

# Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México

## Impact of climate change on potential evapotranspiration and growing season in Mexico

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas<sup>1‡</sup>  y Jesús David Gómez-Díaz<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor para correspondencia (aimrivas@correo.chapingo.mx)

---

### RESUMEN

La evapotranspiración potencial (ETP), así como la duración del periodo de crecimiento (PECRE), son indicadores esenciales de planificación agrícola. Las agendas nacionales y locales deben considerar los escenarios del cambio climático y su impacto en evapotranspiración. El presente trabajo tuvo como objetivo analizar la distribución espacial de la ETP, el periodo de crecimiento en las condiciones climáticas actuales en todo el país y en escenarios de cambio climático, para contar con elementos técnicos suficientes que permitan recomendar acciones de adaptación para la producción agrícola nacional. La ETP mensual se estimó a partir de la ETP de referencia ( $ET_0$ ) por el método de Penman-Monteith. Con este parámetro y la precipitación (P) media mensual se evaluó la fecha de inicio, fin y duración del periodo de crecimiento. Se estudiaron 28 escenarios de cambio climático para definir la alteración de la ETP y su efecto en los PECRE de las zonas agrícolas del país. Se espera que la ETP aumente prácticamente en todo el territorio nacional como consecuencia del incremento generalizado de la temperatura y la disminución de la humedad relativa. Las clases de ETP menores de 1000 mm anuales disminuirán, mientras que las mayores a 1000 mm aumentarán en promedio 20% en el horizonte medio (2040-2069) y casi 50% hacia el horizonte lejano (2070-2099). Al considerar el cambio climático en el PECRE por estado, se observó que en tres de ellos (Baja California Sur, Coahuila y San Luis Potosí) no

habría cambio respecto a las condiciones actuales. En el resto de los estados se reducirá el PECRE debido a una combinación de cambio en el inicio y el final del periodo de crecimiento. Los estudios cartográficos permiten realizar el análisis espacial de los resultados, mismos que deben integrarse en la planificación del uso agrícola del agua. Paralelamente hacen posible avanzar en el diseño de medidas de adaptación al cambio climático con un sólido fundamento técnico.

**Palabras clave:** adaptación, necesidades hídricas, planeación agrícola, vulnerabilidad.

### SUMMARY

Potential evapotranspiration (PET) and length of growth period (LGP) are essential indicators of agricultural planning. National and local agendas should consider climate change scenarios and its impact on evapotranspiration. Therefore, the objective of this study was to analyze spatial distribution of PET and LGP in current climate conditions throughout the country, and under a climate change scenario to have sufficient technical elements for recommending adaptation actions for agricultural national production. The monthly PET was estimated from the reference PET ( $ET_0$ ) by the Penman-Monteith method using parameter and monthly average rainfall (R), start and end date, and length of growing period were evaluated. Once this was done, 28 climate change scenarios were studied to define the alteration of PET and its effect

---

#### Cita recomendada:

Monterroso-Rivas, A. I. y Gómez-Díaz, J. D. 2021. Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana* 39: 1-19. e774. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>

Recibido: 05 de abril de 2020. Aceptado: 08 de agosto de 2020.  
Artículo. Volumen 39, enero de 2021.

on LGP in the agricultural areas of the country. PET is expected to increase practically throughout the national territory as a consequence of the general increase in temperature and the decrease in relative humidity. PET classes smaller than 1000 mm per year may decrease, while those greater than 1000 mm may increase on average 20% around the years 2040-2069, and almost 50% towards 2070-2099. When climate change in LGP was considered for each state, three of them (Baja California Sur, Coahuila, and San Luis Potosí) were considered to experience no change concerning current conditions. In the rest of states, the LGP may decrease due to a combination of changes at the beginning and end of the growing period. Cartographic studies allow spatial analysis of the results, which should be integrated into the planning of agricultural water use. At the same time, they make it possible to advance in the design of measures to adapt for climate change with a solid technical support.

**Index words:** *adaptation, water needs, agricultural planning, vulnerability.*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de cultivos y ganaderos dependