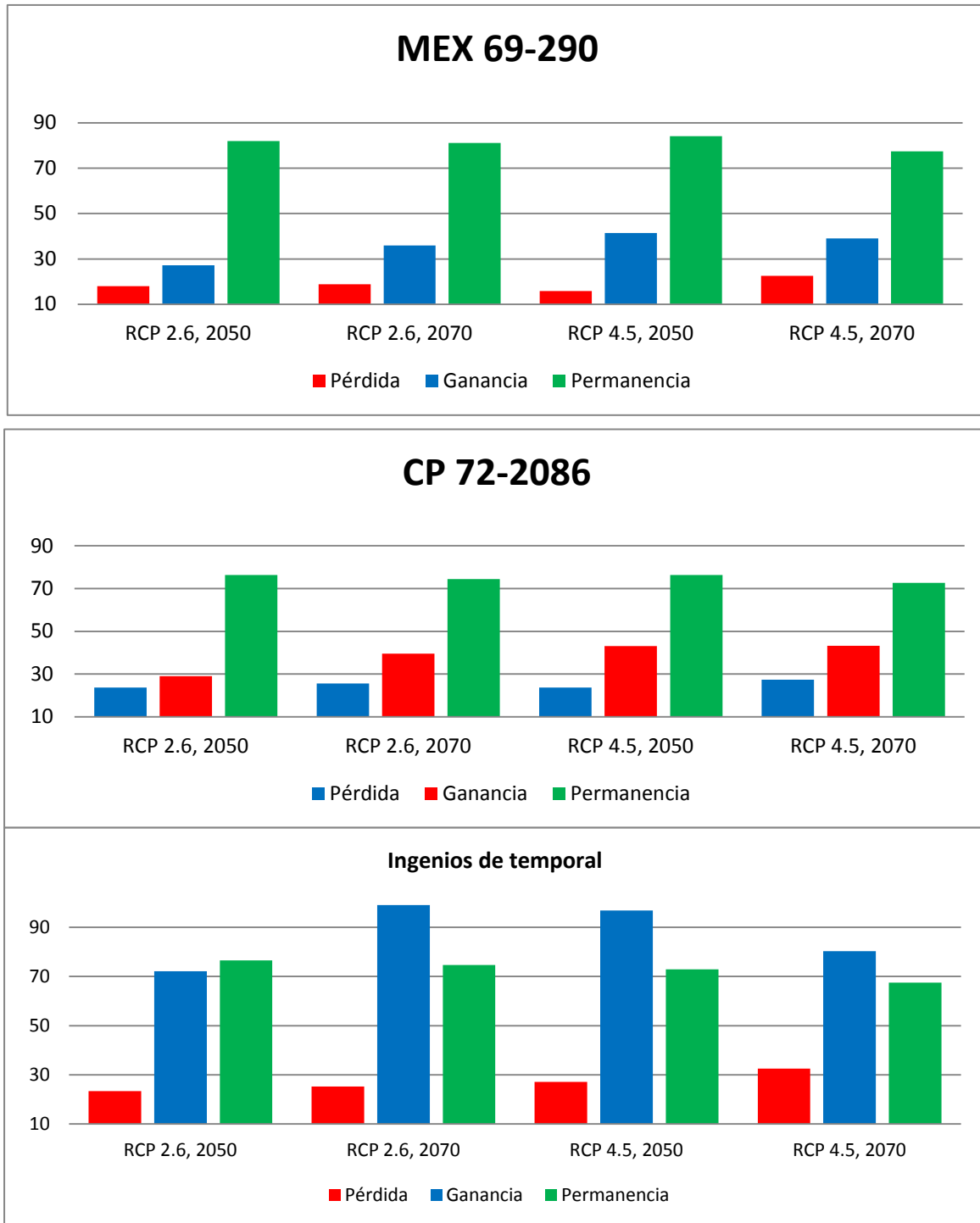


Figura 9. Porcentajes de cambio de variedades MEX 69-290, CP 72-2086 e ingenios de temporal bajo escenarios de cambio climático.

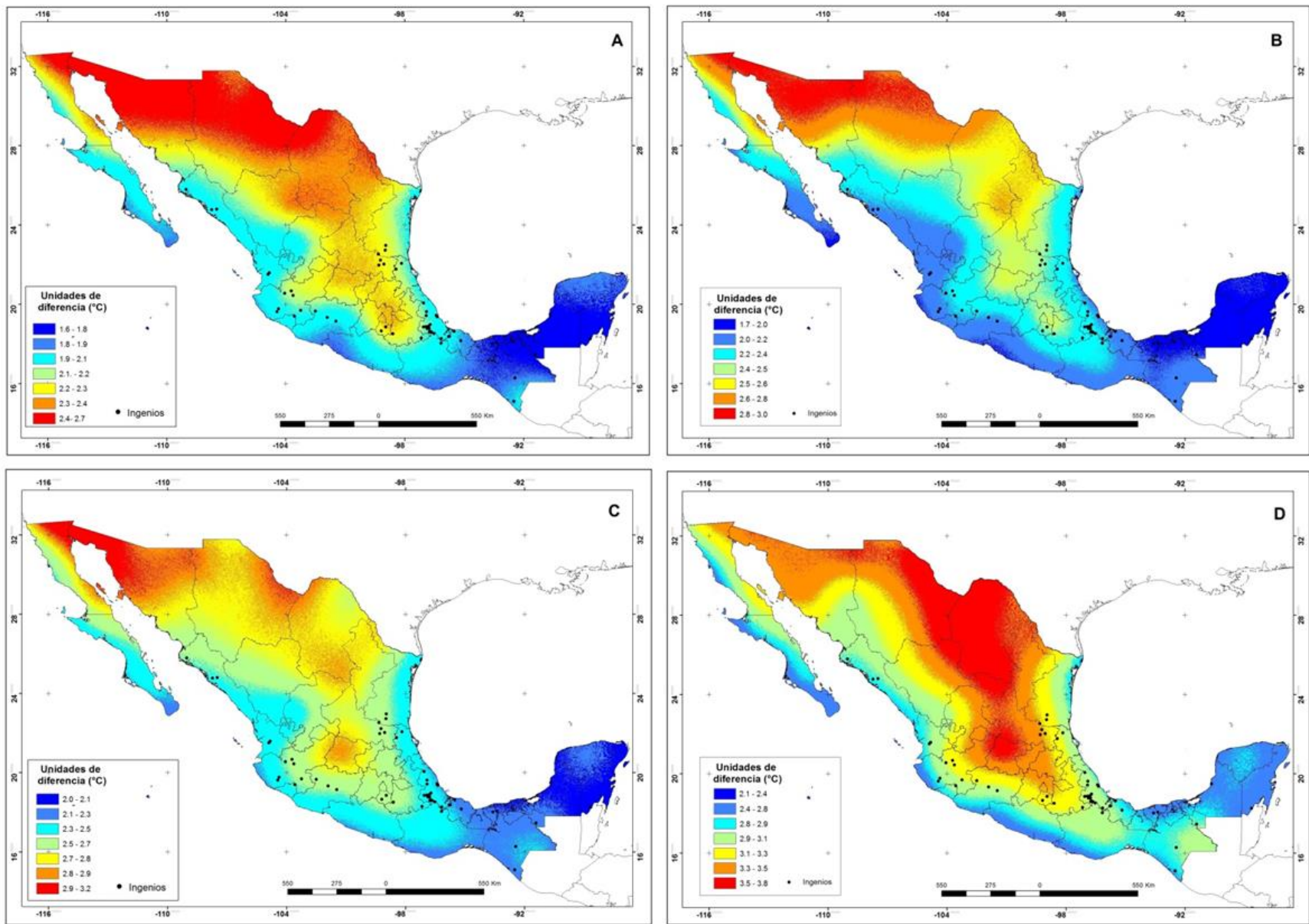


Figura 10. Cambios en la temperatura promedio anual (Bio 1). A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050, D. RCP 4.5 2070.

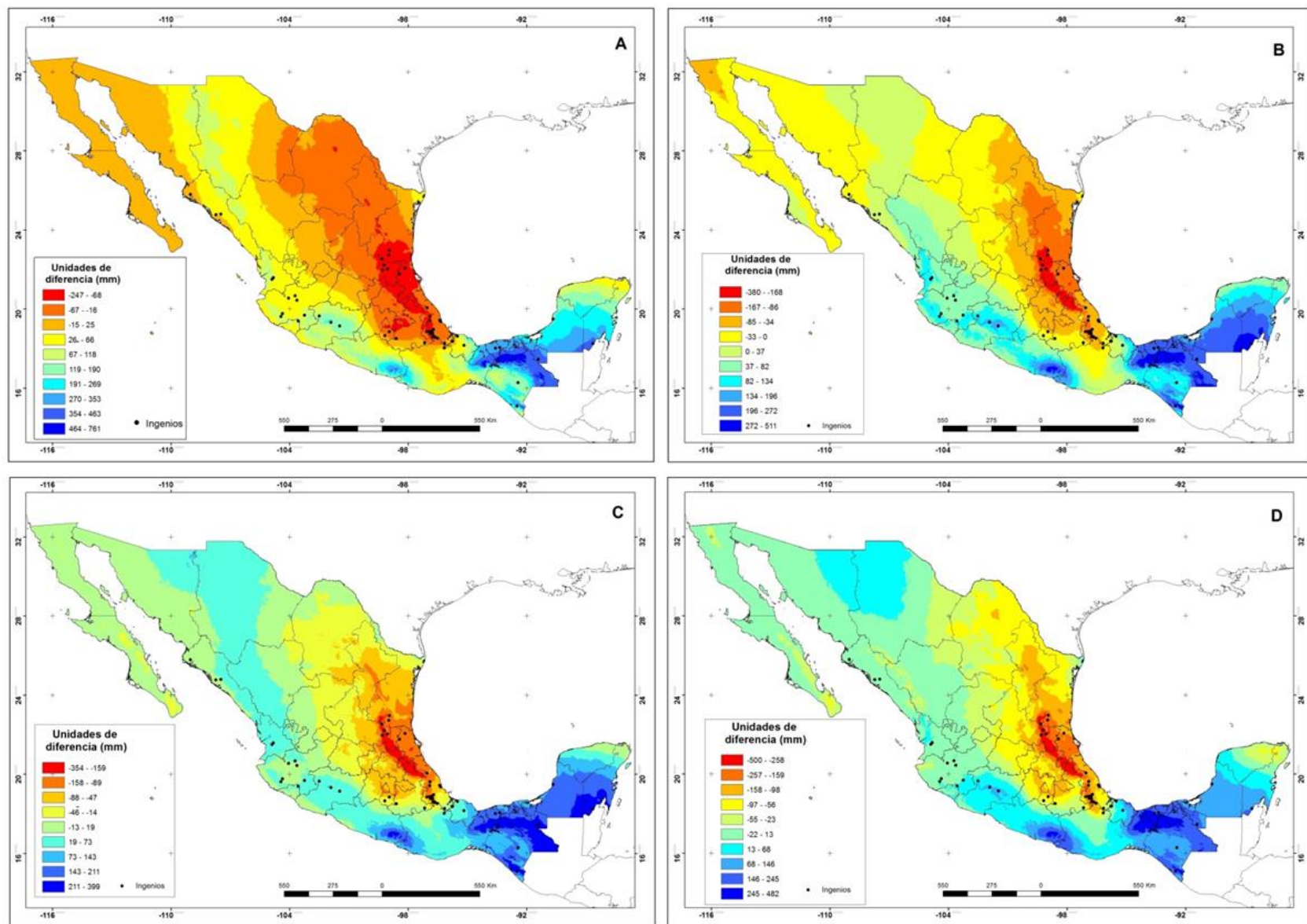


Figura 11. Cambios en la precipitación total anual (BIO 12). A. RCP 2.6 2050, B. RCP 2.6 2070, C. RCP 4.5 2050, D. RCP 4.5 2070.

El resultado del análisis estadístico MANOVA mostró diferencias significativas ($\lambda = 0.597044$; $F = 9.41$, $P > 0.0001$) entre los datos bioclimáticos de las localidades en el presente versus del futuro. Por su parte, de acuerdo con el estadístico Kappa (Cuadro 2) y su evaluación presente contra futuro solo en la variedad MEX 69-290 para ambos escenarios en 2050 el valor corresponde a la clasificación de casi perfecto y el resto de las comparaciones se encuentran bajo cambios sustanciales o considerables (Cuadro 5), es decir, bajo ambas clasificaciones no se encuentran grandes cambios en las distribuciones potenciales.

Cuadro 5. Valores del estadístico Kappa para los escenarios 2.6 y 4.5 hacia el 2050 y 2070.

	Futuro			
	RCP 2.6		RCP 4.5	
	2050	2070	2050	2070
CP 72 2086	0.752	0.7318	0.7508	0.7114
MEX 69-290	0.8089	0.7994	0.8304	0.7599
Temporal	0.7593	0.7394	0.7208	0.6658

DISCUSIÓN

Con base en los resultados las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 contarán con áreas potenciales en el futuro; en términos de porcentajes (Figuras 6, 7 y 9) se presenta una tendencia marcada a la permanencia de áreas con condiciones a futuro en ambos escenarios, además de los ingenios de temporal (Figura 8), que presentan la misma disposición a conservar áreas con condiciones, y también cuentan con una gran cantidad de zonas potenciales a futuro que en el presente no se encuentran. De acuerdo con Báez-Gonzales *et al.* (2018) para la variedad

CP 72-2086 en las zonas productoras de San Luis Potosí y Jalisco se podrían experimentar efectos positivos mediante un incremento en el rendimiento, y solo para el estado de San Luis Potosí el resultado es contrario a lo analizado (Figura 7), mientras que el estado de Jalisco no se visualizan áreas extensas de pérdida. Durán *et al.* (2014) mencionan que algunas especies de pastos cultivados en México entre los 0 y 1,200 msnm mantendrán las zonas potenciales a futuro, coincidiendo con el rango altitudinal bajo el cual se cultiva la caña de azúcar en México, mientras que Orozco *et al.* (2014); Ramírez-Ojeda *et al.* (2014); Ruiz-Corral *et al.* (2014) han mostrado posibles respuestas positivas para cultivos de chíca, algodón o maíz en México bajo efectos de cambio climático, mostrando así que los cultivos azucareros no son los únicos que pueden comportarse de esta manera.

De acuerdo con los diferentes modelos, en términos climáticos las áreas potenciales a futuro cuentan con las condiciones para la prevalencia de las variedades y para la continuidad de los cultivos en sus modalidades de temporal o riego. Cabe resaltar que los límites de tolerancia que permiten la sobrevivencia de las variedades están ligados a las condiciones bajo las cuales se han cultivado, y para su posible establecimiento en áreas de permanencia, su mantenimiento en áreas de pérdida o posible implantación en zonas de ganancia, se deben tomar como base los límites de tolerancia de la especie. De acuerdo con Bonnett (2014) existen distintos umbrales para cada etapa fenológica en el desarrollo de la caña de azúcar (Cuadro 6), que comparados con las localidades bajo las cuales se desarrolla en México, los sitios se mantienen dentro de los límites de desarrollo de

la especie en cuestiones de temperatura; incluso si se comparan aquellas variables que representan los valores extremos como la Bio 5, Bio 6, Bio 9 y Bio 10 (Cuadro 7) no representarían amenazas para el desarrollo de las diferentes etapas fenológicas.

En relación a la tendencia a la permanencia de zonas con condiciones a futuro marcada en todo el territorio en comparación con otros estudios, por ejemplo, el de Bravo-Mosqueda *et al.* (2012) en Oaxaca, se enfatiza que para mantener la producción a futuro se deberá considerar el riego a causa de los aumentos en la temperatura, evapotranspiración y variaciones en la precipitación, idea que puede extrapolarse a todo el país debido a que el aumento de la temperatura y por ende evapotranspiración es uno de los eventos que figuran con mayor grado de exactitud de acuerdo con el IPCC (2013).

Cuadro 6. Umbrales de temperatura para diferentes etapas fenológicas de la caña (modificado de Bonnett 2014).

Etapas	Mínima	Optima	Máxima
Crecimiento general	15.5°C	-	-
Germinación	12.0°C	36.0°C	48.0°C
Aparición de brotes	10.8°C	38.0°C	-
Aparición de hojas	8.0°C	32.0 – 36.0°C	42.0°C
Amacollamiento	16.0°C	28.0 – 33.0°C	-
Crecimiento en tallo	16.0°C	-	-
Floración	18.3°C	-	32.0°C
Desarrollo de polen	18.0°C	-	-
Desarrollo de raíces	10.0°C	-	26.0°C

Cuadro 7. Máximo y mínimos de variables bioclimáticas de localidades de México. *Temperatura máxima del mes más caliente, ** Temperatura mínima de mes más frío, ***Temperatura media del trimestre más seco, ****Temperatura media del trimestre más frío, bajo el escenario RCP 4.5 2070.

Variable	Mínima	Máxima
Bio 5*	37.1°C	41.5°C
Bio 6**	10.5°C	21.5°C
Bio 9***	19.5°C	30.4°C
Bio 10****	24.9°C	33.9°C

En cuanto a la precipitación, esta varía dependiendo del sitio; por ejemplo, hacia el noreste del país se presentarán decrementos y hacia el sur aumentos (Figura 11), estas variaciones de acuerdo con el CIAT (2012) provocarán una pérdida de zonas aptas en el centro de Veracruz y sur de Chiapas, un hecho opuesto a lo que se muestra para los ingenios de temporal en la costa pacifico de Chiapas y para la zona centro del estado de acuerdo con la distribución de MEX 69-290 (Figuras 6 y 8).

Las áreas de pérdida recurrentes en la distribución de los ingenios de temporal y de ambas variedades se ubican en el sureste de San Luis Potosí y norte de Veracruz, clasificada como una región de media y alta producción de acuerdo a USDA & SAGARPA (2009) y con base en los resultados es una de las regiones con mayor área de vulnerabilidad ante el cambio climático para los ocho ingenios que se distribuyen en la zona, siendo más evidente bajo el escenario RCP 4.5 en ambas ventanas temporales (Figura 6-8); esta constante en los diferentes modelos puede explicarse por efecto del decremento de la precipitación y aumento de la temperatura recurrente en ambos escenarios (Figuras 10 y 11).

Para las regiones con distribución potencial en categoría de ganancia como Tabasco, Campeche, Quintana Roo y Yucatán, cuentan actualmente con ingenios y la distribución principalmente para Campeche y Quintana Roo se concentra

hacia el centro de los estados, ofreciendo una posibilidad de realizar valoraciones para la implementación de los cultivos a futuro, en tanto el estado de Yucatán a lo largo de la historia azucarera ha albergado ingenios (Catmis y Kakalna) en años anteriores a 1985, lo que puede favorecer la renovación de ingenios azucareros en dicho estado (Crespo *et al.* 1988). Cabe resaltar que todas aquellas áreas con ganancia de condiciones o con posibilidades de establecer un cultivo deben ir de la mano de estudios (Aguilar-Rivera 2014) que sustenten el posible desarrollo del cultivo, y optar por acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

CONCLUSIONES

A futuro la caña de azúcar en México podrá continuar cultivándose en la mayoría de los ingenios azucareros en los que actualmente se procesa. La pérdida de áreas se presenta en distintas zonas del país, y muchas de ellas no albergan actualmente ingenios azucareros y solo aquellos ubicados en la zona cañera del noreste del país afrontarán la posibilidad de lograr la continuidad de los cultivos, perecer y disminuir la producción o considerar la posibilidad de desplazarse hacia las diferentes zonas que presentan condiciones óptimas a futuro. Entre las diferentes áreas potenciales a futuro, la Península Yucatán, puede albergar cultivos azucareros de variedades como la MEX 69-290, la CP 72-2086 o cultivos de temporal. En los términos climáticos expuestos su establecimiento puede ser viable para ambas variedades.

LITERATURA CITADA

- Adams RM, Rosenzweig C, Peart RM, Ritchie JT, McCarl BA, Glycer JD, Curry RB, Jones JW, Boote KJ, Allen LH. 1990. Global climate change and US agriculture. *Nature*. 345: 219-224.
- Aguilar RN. 2014. Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Revista Electrónica Nova Scientia*. 6 (2): 125-161.
- Aitiken K, McNeil M. 2009. Diversity analysis. In Henry RJ, Kole C, eds. *Genetics Genomics and Breeding of Sugarcane*. USA New Hampshire: Science Publ. Enfield, p.19-42.
- Altieri MA, Nicholls C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*. 3:7-28.
- Ballesteros BC, Jiménez GD, Hernández CG. 2011. El impacto potencial del cambio climático sobre los agroecosistemas. El caso del cultivo del maíz, proyecciones a futuro. En: Aragón GA, Jiménez GD y Huerta LM (eds.). *Manejo Agroecológico de Sistemas*. Vol. II. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. 1-14.
- Baez-Gonzalez AD, Kiniry JR, Meki MN, Williams JR, Alvarez CM, Ramos GJ, Magallanes EA. 2018. Potential impact of future climate change on sugarcane under dryland conditions in Mexico. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 204 (5): 1-14.
- Bellon MR, Hodson D, Hellin J. 2011. Assessing the vulnerability of traditional maize

seed systems in Mexico to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 108 (33): 13432-13437.

Beck J. 2013. Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? *Climate Change*. 116: 177-189.

Bonnett GD. 2014. Developmental Stages (Phenology). In Moore PH, Botha FC, eds. *Sugarcane Physiology Biochemistry & Functional Biology*. New Delhi, India: Wiley Blackwell, 35-53.

Bravo-Mosqueda EG, Medina-García J, Ruíz-Corral JA, Báez-González A. D. V, Mariles-Flores. 2012. Cambio Climático y su Impacto Potencial en el Sistema Producto Caña de Azúcar en el Área de Abasto del Ingenio Adolfo López Mateos. INIFAP. Publicación Especial Núm. 11. Oaxaca, México, 52.

Cavazos T, Salinas JA, MartínezB, Colorado G, De Grau P, Prieto G, Conde AC, Quintanar IA, Maya MM, Rosario de la CR, Ayala EM, Carrillo T H., Santiesteban, O, Bravo ME. 2013. Actualización de escenarios de Cambio Climático para México como parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final, SEMARNAT, INECC, CICESE, IMTA, UNAM. México.

Cerda LJ, Villarroel PL. 2008. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Bioestadística*. 79: 54-58.

Chuvieco SE. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el Espacio. *Ariel Ciencia*. Barcelona, España, 596.

- CIAT. 2012. Escenarios del Impacto del Clima a Futuro en Áreas de Cultivo de Café en México. Informe final. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, 44.
- Conde C, Ferrer R, Orozco S. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible Adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*. 19(3): 181-194.
- Crespo H, Reyes RS, Vega VE, Embriz A, Zolla C, González HC, Pinet A, Sharrer B. 1988. Historia del Azúcar en México I., Fondo De Cultura Económica. México, 11-13.
- Donner LJ, Wyman BL, Hemier RS, Horowitz LW, Ming Y, Zhao M, Golaz J-C, Ginoux P, Lin SJ, Schwarzkopf MD, Austin J, Alaka G, Cooke WF, Delworth TL, Freidenreich SM, Gordon CT, Griffies SM, Held IM, Hurlin WJ, Klein SA, Klein SA, Knutson TR, Langenhorst AR, Lee H-C, Lin Y, Magi BI, Malyshev SL, Milly PCD, Naik V, Nath MJ, Pincus R, Ploshay JJ, Ramaswamy V, Seman CJ, Shevliakova, Sirutis JJ, Stern WF, Stouffer RJ, Wilson R J, Winton M, Wittenberg AT, Zeng F. 2011. The Dynamic Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Couple Model CM3. *Journal of Climate*. 24: 3484-3519.
- Durán PN, Loya OJL, Ruiz CJA, Gonzáles EDR, García PJD, Martínez GS. 2016. Impacto del cambio climático en la distribución potencial de *Morus alba* L. in México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13: 2511-2521.

FAO. 2012. México: El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y
Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación,
439-

Flores LHE, Ruiz CJA, de la Mora OC, Zarazúa-Villaseñor P, Chávez DAA,
Ramírez VH, Velásquez VMA. 2014. Aplicación del modelo EPIC para
evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el
rendimiento de grano de maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias
Agrícolas*. 10: 2007-2020.

Gay EC, Conde C, Eakin H, Villers L. 2006. Potential impacts of climate change on
agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climate
Change*. 79:253-288.

Gesch DB, Larson KS 1996. Techniques for development of global 1-kilometer
digital elevation models. pp 20-22. En: Pecora Thirteen, Human interactions
with the Environment- Perspectives from Space, Sioux Falls, South Dakota.

Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than
simple habitat models. *Ecology Letters*. 8: 993-1009.

Granados RR, Medina BMP, Peña MV. 2014. Variación y cambio climático en la
vertiente del Golfo de México. Impactos en la cafecultura. *Revista Mexicana
de Ciencias Agrícolas*. 5(3): 473-485.

Granados RR, Sarabia RAA. 2013. Cambio climático y efectos en la fenología del
maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(3): 435-

446.

Hatfield JL, Boote KL, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate Impacts on Agriculture Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*. 103 (2): 351-370.

Hernández-Cázares, A. S. 2014. La agroindustria de la Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en México. *Agroproductividad*. 7 (2): 35-41.

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra LJ, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25:1965-1978.

Humbert RP. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. México D.F: CECSA.

Jintrawet A, Prammanee P. 2005. Simulating the impact of climate change scenarios on sugarcane productions systems in Thailand. *Proceedings International Society of Sugar Cane Technologist*. 25: 64-68.

Kassie BT, Asseng S, Rotter RP, Hengsdijk H, Ruane AC, Martin K, Ittersum V. 2015. Exploring climate change impacts and Adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models. *Climate change*. 129: 145-158.

Körner C, Basler D. 2010. Phenology undel global warming. *Science*. 327(5972): 1461-1462.

IMPA. 1981. Catálogo de Variedades. Serie de divulgación técnica No. 14. Comisión Nacional de la Industria azucarera Instituto para el mejoramiento de la producción de azúcar, 149.

- IMTA. 2015. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- INECC. 2016. Efectos del cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. < <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>> (Fecha de consulta marzo 23,2017).
- Landis R, Koch GG. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*. 33(1): 159-174.
- Lira, R., Téllez, O., Dávila, P. 2009. The effect of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Curcubitaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 56:691-703.
- Magaña RVO. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En *Cambio climático: una visión desde México*, Martínez J. y Fernández A. Instituto Nacional de Ecología. México, 18-27.
- Medina-García G, Ruiz-Corral JA, Zegbe JA, Soria-Ruiz J, Rodríguez MV, Díaz PG. 2014. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10:1939-1950.
- Medina-García G, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno VM, Soria-Ruiz J, Díaz-Padilla G, Zarazúa VP. 2016. Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13:2465-2474.
- Mi CR, Zu Q, He L, Huettmann F, Jin N, Li J. 2017. Climate change would enlarge suitable planting areas of sugarcane in China. *International Journal of Plant*

Production. 11 (1): 151-166.

Miller JD, Tai PYP, Glaz B, Dean JL, Kang MS. 1984. Registration of CP 72-2086 Sugarcane. *Crop Science*. 24: 210.

Monterroso RAI, Conde AC, Rosales DG, Gómez JD, Gay GC. 2011. Assessing current and potential rainfed maize sustainability under climate change scenarios in Mexico. *Atmósfera*. 24(1): 53-67.

Moreno SJC. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. Tesis, Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

Orozco de R., G., Durán, P. N., González E. D., Zarazúa, V. P., Ramírez, O. G., Mena, M. S. 2014. Proyecciones de cambio climático y potencial productivo para *Salvia hispanica* L. en las zonas agrícolas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10:1831-1842.

Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 37:637-669.

Parmesan C, Hanley ME. 2015. Plants and climate change: complexities and surprises. *Annals of Botany*. 116: 849-864.

Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sánchez-Cordero V, Soberón J, Buddemeier RH, Stockwell DR. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. 416: 626-629.

Phillips SJ. 2006. Maxent software for species habitat modeling. Versión 3.3.3k. New Jersey. Princeton University.
<<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>> (Fecha de consulta el 23

de abril de 2014).

Durán PN, Ruiz CJA, González EDR, Ramírez OG. 2014. Impact of climate change on grasses cultivation potential of three altitudinal strata-agricultural lands of Mexico. *African Journal of Agricultural Reserch*. 9(18): 1396-1406.

Ramírez-Ojeda G, Ruiz-Corral JA, Pérez-Mendoza C, Villavicencio-García R, Mena MS, Durán-Puga N. 2014. Impactos del cambio climático en la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10: 1885-1895.

Rosas JAA, Galindo TME, Lee EHE, Alvarado GOG. 2010. Variabilidad genética en 22 variedades híbridas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido). *Revista Internacional de Botánica Experimental*. 79:87-94.

Rosenzweig C, Hillel D. 2007. Agriculture and Climate Changes: Effects and Responses. *Phi Kappa Phi Forum*. 87 (1): 19-24.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Social, Pesca y Alimentación). 2015. *Agenda Técnica Agrícola San Luis Potosí*. SAGARPA. México.

Salgado GS, Lagunés ELC, Núñez ER, Ortiz GCF. y Aranda IEM. 2012. *Caña de azúcar producción sustentable*. Colegio de Postgraduados. México.

Sánchez FM. 1997. *Desarrollo de la producción de caña y azúcar en la república mexicana*. Colegio de Postgraduados Instituto de Enseñanza e Investigación en ciencias Agrícolas. Estado de México, México, 143.

Sentíes-Herrera HE & Gómez-Merino FC. 2014. *Nuevas directrices en*

mejoramiento genético de Caña de azúcar (*Saccharum* spp.).
Agroproductividad. 7(2):9-15.

Siikamäki J. 2008. Climate Change and U.S. Agriculture:Examining the connections. *Environment*. 50 (4): 36.49.

Smith P, Price J, Molotoks A, Warren R, Malhi Y. 2018. Impacts on terrestrial biodiversity of moving from a 2°C to 1.5°C target. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 376: 20160456.

Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna KK, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P. 2013: Resumen técnico. En Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds. Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. 33- 182.

Tinoco RJA, Gómez-Díaz JD, Monterroso-Rivas AI. 2011, Efectos del cambio climático en la distribución potencial de maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*. 29 (2): 161-168.

Trejo I, Martínez-Meyer E, Calixto-Pérez E, Sánchez-Colón S, Vázquez TR, Villers-Ruiz I. 2011. Analysis of the effect of climate change on plant communities and mammals in Mexico. *Atmósfera*. 24(1): 1-14.

Ureta C, Martínez-Meyer E, Perales HR, Álvarez-Buylla ER. 2012. Projecting the effects of climate change on the distributions of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*. 18: 1073-1082.

Wayne GP. 2013. *The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways*. Skeptical Science.

CAPÍTULO II

Distribución potencial presente y futura del cultivo de caña de
azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en el Mundo

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global por causas antropogénicas es en la actualidad una de las principales causas por las cuales se ha generado una alteración de los patrones climáticos y modificaciones en el nivel del mar, reducción de glaciares y casquetes (IPCC 2013), con estimaciones de un aumento de la temperatura de 0.85°C de 1880 al 2012 (Stocker *et al.* 2013). Estos cambios en el clima han sido documentados mediante su efecto en la biodiversidad, la cual muestra modificaciones en fenología, relaciones bióticas o su distribución (Parmesan 2006; Körner & Basler 2010; Parmesan & Hanley 2015; Smith *et al.* 2018). Dichos efectos también se han presentado en las especies cultivadas, además de cambios positivos y negativos en términos productivos como el rendimiento y producción de distintos cultivos (Siikamäki 2008; Hatfield *et al.* 2011; Moriondo *et al.* 2011). Entre los cultivos más estudiados por el efecto de los cambios en el clima se puede mencionar al maíz (Southworth *et al.* 2000; Tubiello *et al.* 2002), trigo (Tubiello *et al.* 2002; Özdoğan 2011) y el arroz (Chavas *et al.* 2009).

El cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertenece a la familia Poaceae, se compone de un tallo con una parte sólida fibrosa y una parte líquida que en su mayoría contiene agua y sacarosa. La reproducción se realiza de manera vegetativa mediante esquejes, y su recolección generalmente es anual, la caña de azúcar puede alcanzar hasta cinco metros de longitud y seis centímetros de diámetro dependiendo de la variedad empleada, se desarrolla en climas tropicales

y subtropicales (Humbert 1974; Fahrasmane & Ganou 2005).

Su domesticación ocurrió en Nueva Guinea y llevada a China, India, Arabia, Persia, Egipto y Europa (Aitiken & McNeil 2009). Su expansión hacia América se dio gracias a Cristóbal Colón en 1493. Posteriormente llegaría a Hawái, a las islas Mauricio y Reunión en 1700, y en 1800 a Australia, Fiji y al sur de África (Irvine 2004). Actualmente se cultivan cerca de 27 millones de hectáreas repartidas en 90 países en todo el mundo. Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán y México se consideran los países con mayor área dedicada al cultivo y con mayor producción (FAOSTAT 2017).

Condiciones climáticas para el desarrollo de la caña de azúcar

Un desarrollo óptimo para la caña de azúcar depende directamente de dos factores: la temperatura y la precipitación, los cuales controlan y están presentes en todas las etapas fenológicas de la planta. La temperatura mínima para el cultivo de la caña de azúcar es de 15.5°C (Bonnett 2014). La germinación de las semillas se produce con una temperatura mínima de 12.0°C y máxima de 48.0°C y el crecimiento de los esquejes (reproducción vegetativa) se puede llevar a cabo desde los 10.0°C hasta los 42.0°C (Bonnett 2014), teniendo un óptimo entre los 32.0°C a 38.0°C. El crecimiento óptimo de la caña de azúcar se encuentra entre los 26.0°C y 33.0°C (Amaya *et al.* 1994). El crecimiento disminuye cuando la temperatura baja de 20.0°C y cuando aumenta a 35.0°C la respiración aumenta y la tasa fotosintética disminuye, ocasionando una reducción en el crecimiento. Para el buen crecimiento de la caña de azúcar se requieren días calientes con noches frescas (Humbert 1974; FIRA 2010).

La caña de azúcar prospera en una amplia gama de regímenes de precipitación; en promedio se requieren de 1200 a 1500 mm de precipitación anual distribuidos de la mejor manera a lo largo de su ciclo vegetativo (Ruiz 2000; FIRA 2010).

Estudios de cambio climático en el cultivo de caña de azúcar

A nivel mundial los estudios realizados para conocer los efectos potenciales que el cambio climático tendrá a futuro sobre los cultivos han reflejado tanto impactos negativos como positivos. Para el principal productor del mundo Brasil, Marin *et al.* (2013) y Singels *et al.* (2014) consideran posibles aumentos en el rendimiento de la caña debido al aumento de la temperatura. Contrario a lo anterior, Dos Santos & Sentelhas (2012) mencionan que debido al aumento en la temperatura la evapotranspiración aumentará, causando un efecto negativo en la producción de caña en particular la de temporal. En Australia se espera un beneficio mínimo o efectos mayores a futuro para el cultivo (Park *et al.* 2007); de igual forma, para Tailandia el efecto del aumento en las concentraciones de CO₂ permitiría aumentos en los rendimientos (Jinrawet & Prammanee 2005). En las Islas Mauricio, de presentarse un incremento en la temperatura de 2.0°C a 4.0°C, el rendimiento decaería hasta un 57% (Cheeroo-Nayamuth & Nayamuth 2001; Nayamuth 2005). Contrario a esto, en Ghana puede esperarse un rendimiento similar al actual (Black *et al.* 2014). En Sudáfrica Deressa *et al.* (2005) mencionan que debido al aumento de la temperatura y decremento de la precipitación la producción podría verse mermada; mientras que Singels *et al.* (2014) esperan un aumento del 20% en el rendimiento y la presencia de condiciones óptimas a futuro para el cultivo.

Concebir una idea y panorama general en escala mundial de los potenciales efectos del cambio climático sobre la caña de azúcar, las aportaciones que resulten de este trabajo pretende encontrar aquellas áreas potencialmente cultivables a futuro, bajo escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 4.5 en dos ventanas temporales 2050 y 2070. Estas áreas potenciales en el mundo se podrán conocer mediante el modelado de nicho ecológico, el cual ha sido considerado como uno de los mejores métodos para estimar la distribución geográfica potencial de las especies (Guisan & Thuiller 2005), esta metodología ha sido utilizada en distintos aspectos de la biología entre ellos el impacto del cambio climático en especies silvestre (Peterson *et al.* 2002; Trejo *et al.* 2011) y en especies cultivadas (Lira *et al.* 2009; Ballesteros-Barrera *et al.* 2011; Ureta *et al.* 2012; Beck 2013).

MÉTODOS

Base de datos Mundial

Se construyó una base de datos de localidades de presencia de *Saccharum officinarum* L. a nivel mundial, a partir de los datos obtenidos de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF por sus siglas inglés), además de una amplia búsqueda en artículos científicos y de divulgación, así como diversos a sitios especializados a nivel mundial como la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas inglés) y la Organización Internacional de Azúcar (ISO por sus siglas en inglés). Los datos de GBIF para México se corroboraron con la información del Manual Azucarero Mexicano. Con

base en las recomendaciones de Humbert (1974), Ruiz (2000) y FIRA (2010), acerca de los límites de tolerancia del crecimiento de la caña de azúcar, se seleccionaron todos aquellos sitios que se encontrasen bajo las siguientes condiciones: una precipitación total anual mayor a 1,000 mm y altitudes menores a los 1,100 msnm. Cada dato de presencia obtenido se corroboró y se georreferenció con ayuda del sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS versión 10.0.

Datos climáticos

Los datos climáticos mundiales para el presente y futuro se obtuvieron de Hijmans *et al.* (2005) del portal Worldclim (<http://worldclim.org/version1>) en su versión 1.4, formato raster con una resolución espacial de 2.5 minutos arco (~4.5 km a nivel del ecuador). Los datos para el presente abarcan una climatología temporal de 1960 a 1990; a futuro se emplearon dos ventanas temporales 2050 (2041-2060) y 2070 (2061-2080) basados en dos escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y RCP 4.2) (Van Vuuren *et al.* 2011; Wayne 2013), conforme al modelo de circulación general GFDL-CM3 (Donner *et al.* 2011). Toda la información climática a futuro toma en cuenta la modelación del clima fase 5 (CMIP5) del IPCC (2013). Se ocuparon 19 variables bioclimáticas (Cuadro 8), las cuales expresan los patrones climáticos extremos, estacionales y anuales (Ureta *et al.* 2011). Del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Gesh & Larson 1996) <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30> se obtuvieron las variables topográficas de aspecto, pendiente y elevación, con una resolución espacial de 30 arco-segundos (1 km aproximadamente), y mediante el SIG ArcView 3.2 se redujo su resolución a

2.5 min arco; de las tres, solo se ocuparon para la modelación la pendiente y aspecto, mientras que la elevación sirvió como una variable para verificar que los registros se encontrarán dentro de los límites establecidos por la literatura.

Perfiles bioclimáticos

Con las variables climáticas del presente, del futuro y el conjunto de los registros de la especie se generaron perfiles bioclimáticos de las 19 variables y tres topográficas; por medio del SIG ArcGIS 10 y la herramienta Extac Values to Multi Points, se extrajeron los datos de cada variable por cada punto en la geografía. Del conjunto de datos obtenidos se calculó la media, mediana, máximos y mínimos de cada variable. Para el presente los perfiles bioclimáticos funcionan como indicadores de la tolerancia climática de la especie y al comparar los datos de cada variable en el presente versus futuro se pueden detectar aumentos o decrementos en la temperatura y precipitación, además de mostrar aquellas zonas con cambios de mayor o menor magnitud.

Modelos de nicho ecológico y análisis

Los modelos de nicho ecológico se realizaron mediante el algoritmo MaxEnt (Phillips 2006), en su versión 3.4.1., para generar la distribución potencial para el conjunto de datos de *Saccharum officinarum* al presente y su proyección bajo dos escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y RCP 4.5) y dos ventanas temporales (2050 y 2070). El resultado de cada combinación, calcula la distribución más probable para una especie, expresando el valor más idóneo del hábitat de la especie como una función de las variables ambientales.

Cuadro 8. Variables bioclimáticas ocupadas para los modelos de nicho ecológico.

Abreviatura	Variable bioclimática
Bio 1	Temperatura promedio anual
Bio 2	Rango de temperatura diurno medio (promedio de todos los meses (Temp Max-Temp Min)
Bio 3	Isotermalidad (Bio 2/Bio 7)*100
Bio 4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar *100)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más caliente
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango de temperatura anual (Bio 5 – Bio 6)
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 11	Temperatura media del trimestre más caliente
Bio 12	Precipitación total anual
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más caliente
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío

Para la modelación se fijó un número máximo de iteraciones (500), un límite de convergencia (0.00001), el tipo de ejecución fue la predeterminada por el algoritmo, una selección de clases de entidad (función automática), el número de máximo de puntos de fondo (10,000), y los valores de regularización (1) como la configuración predeterminada para rechazar datos duplicados de presencias dentro de las celdas de cada raster. El área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) del diagrama de curva operacional (ROC por sus siglas en inglés) se seleccionó de lo predeterminado por el algoritmo. Se incluyeron las opciones para generar curvas de respuesta a las variables y un análisis de Jackknife a fin de

conocer las variables con mayor importancia y aporte para el desarrollo de los modelos. Se estableció un umbral de corte bajo el 10 percentil.

Se obtuvo un único modelo para cada combinación de las dos ventanas temporales (2050 y 2070) con los dos escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y RCP 4.5), más el modelo al presente. Los cinco modelos se procesaron en el SIG IDRISI 17.0., y se generó una reclasificación de acuerdo al valor de 10 percentil, para obtener una salida binaria presencia-ausencia. Posteriormente se aplicó el análisis se aplicó una tabulación cruzada e intersección de mapas (CROSSTAB) añadiendo la opción para obtener el índice Kappa, el cual determina las diferencias entre el modelo generado para el presente y el generado para el futuro, bajo el cual se pueden analizar los cambios en la distribución potencial; Kappa trabaja con valores de 0 a 1, donde números cercanos a 0 indican mayor grado de discordancia y números cercanos a 1 indican mayor grado de concordancia; los diferentes valores que puede tomar Kappa se presentan en el Cuadro 9 (Landis & Koch 1977; Cerda & Villarroel 2008)

Las salidas de CROSSTAB para los modelos binarios a futuro, se clasificaron como zonas de pérdida a aquellas que en el presente cuentan con condiciones óptimas que a futuro desaparecen, zonas de permanencia a las que presentan condiciones óptimas en el presente y futuro, zonas de ganancia aquellas que en el presente no cuentan con condiciones óptimas y que a futuro se hacen visibles. De cada categoría se obtuvo la cantidad en kilómetros cuadrados y se comparó el total con la distribución potencial en el presente para obtener valores porcentuales. Además se obtuvo por país la cantidad en kilometro cuadrados y el porcentaje con

base en su superficie (Banco Mundial (<https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.SRF.TOTL.K2>) para cada modelo de distribución potencial.

Cuadro 9. Valores e interpretación del estadístico Kappa.

Valor del estadístico Kappa	Interpretación
<0.00	Pobre o poco, escaso
0.00-0.20	Leve
0.21-0.40	Razonable
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial, considerable
0.81-1.00	Casi perfecto

RESULTADOS

El valor de AUC para los modelos de *Saccharum officinarum* fue de 0.931. Se modelaron 223 registros esparcidos en 46 países. El análisis de Jackknife mostró que las variables de mayor importancia y aportación para la construcción del modelo fueron la precipitación total anual (Bio 12), la precipitación del trimestre más frío (Bio 19) y el rango de temperatura media diurna (Bio 2).

La distribución potencial en el presente en el mundo abarca cerca de 14 millones de km² esparcidos en 121 países (Figura 12); de ellos, los que concentran mayor cantidad de área son Brasil (3, 033,915 km²), República Democrática de Congo (1, 007,109 km²), Indonesia (725, 807 km²) y Bolivia (568,502 km²); 31 países cuentan con un área de distribución potencial por debajo de 500 mil km², entre ellos México con 354,568 km², 49 países cuentan con menos del 100 mil km² y 48 con menos de mil kilómetros cuadrados; entre estos últimos figuran un gran cantidad de territorios insulares (Anexo A Cuadro 11). Sin embargo existen países

como Camboya, Jamaica, Barbados, Belice o Cuba, los cuales cuentan con porcentajes mayores a 95% de la distribución potencial en función a su superficie territorial (Anexo A Cuadro 12). La distribución potencial es coincidente con su centro de origen, siendo representado en Papúa Nueva Guinea, Indonesia y la región del suroeste de China.

Áreas de distribución potencial bajo el escenario RCP 2.6

Bajo el escenario más conservador, en 2050 y 2070 (Figura 13 y 14) Brasil, República Democrática de Congo figuran como punteros en cantidad de áreas con pérdida, permanencia y ganancia de áreas con condiciones a futuro (Anexo A Cuadro 11).

En el 2050 se perderá un área potencial de 860,893 km² (6.2 %), reflejada en 82 países, por debajo de los principales. Colombia, Indonesia, Mozambique, Nigeria o Papúa Nueva Guinea presentan las cantidades de mayor área, 13 países perderán en promedio 17 mil km², 30 países 4 mil km², mientras que para 32 la media es de 316 km² y 34 que carecen de áreas con pérdida; en relación la superficie territorial Comoras (23.7%), Brunei (11.9%), Dominicana (11.0%) y Costa Rica (10.0%) representan los de mayor porcentaje. La permanencia de áreas potenciales es de 13,128, 818 km² esparcidos en 113 países dentro de los cuales Bolivia, Venezuela y México destacan como los de mayor área en km² y en porcentaje de su territorio conservan el 42 %, 41% y 17% respectivamente; aquellos territorios principalmente insulares como Isla San Martín, Nueva Zelanda o San Bartolomé figuran entre los que menor cantidad de áreas y porcentaje

conservan. La ganancia de áreas potenciales es de 8,192,218 km², más del 50% comparado con lo actual; Uganda y Colombia posiblemente cuenten con 59.0 % y 57.0 % de su territorio para desarrollar el cultivo, mientras 48 países despliegan ganancias por debajo del 10% de su territorio.

En 2070 Argentina tendrá una pérdida del 2% (44,830 km²), en kilómetros cuadrados le siguen Indonesia, Venezuela y Papúa Nueva Guinea; mientras que en porcentaje de área Laos (8.8%), Burundi (8.0%) y Costa Rica (7.4%) representan los de mayores pérdidas. La permanencia de áreas potenciales es encabezada por Camboya (98.5%), Barbados (97.0%) San Vicente y las Granadinas (96.3%), países con una pequeña área conservan gran parte de su territorio por ejemplo Santo Tomé y Príncipe permanece con 93.8 % de 960 km² o Granada con 86.3% de 340 km². La ganancia de total a nivel mundial es de 8,835,358 km² esparcidos en 105 países, entre los cuales Perú ocupa el quinto lugar con 450,918 km², equivalente al 35 % de su territorio, mientras que el sexto lugar lo ocupa la India con 349,167 km², que en porcentaje territorial lo coloca entre los países con menor ganancia con 11 %. De acuerdo con el análisis Kappa 2050 (0.7305) y 2070 (0.7105) presentan grado sustancial, es decir no se encuentran grandes cambios.

Áreas de distribución bajo el escenario RCP 4.5

En 2050 y 2070, de igual manera que bajo el escenario RCP 4.5 (Figura 15 y 16), Brasil, República Democrática de Congo además de Indonesia cuentan con el área mayor de pérdida, ganancia y permanencia. En 2050 el área mundial de

pérdida es de 1, 075,221 km² esparcidos en 79 países; Brasil, República Democrática de Congo, Nigeria pierden el 5% de su territorio. En 2070 el área total sería de 920,507 km² en 74 países, de los cuales los de mayor pérdida en proporción a su territorio son Burundi, Costa Rica, Suazilandia y Filipinas con el 6%. La suma total para las áreas con permanencia en el 2050 es de 12, 108,785 km² integrados por 112 países, de los cuales Bolivia, México y Venezuela conservan en promedio 390 km², mismos que son constantes para 2070. De acuerdo a la superficie territorial Barbados, Belice, Camboya, Cuba, Jamaica y Nicaragua, permanecen con más del 95% en el 2050 y 2070. En el 2050 la ganancia de áreas será de 9, 426,762 km², 106 países, cifra que en el 2070 aumenta 1, 262,603 km² y se disminuye un país. En ambas ventanas temporales países como Perú, India, Venezuela o Estados Unidos aumentan su área de distribución de 2050 a 2070. En proporción a su país Colombia, Bangladesh, Sierra Leona y Uganda podrían aumentar hasta en un 58% las zonas de cultivo en 2050 y para 2070 hasta un 64%. Los valores de Kappa 2050 (0.7142) y 2070 (0.6886) indican un grado sustancial, es decir no se encuentran grandes cambios.

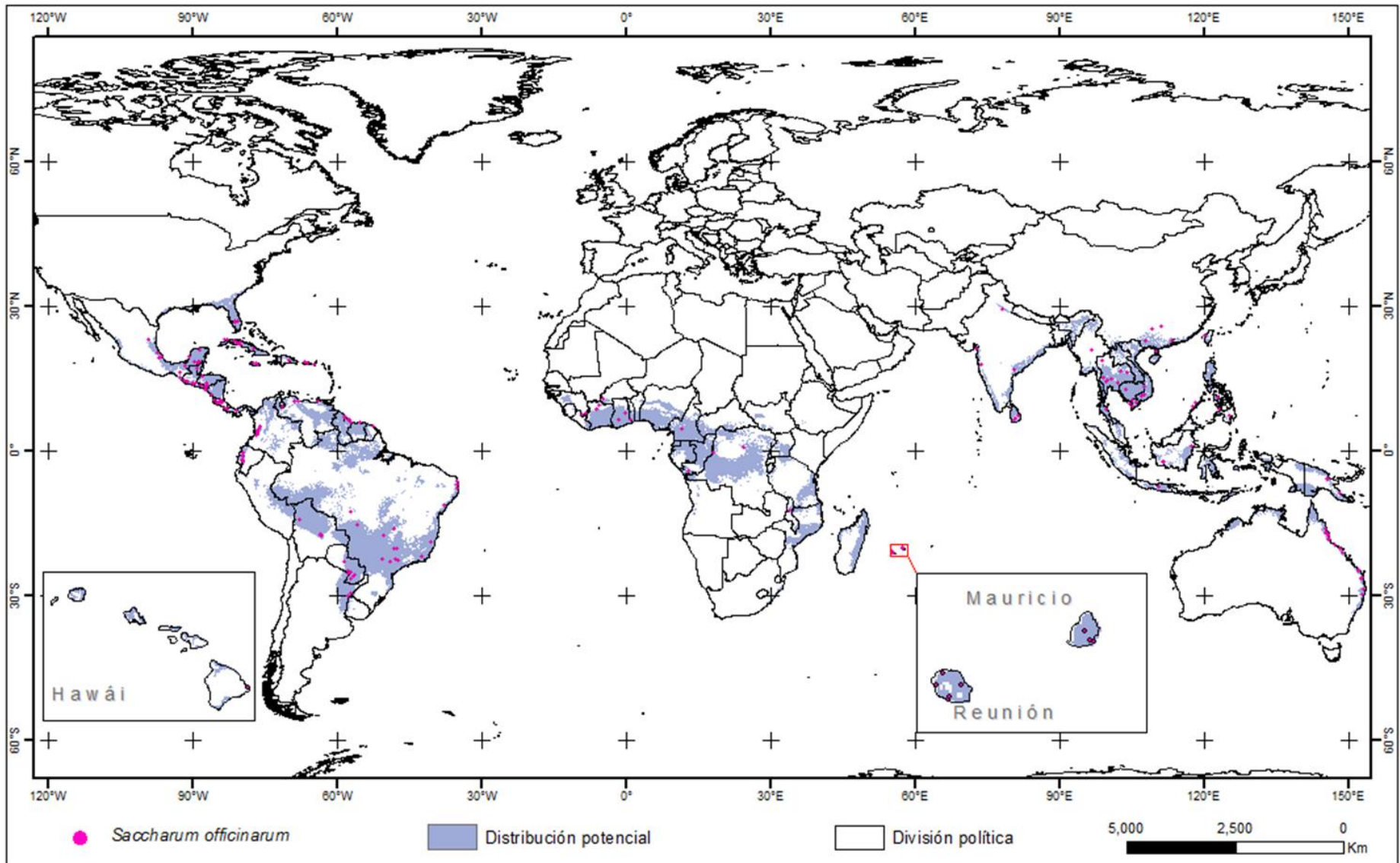


Figura 12. Distribución potencial en el presente de *Saccharum officinarum* en el Mundo.

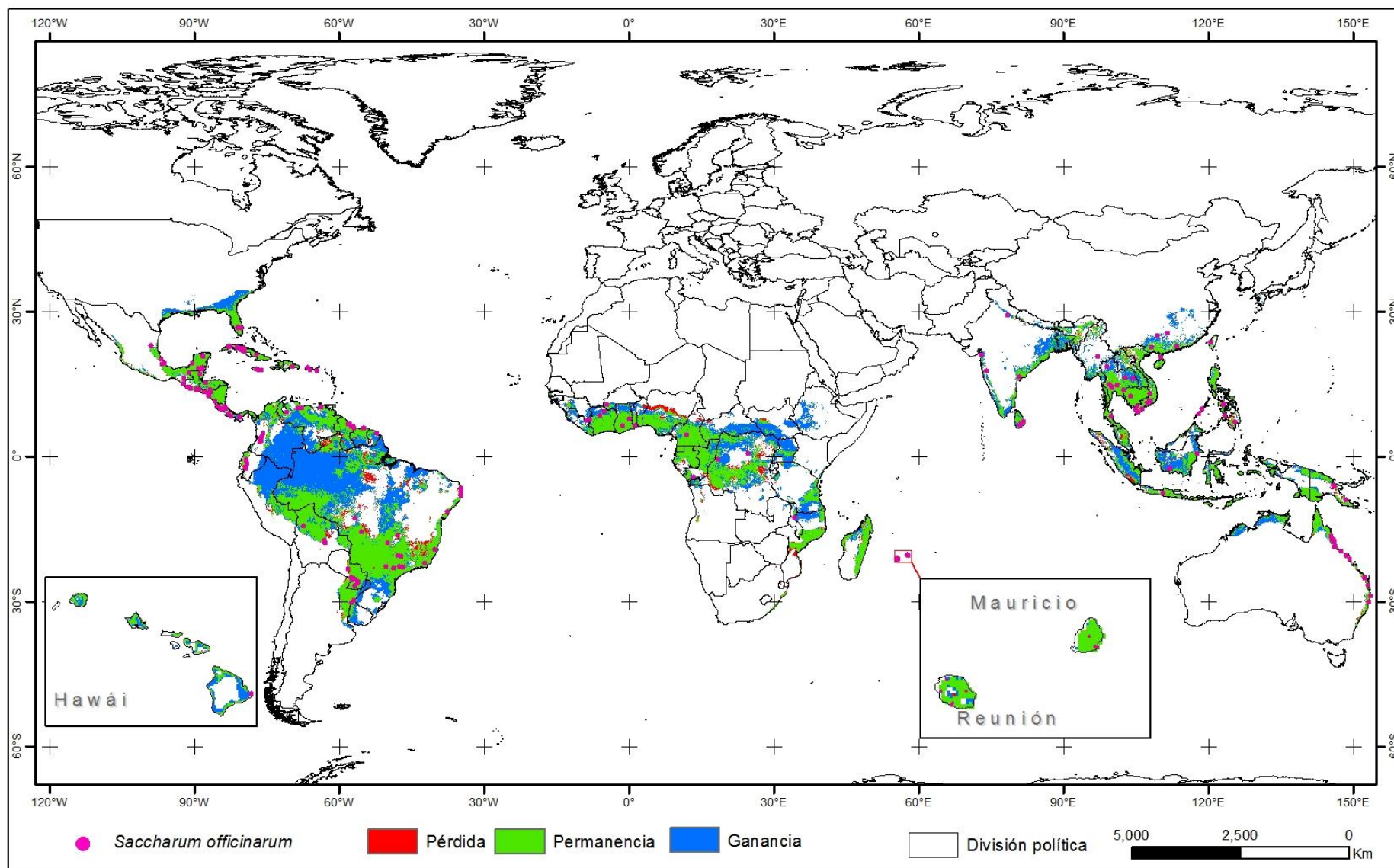


Figura 13. Distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo el escenario RCP 2.6 2050 en el Mundo.

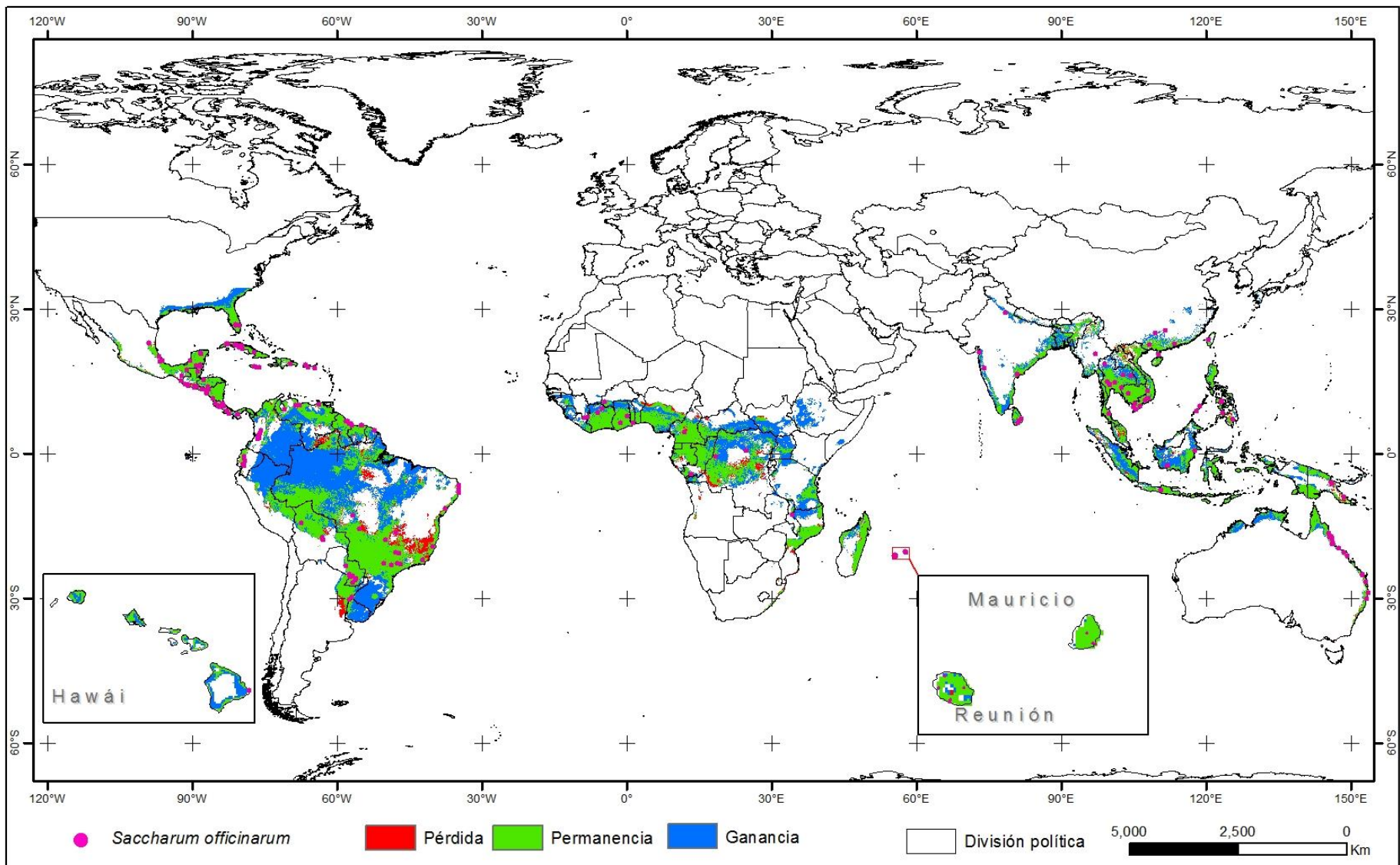


Figura 14. Distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo el escenario RCP 2.6 2070 en el Mundo.

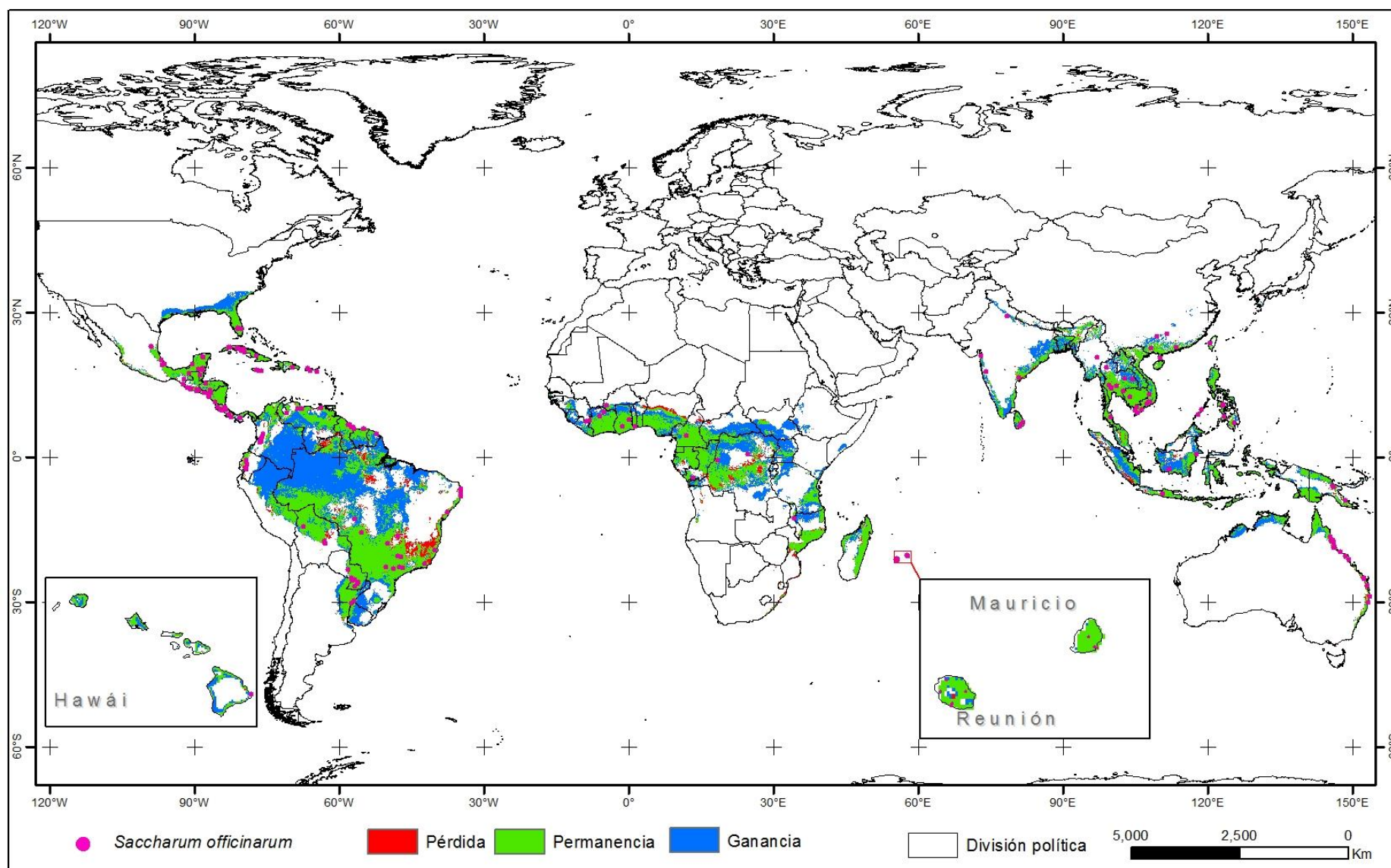


Figura 15. Distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo el escenario RCP 4.5 2050 en el Mundo.

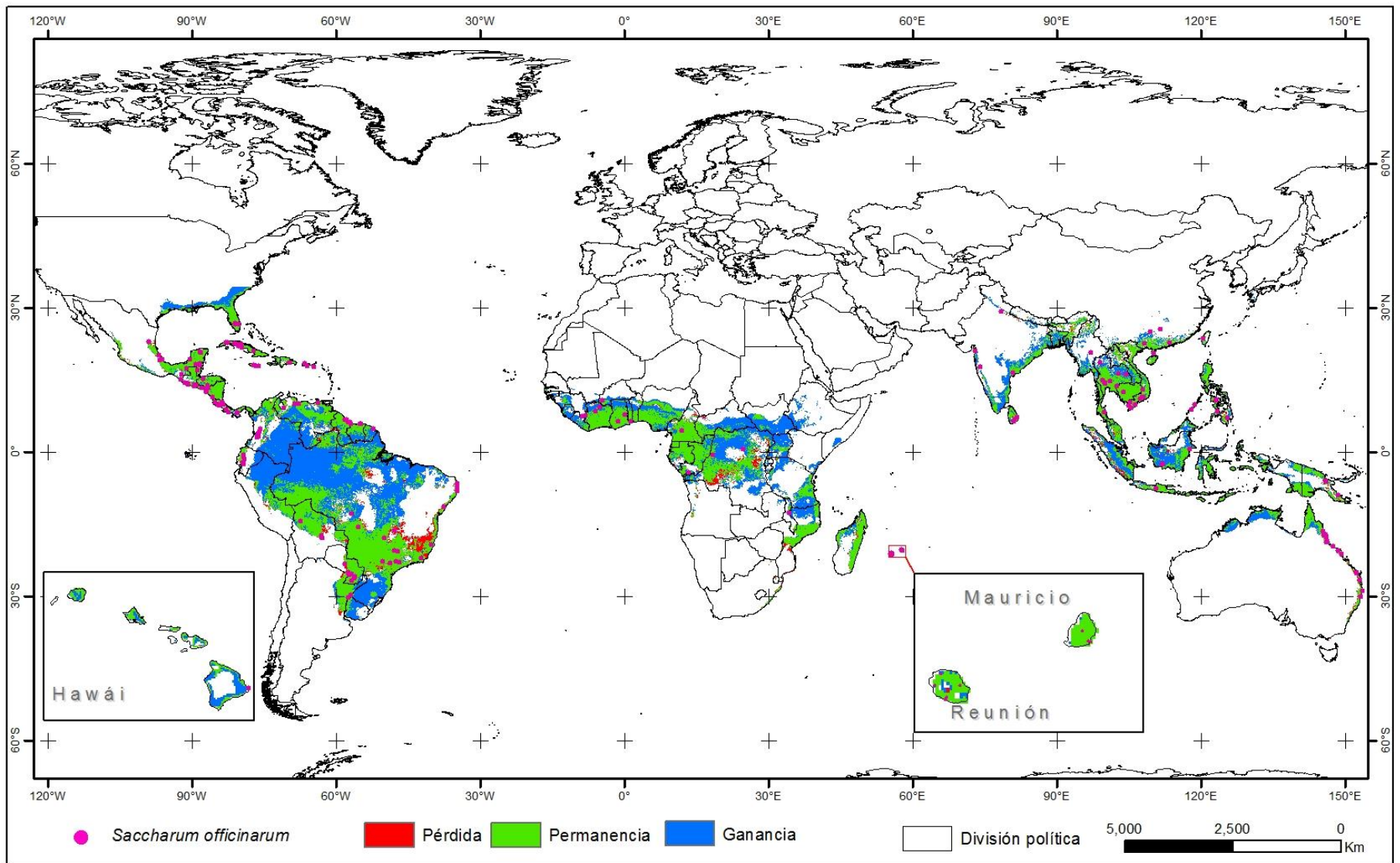


Figura 16. Distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo el escenario RCP 4.5 2070 en el Mundo.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados se observa (Cuadro 10 y Figura 17) una tendencia a nivel mundial a una permanencia y ganancia de áreas potenciales mayor a aquellas que presentan pérdida, por tanto en lo general se puede mencionar que la distribución potencial en el mundo se verá modificada de manera positiva bajo efectos de cambio climático.

Cuadro 10. Porcentajes y área de la distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 de cambio climático.

Presente (Km ²)								
13,989,711.22	RCP 2.6				RCP 4.5			
	2050 (Km ²)	%	2070 (Km ²)	%	2050 (Km ²)	%	2070 (Km ²)	%
Pérdida	860,893	6.2	1,001,524	7.2	961,133	6.9	883,582	6.3
Permanencia	13,128,818	93.8	12,988,188	92.8	13,028,578	93.1	13,106,129	93.7
Ganancia	8,192,218	58.6	8,835,358	63.2	8,759,928	62.6	10,107,007	72.2

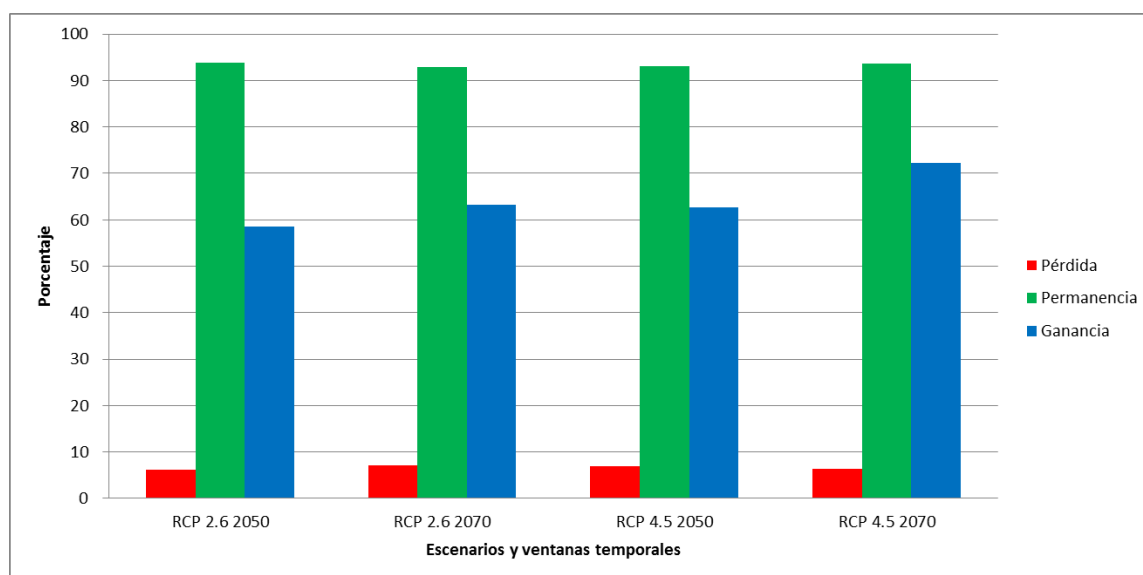


Figura 17. Porcentaje de cambio en la distribución potencial de *Saccharum officinarum* bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 de cambio climático en el Mundo.

Para los tres tipos de respuesta (ganancia, permanencia o pérdida), de los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 se explican a continuación en términos climáticos (temperatura y precipitación) generales. Uno de los planteamientos del cambio climático es el aumento de la temperatura en todo el mundo e incrementos o decrementos para la precipitación (IPCC 2014). Los resultados indican que la precipitación es constante o con incrementos en las zonas con permanencia y ganancia, y tiende a decrecer en las zonas de pérdida, este evento en conjunto con el aumento de la temperatura provocan una mayor evapotranspiración, generando déficits de humedad en suelo e influyendo el desarrollo de la caña (Carvalho *et al.* 2015).

En escala continental, América concentra las pérdidas en el sureste de Brasil y el resto del continente se compone de zonas con condiciones idóneas. No obstante Jones & Thornton (2003) proponen panoramas perjudiciales para el rendimiento del maíz en América hacia mediados de siglo. En África los estudios han señalado que el oeste y sur del continente como una región vulnerable con posibles efectos negativos para la agricultura (Jones & Thornton 2003; Slingo *et al.* 2005; Beck 2013; Zinyengere *et al.* 2013), los resultados sugieren una respuesta con tendencias positivas, en especial para el oeste de África, la pérdida de condiciones se concentra en el centro del continente. Para el continente Asiático en la región sureste de acuerdo con Beck (2013) se tendrá un decremento de áreas idóneas. Sin embargo se logra observar una mayor continuidad de áreas con permanencia de condiciones (Figuras 13-16).

Para los principales productores en el mundo, Brasil, dentro de ambos

escenarios a 2050 y 2070, concentra la mayor cantidad de área de permanencia y con cantidades pequeñas de pérdida, percibiéndose como un efecto positivo a causa del cambio climático, sin embargo Dos Santos & Senthelas (2012) y Carvalho *et al.* (2015) sugieren efectos negativos a futuro. En India las áreas potenciales se concentran en las costas orientales, occidentales y en menor proporción sobre la Planicie Indo-Gangética señalada como una de las principales zonas de cultivo de caña de azúcar (Verna *et al.* 2018), Praveen *et al.* (2017) mencionan bajo el escenario RCP 4.5 una disminución en el rendimiento en la región sureste, con base en los resultados (Figuras 15 y 16) esta misma región presenta condiciones de ganancia y permanencia. Las áreas potenciales para China reflejan resultados positivos con regiones extensas de permanencia y ganancia, un resultado similar a lo presentado por Mi *et al.* (2017) y Ruan *et al.* (2018) incluso este último estudio menciona un posible incremento en el rendimiento de los cultivos dentro de la región de Guangxi, misma que en los resultados concentra gran cantidad de áreas con condiciones potenciales. En Asia, Pakistán mantiene sus cultivos gracias a la irrigación (Tayyan 2015), las áreas con condiciones potenciales son omisas en el presente y a futuro se hacen evidentes como una continuación de la Planicie Indo-Gangética logrando presentar zonas de ganancia gracias al aumento de la precipitación.

La distribución potencial en el presente y futuro se ve reflejada principalmente en aquellos países que cuentan con las condiciones para el desarrollo óptimo de la caña de azúcar, la diferencia en cuanto de países reportados por FAOSAT (2017), puede catalogarse como aquellos que no presentan condiciones en el presente y

los que en un futuro posiblemente tengan oportunidades de establecer cultivos, por ejemplo en el lugar 23 a nivel mundial se encuentra Egipto, El-Kholi (2008) y Hamza (2017) reportan que el cultivo se ha llevado a cabo durante largo tiempo en el país pero a expensas del río Nilo, por lo tanto su establecimiento radica en mayor proporción por agentes antrópicos que por características climáticas como la precipitación. De manera similar las áreas de distribución (Figuras 12-16) para ningún modelo al presente y futuro se representan en países climáticamente diferentes a los preferentes por la especie entre los cuales podemos mencionar Afganistán, Irán, Iraq, Líbano, Marruecos, Níger, Omán, Samoa y Samoa Americana aun cuando se reportan como productores.

Por otro lado existen países principalmente insulares donde la distribución potencial a futuro se expresa en casi o todo su territorio, de los cuales se puede esperar que debido a los altos valores porcentuales de permanencia o ganancia se continúe con el cultivo a futuro, sin embargo para algunos de ellos como las Islas Mauricio se esperan respuestas negativas (Cheeroo-Nayamuth & Nayamuth 2001), para las islas del pacífico oriental como Fiji la preocupación por el cambio climático no solo radica en los cambios de precipitación y temperatura, sino también en la elevación del nivel del mar (Gawander 2007; IPCC 2014), este último evento llegaría afectar las islas Caribeñas (Reyer *et al.* 2017) que en su mayoría presentan áreas con condiciones futuras para la caña de azúcar.

Las áreas de ganancia son evidentes en los mapas y en los números (Cuadro 10); esta cantidad importante de kilómetros no representa la opción más viable para el cultivo de caña de azúcar a futuro, por ejemplo en Sudamérica se

concentra un continuo de áreas potenciales entre los países de Brasil, Colombia, Perú y Venezuela que coincide con la región de la Amazonía catalogada como zona importante de conservación biológica (FAO 2016). Además las áreas de ganancia no son equivalentes a las actuales, en el mejor de los casos solo representan espacios con condiciones climáticas similares a las actuales y el procesamiento para cultivar requiere del conocimiento de las múltiples variables como el tipo de suelo, las existencia de plagas, la viabilidad económica e industrial así como las diferentes factores sociales que permitan su establecimiento.

Esta necesidad de conocer e integrar este conjunto de variables como una respuesta a futuro es una de las limitantes del modelado de nicho ecológico, debido a que bajo este enfoque solo se toman en cuenta los efectos del cambio climático sobre aquellos lugares con información del cultivo, realizando un análisis del espacio ambiental y excluyendo otras variables importantes para la caña de azúcar. Sin embargo, los diferentes resultados expuestos, dan pauta para análisis más robustos o de integración con más variables que posiblemente puedan expresar posibles regiones adecuadas para los cultivos azucareros a futuro.

CONCLUSIONES

Los efectos del cambio climático a futuro en la distribución potencial de *Saccharum officinarum* a nivel mundial son positivos; ante los aumentos de la temperatura y la variabilidad de la precipitación las áreas con condiciones en el presente se conservan a futuro para las siguientes décadas en todo el mundo. La pérdida de áreas mayor puede ocurrir en el 2070 bajo el escenario RCP 2.6. Los principales países productores en el mundo mantendrán las áreas a futuro dando continuidad a los cultivos en el mismo espacio geográfico actual.

La expansión o movilidad de los cultivos azucareros a futuro hacia aquellas zonas en la categoría de ganancia, reitera que su establecimiento implica más variables de lo expuestos en este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Aitiken K & McNeil M. 2009. Diversity analysis. In Henry RJ, Kole C, eds. Genetics Genomics and Breeding of Sugarcane. USA New Hampshire: Science Publ. Enfield, 19-42.
- Amaya EA, Cock JH, Pilar HA, Irvine JE. 1994. Biología. En Cassalet DC, Torres AJU, Isaacs ECH eds. El cultivo de la caña de azúcar en la zona Azucarera de Colombia. Colombia: Cenicaña, 31-61.
- Ballesteros BC, Jiménez GD, Hernández CG. 2011. El impacto potencial del cambio climático sobre los agroecosistemas. El caso del cultivo del maíz, proyecciones a futuro. En: Aragón GA, Jiménez GD, Huerta LM, eds. Manejo Agroecológico de Sistemas. Vol. II. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México, 1-14.
- Beck J. 2013. Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? *Climate Change*. **116**: 177-189.
- Black E, Luigi VP, Verhoef A, Vianna CS, Osborne T, Van den HC. 2014. Cultivating C4 in changing climate: sugarcane in Ghana. *Environmental Research Letters*. **7**:1-10
- Bonnett GD. 2014. Developmental Stages (Phenology). In Moore PH, Botha FC, eds. Sugarcane Physiology Biochemistry & Functional Biology. New Delhi, India: Wiley Blackwell, 35-53.

- Carvalho AL, Cezar MRS, Silva NR, De Siqueira PA, Balbaud OJP, Von Randow C, Giarolla A. 2015. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable energy*. **78**: 26-34.
- Cavazos T, Salinas JA, Martínez B, Colorado G, De Grau P, Prieto G, Conde AC, Quintanar IA, Maya MM, Rosario de la CR, Ayala EM, Carrillo TH., Santiesteban, O, Bravo ME. 2013. Actualización de escenarios de Cambio Climático para México como parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final, SEMARNAT, INECC, CICESE, IMTA, UNAM. México, 150.
- Cerda LJ & Villarroel PL. 2008. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Bioestadística*. **79**: 54-58.
- Chavas DR, Izaurrealde RC, Thomson AM, Gao X. 2009. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*. **149**: 1118-1128.
- Cheeroo-Nayamuth FB & Nayamuth RAH. 2001. Climate change and sucrose production in Mauritius. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **24**:107-112.
- Chuvienco SE. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. Barcelona, España, 596.
- Donner LJ, Wyman BL, Hemier RS, Horowitz LW, Ming Y, Zhao M, Golaz J-C, Ginoux P, Lin SJ, Schwarzkopf MD, Austin J, Alaka G, Cooke WF, Delworth TL, Freidenreich SM, Gordon CT, Griffies SM, Held IM, Hurlin WJ, Klein SA,

- Klein SA, Knutson TR, Langenhorst AR, Lee H-C, Lin Y, Magi BI, Malyshev SL, Milly PCD, Naik V, Nath MJ, Pincus R, Ploshay JJ, Ramaswamy V, Seman CJ, Shevliakova, Sirutis JJ, Stern WF, Stouffer RJ, Wilson R J, Winton M, Wittenberg AT, Zeng F. 2011. The Dynamic Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GDFL Global Couple Model CM3. *Journal of Climate*. **24**: 3484-3519.
- Deressa T, Hassan R, Poonyth D. 2005. Measuring the impact of climate change on South African agriculture: the case of sugar-cane growing regions. *Agrekon*. **44**(4):524-542.
- Dos Santos DL & Sentelhas PC. 2012. Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of Sao Paulo, Brazil. *Revista Ambiente y Agua*. **7**(2):7-17.
- El-Kholi MMA. 2008. Sugar Crops Research Institute, giza (Egypt): A Profile. *Sugar Tech*. **10** (3): 189-196.
- Fahrasmane L & Ganou PB. 2005. De la caña al ron. España, Acribia, 110.
- FAO. 2016. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo? 2da edición. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia.
- FAOSTAT. 2017. Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>> (Fecha de Consulta 20 de abril de 2017).

- FIRA. 2010. Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 11:1-67.
- Gawander J. 2007. Las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de caña de azúcar en Fiji. *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial*. **56** (1): 34-34.
- Gesch DB & Larson KS. 1996. Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. pp 20-22. En: Pecora Thirteen, Human interactions with the Environment- Perspectives from Space, Sioux Falls, South Dakota.
- Guisan A & Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. **8**: 993-1009.
- Gupta R, Kumar R, Tripathi SK. 2004. Study on Agroclimatic Condition and Production Pattern of Sugarcane in India. *Sugar Tech*. **6**(3):141-149.
- Jintrawet A & Prammanee P. 2005. Simulating the Impact of climate change on sugarcane production systems in Thailand. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **25**: 64-68.
- Jones PG & Thornton PK. 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*. **13**: 51-59.
- Hamza M. 2017. Egypt's Government Increases the Supply Price for Sugar Cane and Beets Ceding to Farmers' Demands. Global Agricultural Information Network.

- Hatfield JL, Boote KL, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate Impacts on Agriculture Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*. **103** (2): 351-370.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. **25**:1965-1978.
- Humbert RP. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. México D.F. CECOSA.
- IPCC. 2013. Cambio Climático 2013 Bases Físicas. Grupo de Trabajo I contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suiza.
- IPCC. 2014. Cambio climático 2014: 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. Ginebra, Suiza, 157.
- Irvine JE. 2004. Caña de azúcar y azúcar. Chen JCP, ed. Manual del Azúcar de Caña. México D. F. Limusa; 27-37.
- Knox JW, Rodríguez DJA, Nixon DJ, Mkhwanazi M. 2010. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems*. **103** (2): 63-72.
- Körner C & Basler D. 2010. Phenology undel global warming. *Science*. **327**(5972): 1461-1462.

- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. 2006. World map of Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. **15**:259-263.
- Landis R & Koch GG. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*. **33**(1): 159-174.
- Lira R, Téllez O, Dávila P. 2009. The effect of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution*. **56**:691-703.
- Marin F R, Jones JW, Singels A, Royce F, Assad ED, Pellegrino GQ, Justino F. 2013. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climate Change*. **117**:227-239.
- Mi CR, Zu Q, He L, Huettmann F, Jin N, Li J. 2017. Climate change would enlarge suitable planting areas of sugarcane in China. *International Journal of Plant Production*. **11**(1): 151-166.
- Moriondo M, Giannakopoulos C, Bindi M. 2011. Climate change impacts assessment the role of climate extremes in crop yields simulation. *Climate Change*. **104**:674-701.
- Nayamuth AR. 2005. Climate change: impacts, Adaptation and implications for a sustainable sugarcane industry. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **25**: 69-77.
- Özdoğan M. 2011. Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **141**: 1-12.
- Park S, Howden M, Horan H. 2007. Evaluating the impact of and capacity for

- Adaptation to climate change on sectors in the sugar industry value chain in Australia. *Proc. ISSCT (International Society of Sugar Cane Technologist)*. **26**:312-326.
- Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. **37**:637-669.
- Parmesan C, Hanley ME. 2015. Plants and climate change: complexities and surprises. *Annals of Botany*. **116**: 849-864.
- Praveen D, Jaganathan R, RajaLakshmi D, Palanivelu K. 2017. Spatiotemporal analysis of projected impacts of climate change on the major C3 and C4 crop yield under representative concentration pathway 4.5: Insight from the coasts of Tamil Nadu, South India. *PLOS one*. **12**(7): 1-19.
- Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sánchez-Cordero V, Soberón J, Buddemeier RH, Stockwell DR. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. **416**: 626-629.
- Phillips SJ. 2006. Maxent software for species habitat modeling. Versión 3.3.3k. New Jersey.PrincetonUniversity.<<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>> (Fecha de consulta el 23 de abril de 2014).
- Reyer CPO, Adams S, Albrecht T, Baarsch F, Boit A, Canales TN, Carlsburg M, Coumou D, Eden A, Fernandes E, Langerwisch F, Marcus R, Mengel M, Mira-Salama D, Perette M, Pereznieto P, Ramming A, Reinhardt J, Robinson A, Rocha M, Sakschewski B, Shaeffer M, Schleussner CF, Serdczny O, Thonicke

- K. 2017. Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*. **17**: 1601-1621.
- Ruan H, Feng P, Wang B, Xing H, O'Leary GJ, Huang Z, Guo H, Li LD. 2018. Future climate change projects positive impacts on sugar productivity in southern China. *European Journal of Agronomy*. **96**: 108-119.
- Ruiz FS. 2000. El cultivo de la caña de azúcar. EUNED. Costa Rica. 448.
- Sexton JD, Everingham YL, Inman-Bamber NG, Stokes C. 2014. Climate change will impact the sugarcane industry in Australia. *Proceedings South Africa Sugar Technology Ass.* **87**: 298-302.
- Siikamáki J. 2008. Climate Change and U.S. Agriculture: Examining the Connections. *Environment*. **50**(4): 36-49
- Slingo JM, Challinor AJ, Hoskins BJ, Wheeler TR. 2005. Introductions: food crops in a changing climate. *Philosophical transactions of the Royal Society B*. **360**: 1983-1989.
- Singels A, Jones M, Marin F, Ruane A, Thorburn P. 2014. Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro Model. *Sugar Tech*. **16**(4):347-355.
- Smith P, Price J, Molotoks A, Warren R, Malhi Y. 2018. Impacts on terrestrial biodiversity of moving from a 2°C to 1.5°C target. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **376**: 20160456.
- Southworth J, Randolph JC, Habeck M, Doering OC, Pfeifer RA, Rao DG,

- Johnston JJ. 2000. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **82**: 139-158.
- Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna KK, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P. 2013: Resumen técnico. En Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds. Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. 33- 182.
- Tayyab SM. 2015. Sugarcane and Punjab, Pakistan: Production, Processing and Challenges. *Ethical-Sugar*, 18.
- Tubiello FN, Rosenzweig C, Goldberg RA, Jagtap S, Jones JW. 2002. Effects of Climate Change on US crop production: simulation results using different GCM scenarios. Part I: Wheat, potato, maize, and citrus. *Climate Research*. **20**:259-270.
- UNICA. 2018. Sugarcane Producing Regions in Brazil. Brazilian Sugarcane Industry Association (UNICA). <http://english.unica.com.br/production-map/> (Fecha de consulta 15 de marzo 2018).

- Ureta C, Martínez-Meyer E, Perales HR, Álvarez-Buylla ER. 2012. Projecting the effects of climate change on the distributions of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*. **18**: 1073-1082.
- Van Vuuren DP, Edmons J, Kainuma M, Riaji K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram, T, Krey, V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose SK. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*. **109**:5-31.
- Verma RR, Srivastava TK, Singh P. 2018. Climate change impacts on rainfall and temperature in sugarcane growing Upper Gangetic Plains of India. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Wayne GP. 2013. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. Skeptical Science. 24 p.
- Yang-Rui L, Li-Tao Y. 2015. Sugarcane Agriculture and Sugar Industry in China. *Sugar Tech*. **17**(1):1-8.
- Zinyengere N, Cresp O, Hachigota S. 2013. Crop response to climate change in southern Africa: A comprehensive review. *Global and Planetary Change*. **111**: 118-126.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados que se obtuvieron utilizando, el modelado de nicho ecológico, permitió conocer las áreas con condiciones favorables para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); en ambos capítulos de este trabajo con la conjunción entre variables ambientales y localidades de presencia de la especie, se generó un modelo mediante un algoritmo y la diferentes pruebas de transferencia en ventanas temporales y escenarios de cambio climático dieron como resultado una parte del nicho fundamental en el presente, reflejado en un espacio geográfico. A futuro aquellas vastas zonas de ganancia del cultivo de caña de hasta un 70% respecto a lo actual, pueden mostrarnos regiones del nicho fundamental que actualmente no se localizan en la geografía, pero que están presentes en el nicho ecológico de la especie. Bajo el concepto de las zonas accesibles o región M (Soberón & Peterson 2005), en el caso de los cultivos se le atribuye en cierta medida a la influencia del ser humano, y su establecimiento está directamente relacionado a las condiciones ambientales presentes en la geografía. En contraste con aquellas áreas de pérdida, donde las condiciones desaparecen a futuro, en términos teóricos una parte del nicho fundamental desaparece de la geografía.

Las áreas potenciales, tanto a nivel mundial como en México se ven favorecidas por el conjunto de áreas de permanencia bajo los diferentes escenarios. En particular para el capítulo 2 se muestra una conservación de áreas cercanas al 100%, este resultado se contrapone con lo señalado Deryng *et al.* (2014) quienes

argumentan decrementos en el rendimiento para cultivos de la zona intertropical bajo los escenarios RCP 2.6 y 4.5.

Uno de los puntos focales para entender la respuesta de los diferentes cultivos, es su biología y en particular su tipo de metabolismo. Los aumentos en la temperatura pueden generar efectos en el rendimiento a causa del aceleramiento o acortamiento de los ciclos, cambios en la tasa de fotosíntesis y respiración; el metabolismo de las plantas tipo C4 puede beneficiarse por un aumento en la temperatura, a diferencia de las C3, en donde la fotosíntesis decae con el aumento de temperatura (Wreford *et al*, 2010; Lobell & Gourdjji, 2012), Bajo esta premisa los cultivos azucareros se ven beneficiados al contar con metabolismo C4; sin embargo, este hecho puede comportarse de diferentes formas o por diferentes agentes como los óptimos en la temperatura o la relación de la distribución geográfica y los nutrientes en el suelo (Lobell & Gourdjji 2012).

Por otra parte, la permanencia en la distribución potencial a futuro es esencial para el seguimiento a largo plazo de los cultivos azucareros, evitando un desplazamiento de cultivos hacia zonas que posiblemente presenten condiciones futuras (como las áreas de ganancia) y reduciendo un posible costo económico para los productores. Además de las diferentes consideraciones a futuro como lo señala Reynolds & Ortiz (2010), como la implementación de programas sustentables, aumento en la investigación para conocer las características bajo las cuales se siembre, análisis de la respuesta adaptativa del cultivo, monitoreo de sus plagas.

En lo referente al capítulo 1 de este estudio la distribución potencial futura de las principales variedades de caña de azúcar cultivadas en México, puede promover diferentes análisis para su aprovechamiento a lo largo de un mayor tiempo, más allá del que ya han estado establecidas, con base en la presencia de las condiciones ambientales bajo las cuales se siembran actualmente y su permanencia a futuro o su posible recambio o adquisición de nuevos paquetes tecnológicos como lo han señalado Salgado *et al.* (2012)

En este mismo sentido, el conocimiento de los sitios bajo régimen de temporal en escenarios de cambio climático, en los términos más simples, señalados en los objetivos, ante el cambio en el clima, las regiones de temporal se ven beneficiadas por la conservación de las áreas con condiciones favorables por arriba del 70% incluso bajo el escenario más drástico (RCP 4.5). Esta información va de la mano con la selección de variedades adecuadas para las diferentes zonas, la producción de la caña de azúcar de secano se puede asegurar con mayor fiabilidad.

Dentro de los análisis para las variedades y zonas de temporal, el resultado de los modelos en la geografía son coincidentes en el estado de Tabasco y la Península de Yucatán como sitios con alto porcentaje en zonas con ganancia de áreas con condiciones favorables. Cabe mencionar que el estado de Yucatán anteriormente contaba con ingenios azucareros activos los cuales desaparecieron por causas económicas y el estado de Tabasco desarrollaba la actividad con un número mayor de ingenios (Reyes *et al.* 1988), la reactivación de estos sitios puede dar paso al equilibrio en la producción nacional por aquellas áreas con pérdida de condiciones favorables.

Bajo las diferentes posibilidades a desarrollar para las variedades y zonas de temporal, Bravo-Mosqueda *et al.* (2012) concuerdan con la respuesta positiva ante el cambio climático para los cultivos azucareros, pero enfatizan en la producción y menciona que el riego aminorará el impacto por el aumento de la temperatura.

Por último el conocimiento de los posibles efectos que puede generar el cambio climático en los diversos cultivos a nivel mundial y en México son una de las principales líneas de investigación en desarrollo en la actualidad, y dichos estudios permiten generar parte de la toma de decisiones para el manejo adecuado de los recursos a futuro y plantear acciones que conlleven a un uso sustentable entre los mismos y de los recursos naturales en su conjunto, no solo para México sino también para el Mundo.

LITERATURA CITADA

- Bravo-Mosqueda EG, Medina-García J, Ruíz-Corral JA, Báez-González A. D. V. Mariles-Flores. 2012. Cambio Climático y su Impacto Potencial en el Sistema Producto Caña de Azúcar en el Área de Abasto del Ingenio Adolfo López Mateos. INIFAP. Publicación Especial Núm. 11. Oaxaca, México.
- Deryng D, Conway D, Ramankutty N, Price J, Warren R. 2014. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*. **9**: 1-13.
- Lobell, D. and Gourdji S. M. 2012. The influence of Climate Change on Global Productivity. *Plant Physiology*. **160**: 1686-1697.
- Salgado GS, Lagunés ELC, Núñez ER, Ortiz GCF. y Aranda IEM. 2012. Caña de azúcar producción sustentable. Colegio de Postgraduados. México.
- Soberón J, Peterson T. 2005. Interpretation of Models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*. **2**:1-10.
- Reyes, R. S., Vega, V. E., Embriz, A., Zolla, C., González, H. C., Pinet, A., y Sharrer, B. 1988. Historia del Azúcar en México I., Fondo De Cultura Económica. México. 120.
- Reynolds MP, Ortiz R. 2010. Adapting Crops to climate change: a Summary. En: Climate Change and Crop Production. Reynolds MP ed. CAB International. 1-8.
- Wreford A, Moran D, Adger N. 2010. Climate change projections, En: Climate Change Agriculture: Impacts, Adaptation and Mitigation, OECD.

Anexo A

Cuadro 11. Área de distribución potencial en el presente y bajo escenarios de cambio climático. P=Pérdida, Pm=Permanencia, G=Ganancia. El área se representa en km².

	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
		P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Angola	29,482	7,271	24,507	15,441	9,896	14,882	12,817	7,868	19,266	14,844	6,666	29,998	16,047
Antigua y Barbuda	348	0	41	307	0	41	307	0	41	307	0	41	307
Argentina	198,234	12,371	55,071	182,723	44,830	49,379	150,264	3,263	110,531	191,831	15,179	64,168	179,915
Australia	390,230	18,298	135,124	329,874	5,859	153,051	342,313	25,878	155,302	322,294	28,945	184,146	319,227
Bahamas	8,185	0	920	7,462	0	1,018	7,462	0	803	7,462	0	881	7,462
Bangladesh	28,377	78	68,286	50,796	77	74,365	50,797	1,408	66,265	49,466	1,103	62,052	49,771
Barbados	417	0	0	417	0	0	417	0	0	417	0	0	417
Belice	22,072	0	61	22,011	0	61	22,011	0	61	22,011	0	61	22,011
Benín	34,852	7,168	31,181	30,589	4,953	30,667	32,804	4,974	27,680	32,783	548	39,331	37,209
Bermuda	0	0	0	0	0	18	0	0	18	0	0	0	0
Birmania	132,202	8,023	108,134	99,417	7,097	94,040	100,344	7,404	98,861	100,036	7,067	137,262	100,373
Bolivia	568,502	20,834	71,213	466,361	15,383	83,461	471,812	20,988	77,010	466,207	32,702	69,274	454,494
Brasil	3,033,915	305,719	2,817,859	2,804,168	453,424	3,131,923	2,656,463	434,749	3,036,673	2,675,138	324,465	3,546,577	2,785,423
Brunéi	3,526	684	64	3,098	320	214	3,462	150	1051	669	299	214	3,483
Burkina Faso	18,213	63	21,472	16,362	21	24,230	16,405	337	24,983	16,089	0	40,861	16,426
Burundi	3,230	1,605	4,749	2,823	2,225	4,022	2,203	1,797	5,178	2,632	1,626	4,450	2,802
Bután	880	153	1,108	688	134	1,032	708	172	1,051	669	172	1,318	669
Camboya	180,002	21	2,295	178,311	21	2,315	178,311	458	2,045	177,874	0	2,315	178,331
Camerún	322,177	20,356	48,692	282,438	23,289	53,301	279,504	17,742	50,047	285,052	16,534	41,209	286,260
Chad	319	977	0	254	977	994	0	977	212	0	977	275	0
China	226,458	3,829	206,704	192,934	6,164	136,548	190,599	5,133	113,037	191,631	5,422	107,336	191,341
Colombia	304,160	22,705	655,079	190,678	24,050	662,275	189,333	28,177	666,076	185,205	27,300	674,885	186,082
Comoras	1,133	440	105	1,070	0	105	1,070	0	105	1,070	0	105	1,070
Costa de Marfil	231,735	269	0	18	467	70,958	239,893	3,423	65,913	236,938	1,397	71,157	238,963
Costa Rica	22,758	1,077	69,303	239,284	3,803	5,868	30,134	2,238	7,790	31,699	2,894	8,085	31,044
Cuba	105,409	20	1,238	104,731	0	1,197	104,751	20	1,238	104,731	0	1,157	104,751
Dominica	682	83	21	661	0	21	661	0	21	661	0	21	661
Ecuador	56,530	7,217	47,359	55,483	6,918	55,950	55,782	8,395	54,710	54,306	6,403	67,161	56,297
El Salvador	18,345	83	645	19,031	1,082	437	18,033	1,914	416	17,201	562	499	18,553
E. F. de Micronesia	42	0	21	42	0	21	42	0	21	42	0	192	42
Estados Unidos	222,261	0	207,363	196,292	0	207,222	196,292	0	246,278	196,292	56	214,699	196,236
Etiopía	3,113	21	145,694	2,793	0	194,998	2,814	490	43,729	2,324	192	107,998	2,622
Fiyi	14,440	41	103	14,419	41	82	14,419	41	82	14,419	20	164	14,440
Filipinas	194,598	20,028	24,902	188,817	20,826	28,487	188,019	8,866	37,005	199,980	12,984	39,357	195,862
Gabón	169,551	14,226	14,654	179,218	16,433	16,582	177,010	11,848	21,811	181,596	7,412	31,195	186,032

Continúa cuadro 11.

	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
		P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Gambia	146	83	355	772	0	667	855	0	480	855	21	313	835
Ghana	179,270	1,688	46,516	180,567	381	54,525	181,873	85	54,124	182,170	0	55,242	182,255
Granada	293	0	0	293	0	0	293	0	0	293	0	0	293
Guam	500	0	21	479	0	21	479	0	21	479	0	21	479
Guatemala	75,125	1,199	9,960	76,715	4,106	8,528	73,808	2,859	8,572	75,055	1,883	8,199	76,031
Guinea	34,882	2,904	57,692	18,284	507	73,072	20,681	2,337	51,166	18,851	1,096	63,811	20,092
Guinea Ecuatorial	25,798	471	86	25,456	342	86	25,584	214	86	25,712	257	86	25,670
Guinea-Bisáu	1,050	840	3,838	1,533	840	10,949	1,533	987	2,477	1,386	714	7,093	1,659
Guyana	177,510	8,446	52,728	143,455	7,805	53,903	144,096	8,956	54,890	142,944	7,374	56,239	144,527
Guyana Francesa	33,606	3,702	38,003	28,656	2,590	36,266	29,768	42	45,581	32,315	21	49,453	32,337
Haití	22,176	812	872	22,257	325	853	22,744	508	892	22,560	446	751	22,622
Hawái	4,486	20	4,768	4,651	20	5,373	4,651	80	3,517	4,590	40	5,355	4,631
Honduras	103,983	558	8,280	101,708	518	8,091	101,748	1,718	7,490	100,547	1,637	7,802	100,629
India	398,745	19,906	340,077	308,324	13,929	349,167	314,302	30,523	365,377	297,706	25,308	427,539	302,922
Indonesia	725,807	56,057	584,835	777,450	37,378	615,162	796,129	66,632	576,589	766,874	55,698	645,575	777,809
Isla San Martín	41	0	0	41	0	0	41	0	0	40	0	0	41
Islas Caimán	222	0	40	182	0	40	182	0	40	182	0	40	182
Islas Cook	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Islas Marianas del Norte	166	0	41	166	0	41	166	0	41	166	0	41	166
Islas Salomón	10,121	1,757	4,460	12,603	1,757	5,309	12,604	1,777	5,265	12,583	719	7,398	13,641
Islas Vírgenes Británicas	41	0	0	41	0	0	41	0	0	41	0	0	41
Islas Vírgenes de los Estados Unidos	286	0	20	265	0	20	265	0	20	265	0	20	265
Jamaica	10,611	0	122	10,488	0	122	10,488	0	122	10,488	0	122	10,488
Japón	5,263	2,082	5,230	7,088	1,556	8,689	7,614	4,595	3,345	4,574	1,432	8,545	7,738
Kenia	11,691	150	11,886	6,935	86	28,804	7,000	686	28,132	6,400	965	45,242	6,121
Laos	140,138	7,447	63,855	99,896	20,810	52,806	86,534	1,453	79,579	105,891	6,529	59,803	100,814
Liberia	20,145	490	21,856	30,354	341	25,778	30,503	85	35,336	30,759	0	43,893	30,844
Madagascar	235,642	13,236	43,138	245,912	13,626	51,789	245,523	10,270	53,396	248,879	12,886	57,451	246,262
Malasia	75,786	15,734	67,249	114,118	17,464	62,592	112,388	13,383	68,668	116,469	10,967	90,260	118,885
Malawi	30,973	496	17,859	22,258	352	18,002	22,402	1,757	13,599	20,996	497	22,015	22,256
Mali	253	0	0	253	0	11,484	253	42	5,141	211	105	15,742	148
Mauricio	1,408	0	40	1,367	0	40	1,367	0	40	1,367	0	40	1,367
Mayotte	0	0	0	0	0	0	230	0	0	230	0	0	230
México	354,568	17,525	37,227	343,555	21,869	32,409	339,211	16,539	34,892	344,541	17,912	38,193	343,168
Montserrat	62	0	0	62	0	0	62	0	0	62	0	0	62
Mozambique	264,950	34,604	97,840	213,414	28,709	93,506	219,309	32,932	88,106	215,085	26,701	137,276	221,316
Nepal	6,517	550	15,980	6,470	457	17,382	6,563	1,764	10,488	5,257	1,022	13,915	5,998
Nicaragua	123,600	757	2,322	123,955	421	2,722	124,292	84	3,121	124,629	147	3,332	124,566
Nigeria	352,466	70,783	94,281	257,523	26,786	127,445	301,520	41,705	123,478	286,601	7,704	167,020	320,602

Continúa cuadro 11.

	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
		P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Nueva Caledonia	16,239	0	0	16,239	0	0	16,239	0	0	16,239	0	0	16,239
Nueva Zelanda	2,057	14,339	0	17	3,954	1,971	10,402	4,448	2,325	9,907	0	0	1,297
Países Bajos	41	0	0	41	0	0	41	0	0	41	0	0	41
Pakistán	0	0	686	0	0	1,714	0	0	2,541	0	0	1,297	0
Palaos	361	0	21	383	0	21	383	0	21	383	0	21	383
Panamá	49,717	2,310	13,238	49,375	1,928	13,004	49,757	2,269	12,643	49,417	1,887	14,193	49,799
Papúa Nueva Guinea	195,728	22,300	51,234	185,915	29,512	57,547	178,702	15,766	68,859	192,448	17,419	72,326	190,795
Paraguay	207,163	8,895	12,876	175,956	135	17,566	184,716	804	19,626	184,047	7,842	10,317	177,009
Perú	202,944	14,785	443,055	193,636	12,806	450,918	195,615	12,766	452,026	195,654	12,005	457,039	196,415
Polinesia Francesa	1,349	0	20	1,329	0	20	1,329	0	20	1,329	0	20	1,329
Puerto Rico	8,225	0	61	8,225	0	61	8,225	0	61	8,225	0	61	8,225
Rep. Centroafricana	146,187	5,571	207,746	119,732	6,682	202,378	118,620	5,953	232,972	119,349	6,040	223,320	119,262
Rep. de Congo	263,008	6,998	60,160	223,532	8,027	61,251	222,504	6,849	64,674	223,682	3,596	71,478	226,934
Rep. de Corea	0	0	0	0	269	0	18	286	0	0	0	286	0
Rep. Democrática de Congo	1,007,109	117,070	535,439	662,457	137,142	599,097	642,385	117,855	644,270	661,672	141,215	772,520	638,311
Rep. Dominicana	2,457	1,604	2,492	33,857	833	2,574	34,628	1,117	3,242	34,344	1,502	2,209	33,958
Reunión	1,920	20	320	1,640	40	320	1,620	40	320	1,620	40	340	1,620
Ruanda	321	771	2,185	1,050	900	1,864	921	386	4,798	1,435	171	5,291	1,650
San Bartolomé	41	0	41	0	0	41	0	0	41	0	0	41	0
San Cristóbal y Nieves	225	0	0	225	0	0	225	0	225	0	0	0	225
San Vicente y las Granadinas	376	0	0	376	0	0	376	0	0	376	0	0	376
Santa Lucía	562	0	0	562	0	0	562	0	0	562	0	0	562
Santo Tomé y Príncipe	900	0	0	900	0	0	900	0	0	900	0	0	900
Senegal	940	21	2,781	1,880	0	1,631	1,901	0	2,069	1,901	0	2,111	1,901
Seychelles	63	0	21	42	0	21	42	0	21	42	0	21	42
Sierra Leone	13,429	615	39,158	9,128	276	41,841	9,467	148	40,151	9,594	530	46,472	9,213
Singapur	0	0	0	0	0	150	236	0	129	236	0	279	236
Sri Lanka	57,928	1,021	10,029	52,130	596	10,710	52,556	638	10,795	52,514	2,170	10,178	50,982
Suazilandia	962	1,290	19	385	1,097	19	577	905	77	770	982	96	693
Sudáfrica	20,743	6,156	826	17,578	7,771	133	15,963	12,944	131	10,790	7,502	498	16,232
Sudán	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0
Sudán del Sur	38,429	7,034	170,107	30,530	4,972	170,865	32,592	2,871	201,590	34,693	149	269,387	37,415
Surinam	112,290	1,305	52,494	88,889	3,468	40,635	86,727	878	54,528	89,316	471	55,320	89,723
Tailandia	376,198	2,443	138,049	313,159	606	137,761	314,996	4,303	123,226	311,299	578	144,748	315,023
Taiwán	22,851	312	4,099	20,693	215	4,727	20,790	254	4,279	20,751	430	3,746	20,575

Continúa cuadro 11.

	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
		P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Tanzania	216,738	3,376	179,202	138,242	3,051	198,772	138,566	3,573	206,831	138,045	3,267	266,679	138,351
Territorio Británico del Océano Índico	63	0	42	42	0	42	42	0	42	42	0	42	42
Timor Oriental	13,706	0	381	13,431	0	339	13,431	0	424	13,431	0	487	13,431
Togo	29,811	1,038	15,562	32,464	212	18,162	33,290	424	18,391	33,078	0	22,895	33,502
Trinidad y Tobago	4,785	0	147	4,637	0	0	900	0	147	4,637	0	147	4,637
Uganda	81,773	129	141,416	45,163	514	134,026	44,777	364	135,802	44,927	1,093	153,357	44,198
Uruguay	25,430	36	58,026	27,385	753	141,233	26,668	0	96,435	27,420	90	94,483	27,331
Vanuatu	8,543	62	125	8,439	21	166	8,480	21	208	8,480	62	145	8,439
Venezuela	427,457	20,415	323,724	378,142	32,727	318,620	365,830	32,905	328,814	365,652	19,997	364,091	378,560
Vietnam	260,253	9,756	20,186	245,470	18,083	15,804	237,143	4,660	25,612	250,565	7,270	20,117	247,955
Zambia	1,900	0	11,348	0	0	0	16,092	0	8,714	0	0	15,735	0
Zimbabue	3,173	1,433	813	1,840	766	1,340	2,507	1,070	1,279	2,203	1,191	1,300	2,082

Cuadro 12 Porcentajes por país de distribución potencial en el presente y bajo escenarios de cambio climático. P=Pérdida, Pm=Permanencia, G=Ganancia.

País	Superficie	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
			P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Angola	1,246,700	2.4	1.2	0.6	2.0	0.8	1.0	1.2	0.6	1.2	1.5	0.5	1.3	2.4
Antigua y Barbuda	440	79.1	69.8	0.0	9.3	0.0	69.8	9.3	0.0	69.8	9.3	0.0	69.8	9.3
Argentina	2,780,400	7.1	6.6	0.4	2.0	1.6	5.4	1.8	0.1	6.9	4.0	0.5	6.5	2.3
Australia	7,741,220	5.0	4.3	0.2	1.7	0.1	4.4	2.0	0.3	4.2	2.0	0.4	4.1	2.4
Bahamas	13,880	59.0	53.8	0.0	6.6	0.0	53.8	7.3	0.0	53.8	5.8	0.0	53.8	6.3
Bangladesh	147,630	19.2	34.4	0.1	46.3	0.1	34.4	50.4	1.0	33.5	44.9	0.7	33.7	42.0
Barbados	430	97.0	97.0	0.0	0.0	0.0	97.0	0.0	0.0	97.0	0.0	0.0	97.0	0.0
Belice	22,970	96.1	95.8	0.0	0.3	0.0	95.8	0.3	0.0	95.8	0.3	0.0	95.8	0.3
Benín	114,760	30.4	26.7	6.2	27.2	4.3	28.6	26.7	4.3	28.6	24.1	0.5	32.4	34.3
Bermuda	50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.2	0.0	0.0	36.2	0.0	0.0	0.0
Birmania	676,590	19.5	14.7	1.2	16.0	1.0	14.8	13.9	1.1	14.8	14.6	1.0	14.8	20.3
Bolivia	1,098,580	51.7	42.5	1.9	6.5	1.4	42.9	7.6	1.9	42.4	7.0	3.0	41.4	6.3
Brasil	8,515,770	35.6	32.9	3.6	33.1	5.3	31.2	36.8	5.1	31.4	35.7	3.8	32.7	41.6
Brunéi	5,770	61.1	53.7	11.9	1.1	5.6	60.0	3.7	2.6	63.0	2.2	5.2	60.4	3.7
Burkina Faso	274,220	6.6	6.0	0.0	7.8	0.0	6.0	8.8	0.1	5.9	9.1	0.0	6.0	14.9
Burundi	27,830	11.6	10.1	5.8	17.1	8.0	7.9	14.5	6.5	9.5	18.6	5.8	10.1	16.0
Bután	38,394	2.3	1.8	0.4	2.9	0.3	1.8	2.7	0.4	1.7	2.7	0.4	1.7	3.4
Camboya	181,040	99.4	98.5	0.0	1.3	0.0	98.5	1.3	0.3	98.3	1.1	0.0	98.5	1.3
Camerún	475,440	67.8	59.4	4.3	10.2	4.9	58.8	11.2	3.7	60.0	10.5	3.5	60.2	8.7
Chad	1,284,000	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
China	9,562,911	2.4	2.0	0.0	2.2	0.1	2.0	1.4	0.1	2.0	1.2	0.1	2.0	1.1
Colombia	1,141,749	26.6	16.7	2.0	57.4	2.1	16.6	58.0	2.5	16.2	58.3	2.4	16.3	59.1
Comoras	1,861	60.9	57.5	23.7	5.6	0.0	57.5	5.6	0.0	57.5	5.6	0.0	57.5	5.6
Costa de Marfil	322,460	71.9	0.0	0.1	0.0	0.1	74.4	22.0	1.1	73.5	20.4	0.4	74.1	22.1
Costa Rica	51,100	44.5	56.6	10.0	8.0	7.4	59.0	11.5	4.4	62.0	15.2	5.7	60.8	15.8
Cuba	109,880	95.9	95.3	0.0	1.1	0.0	95.3	1.1	0.0	95.3	1.1	0.0	95.3	1.1
Dominica	750	90.9	88.2	11.0	2.8	0.0	88.2	2.8	0.0	88.2	2.8	0.0	88.2	2.8
E. F. de Micronesia	700	6.0	6.0	0.0	3.0	0.0	6.0	3.0	0.0	6.0	3.0	0.0	6.0	27.4
Ecuador	256,370	22.1	21.6	2.8	18.5	2.7	21.8	21.8	3.3	21.2	21.3	2.5	22.0	26.2
El Salvador	21,040	87.2	90.5	0.4	3.1	5.1	85.7	2.1	9.1	81.8	2.0	2.7	88.2	2.4
Estados Unidos	9,831,510	2.3	2.0	0.0	2.1	0.0	2.0	2.1	0.0	2.0	2.5	0.0	2.0	2.2

Continúa cuadro 12.

País	Superficie	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
			P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Etiopía	1,104,300	0.3	0.3	0.0	13.2	0.0	0.3	17.7	0.0	0.2	4.0	0.0	0.2	9.8
Filipinas	300,000	64.9	62.9	6.7	8.3	6.9	62.7	9.5	3.0	66.7	12.3	4.3	65.3	13.1
Fiyi	18,270	79.0	78.9	0.2	0.6	0.2	78.9	0.5	0.2	78.9	0.5	0.1	79.0	0.9
Gabón	267,670	63.3	67.0	5.3	5.5	6.1	66.1	6.2	4.4	67.8	8.1	2.8	69.5	11.7
Gambia	11,300	1.3	6.8	0.7	3.1	0.0	7.6	5.9	0.0	7.6	4.2	0.2	7.4	2.8
Ghana	238,540	75.2	75.7	0.7	19.5	0.2	76.2	22.9	0.0	76.4	22.7	0.0	76.4	23.2
Granada	340	86.3	86.3	0.0	0.0	0.0	86.3	0.0	0.0	86.3	0.0	0.0	86.3	0.0
Guam	540	92.7	88.8	0.0	3.9	0.0	88.8	3.9	0.0	88.8	3.9	0.0	88.8	3.9
Guatemala	108,890	69.0	70.5	1.1	9.1	3.8	67.8	7.8	2.6	68.9	7.9	1.7	69.8	7.5
Guinea	245,860	14.2	7.4	1.2	23.5	0.2	8.4	29.7	1.0	7.7	20.8	0.4	8.2	26.0
Guinea Ecuatorial	28,050	92.0	90.8	1.7	0.3	1.2	91.2	0.3	0.8	91.7	0.3	0.9	91.5	0.3
Guinea-Bisáu	36,130	2.9	4.2	2.3	10.6	2.3	4.2	30.3	2.7	3.8	6.9	2.0	4.6	19.6
Guyana	214,970	82.6	66.7	3.9	24.5	3.6	67.0	25.1	4.2	66.5	25.5	3.4	67.2	26.2
Guyana Francesa	91,312	36.8	31.4	4.1	41.6	2.8	32.6	39.7	0.0	35.4	49.9	0.0	35.4	54.2
Haití	27,750	79.9	80.2	2.9	3.1	1.2	82.0	3.1	1.8	81.3	3.2	1.6	81.5	2.7
Hawái	28,311	15.8	16.4	0.1	16.8	0.1	16.4	19.0	0.3	16.2	12.4	0.1	16.4	18.9
Honduras	112,490	92.4	90.4	0.5	7.4	0.5	90.5	7.2	1.5	89.4	6.7	1.5	89.5	6.9
India	3,287,259	12.1	9.4	0.6	10.3	0.4	9.6	10.6	0.9	9.1	11.1	0.8	9.2	13.0
Indonesia	1,910,931	38.0	40.7	2.9	30.6	2.0	41.7	32.2	3.5	40.1	30.2	2.9	40.7	33.8
Isla San Martín	111	36.7	36.7	0.0	0.0	0.0	36.7	0.0	0.0	36.7	0.0	0.0	36.7	0.0
Islas Caimán	264	84.2	68.9	0.0	15.3	0.0	68.9	15.3	0.0	68.9	15.3	0.0	68.9	15.3
Islas Cook	236	42.3	42.3	0.0	0.0	0.0	42.3	0.0	0.0	42.3	0.0	0.0	42.3	0.0
Islas Marianas del Norte	464	35.7	35.7	0.0	8.9	0.0	35.7	8.9	0.0	35.7	8.9	0.0	35.7	8.9
Islas Salomón	28,900	35.0	43.6	6.1	15.4	6.1	43.6	18.4	6.2	43.5	18.2	2.5	47.2	25.6
Islas Vírgenes Británicas	150	27.1	27.1	0.0	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0	27.1	0.0

Continúa cuadro 12.

País	Superficie	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
			P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Islas Vírgenes de los Estados Unidos	350	81.6	75.8	0.0	5.8	0.0	75.8	5.8	0.0	75.8	5.8	0.0	75.8	5.8
Jamaica	10,990	96.5	95.4	0.0	1.1	0.0	95.4	1.1	0.0	95.4	1.1	0.0	95.4	1.1
Japón	377,962	1.4	1.9	0.6	1.4	0.4	2.0	2.3	1.2	1.2	0.9	0.4	2.0	2.3
Kenia	580,370	2.0	1.2	0.0	2.0	0.0	1.2	5.0	0.1	1.1	4.8	0.2	1.1	7.8
Laos	236,800	59.2	42.2	3.1	27.0	8.8	36.5	22.3	0.6	44.7	33.6	2.8	42.6	25.3
Liberia	111,370	18.1	27.3	0.4	19.6	0.3	27.4	23.1	0.1	27.6	31.7	0.0	27.7	39.4
Madagascar	587,295	40.1	41.9	2.3	7.3	2.3	41.8	8.8	1.7	42.4	9.1	2.2	41.9	9.8
Malasia	330,800	22.9	34.5	4.8	20.3	5.3	34.0	18.9	4.0	35.2	20.8	3.3	35.9	27.3
Malawi	118,480	26.1	18.8	0.4	15.1	0.3	18.9	15.2	1.5	17.7	11.5	0.4	18.8	18.6
Mali	1,240,190	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.3
Mauricio	2,040	69.0	67.0	0.0	2.0	0.0	67.0	2.0	0.0	67.0	2.0	0.0	67.0	2.0
Mayotte	376	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.2	0.0	0.0	61.2	0.0	0.0	61.2	0.0
México	1,964,380	18.0	17.5	0.9	1.9	1.1	17.3	1.6	0.8	17.5	1.8	0.9	17.5	1.9
Montserrat	102	60.4	60.4	0.0	0.0	0.0	60.4	0.0	0.0	60.4	0.0	0.0	60.4	0.0
Mozambique	799,380	33.1	26.7	4.3	12.2	3.6	27.4	11.7	4.1	26.9	11.0	3.3	27.7	17.2
Nepal	147,180	4.4	4.4	0.4	10.9	0.3	4.5	11.8	1.2	3.6	7.1	0.7	4.1	9.5
Nicaragua	130,370	94.8	95.1	0.6	1.8	0.3	95.3	2.1	0.1	95.6	2.4	0.1	95.5	2.6
Nigeria	923,770	38.2	27.9	7.7	10.2	2.9	32.6	13.8	4.5	31.0	13.4	0.8	34.7	18.1
Nueva Caledonia	18,580	87.4	87.4	0.0	0.0	0.0	87.4	0.0	0.0	87.4	0.0	0.0	87.4	0.0
Nueva Zelanda	267,710	0.8	0.0	5.4	0.0	1.5	3.9	0.7	1.7	3.7	0.9	0.0	0.5	0.0
Países Bajos	41,540	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
Pakistán	796,100	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2
Palaos	460	78.5	83.2	0.0	4.6	0.0	83.2	4.6	0.0	83.2	4.6	0.0	83.2	4.6
Panamá	75,420	65.9	65.5	3.1	17.6	2.6	66.0	17.2	3.0	65.5	16.8	2.5	66.0	18.8
Papúa Nueva Guinea	462,840	42.3	40.2	4.8	11.1	6.4	38.6	12.4	3.4	41.6	14.9	3.8	41.2	15.6
Paraguay	406,752	50.9	43.3	2.2	3.2	0.0	45.4	4.3	0.2	45.2	4.8	1.9	43.5	2.5
Perú	1,285,220	15.8	15.1	1.2	34.5	1.0	15.2	35.1	1.0	15.2	35.2	0.9	15.3	35.6
Polinesia Francesa	4,000	33.7	33.2	0.0	0.5	0.0	33.2	0.5	0.0	33.2	0.5	0.0	33.2	0.5
Puerto Rico	8,870	92.7	92.7	0.0	0.7	0.0	92.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	92.7	0.7
Rep. Centroafricana	622,980	23.5	19.2	0.9	33.3	1.1	19.0	32.5	1.0	19.2	37.4	1.0	19.1	35.8

Continúa cuadro 12

País	Superficie	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
			P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
República de Congo	342,000	76.9	65.4	2.0	17.6	2.3	65.1	17.9	2.0	65.4	18.9	1.1	66.4	20.9
Rep. de Corea	100,280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Rep. Democrática de Congo	2,344,860	42.9	28.3	5.0	22.8	5.8	27.4	25.5	5.0	28.2	27.5	6.0	27.2	32.9
Re. Dominicana	48,670	5.0	69.6	3.3	5.1	1.7	71.1	5.3	2.3	70.6	6.7	3.1	69.8	4.5
Reunión	2,512	76.4	65.3	0.8	12.7	1.6	64.5	12.7	1.6	64.5	12.7	1.6	64.5	13.5
Ruanda	26,340	1.2	4.0	2.9	8.3	3.4	3.5	7.1	1.5	5.4	18.2	0.7	6.3	20.1
San Bartolomé	41	100.0	0.0	0.0	99.5	0.0	0.0	99.5	0.0	0.0	99.5	0.0	0.0	99.5
San Cristóbal y Nieves	260	86.6	86.6	0.0	0.0	0.0	86.6	0.0	0.0	0.0	86.6	0.0	86.6	0.0
San Vicente y las Granadinas	390	96.3	96.3	0.0	0.0	0.0	96.3	0.0	0.0	96.3	0.0	0.0	96.3	0.0
Santa Lucía	620	90.6	90.6	0.0	0.0	0.0	90.6	0.0	0.0	90.6	0.0	0.0	90.6	0.0
Santo Tomé y Príncipe	960	93.8	93.8	0.0	0.0	0.0	93.8	0.0	0.0	93.8	0.0	0.0	93.8	0.0
Senegal	196,710	0.5	1.0	0.0	1.4	0.0	1.0	0.8	0.0	1.0	1.1	0.0	1.0	1.1
Seychelles	460	13.8	9.2	0.0	4.6	0.0	9.2	4.6	0.0	9.2	4.6	0.0	9.2	4.6
Sierra Leone	72,300	18.6	12.6	0.9	54.2	0.4	13.1	57.9	0.2	13.3	55.5	0.7	12.7	64.3
Singapur	719	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.8	20.9	0.0	32.8	17.9	0.0	32.8	38.7
Sri Lanka	65,610	88.3	79.5	1.6	15.3	0.9	80.1	16.3	1.0	80.0	16.5	3.3	77.7	15.5
Suazilandia	17,360	5.5	2.2	7.4	0.1	6.3	3.3	0.1	5.2	4.4	0.4	5.7	4.0	0.6
Sudáfrica	1,219,090	1.7	1.4	0.5	0.1	0.6	1.3	0.0	1.1	0.9	0.0	0.6	1.3	0.0
Sudán	1,879,358	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sudán del Sur	644,330	6.0	4.7	1.1	26.4	0.8	5.1	26.5	0.4	5.4	31.3	0.0	5.8	41.8
Surinam	163,820	68.5	54.3	0.8	32.0	2.1	52.9	24.8	0.5	54.5	33.3	0.3	54.8	33.8
Tailandia	513,120	73.3	61.0	0.5	26.9	0.1	61.4	26.8	0.8	60.7	24.0	0.1	61.4	28.2
Taiwán	35,980	63.5	57.5	0.9	11.4	0.6	57.8	13.1	0.7	57.7	11.9	1.2	57.2	10.4
Tanzania	947,300	22.9	14.6	0.4	18.9	0.3	14.6	21.0	0.4	14.6	21.8	0.3	14.6	28.2
Territorio Británico del Océano Índico	63	100.4	66.9	0.0	66.9	0.0	66.9	66.9	0.0	66.9	66.9	0.0	66.9	66.9
Timor Oriental	14,870	92.2	90.3	0.0	2.6	0.0	90.3	2.3	0.0	90.3	2.9	0.0	90.3	3.3

Continúa cuadro 12.

País	Superficie	Presente	RCP 2.6 2050			RCP 2.6 2070			RCP 4.5 2050			RCP 4.5 2070		
			P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G	P	Pm	G
Togo	56,790	52.5	57.2	1.8	27.4	0.4	58.6	32.0	0.7	58.2	32.4	0.0	59.0	40.3
Trinidad y Tobago	5,130	93.3	90.4	0.0	2.9	0.0	17.5	0.0	0.0	90.4	2.9	0.0	90.4	2.9
Uganda	241,550	33.9	18.7	0.1	58.5	0.2	18.5	55.5	0.2	18.6	56.2	0.5	18.3	63.5
Uruguay	176,220	14.4	15.5	0.0	32.9	0.4	15.1	80.1	0.0	15.6	54.7	0.1	15.5	53.6
Vanuatu	12,190	70.1	69.2	0.5	1.0	0.2	69.6	1.4	0.2	69.6	1.7	0.5	69.2	1.2
Venezuela	912,050	46.9	41.5	2.2	35.5	3.6	40.1	34.9	3.6	40.1	36.1	2.2	41.5	39.9
Vietnam	330,967	78.6	74.2	2.9	6.1	5.5	71.7	4.8	1.4	75.7	7.7	2.2	74.9	6.1
Zambia	752,610	0.3	0.0	0.0	1.5	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	2.1



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO


No. 00177

Matrícula: 2143800795

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.) EN MÉXICO Y EL MUNDO.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 12 del mes de diciembre del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. JESUS DANIEL GRANDE CANO
M. EN C. ANGELICA MARTINEZ BERNAL
DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ MENDIETA
DRA. MARIA DEL ROCIO ZARATE HERNANDEZ




PEDRO SANTIAGO RAMIREZ BARRIOS
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

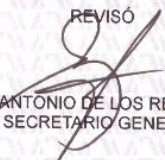
MAESTRO EN BIOLOGIA

DE: PEDRO SANTIAGO RAMIREZ BARRIOS

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

REVISÓ



DR. JOSE ANTONIO DE LOS REYES HEREDIA
SECRETARIO GENERAL

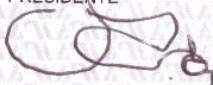
Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTORA DE LA DIVISION DE CBS



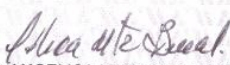
DRA. SARA LUCIA CAMARGO RICALDE

PRESIDENTE



DR. JESUS DANIEL GRANDE CANO

VOCAL



M. EN C. ANGELICA MARTINEZ BERNAL

VOCAL



DR. FRANCISCO JOSE GUTIERREZ MENDIETA

SECRETARIA



DRA. MARIA DEL ROCIO ZARATE HERNANDEZ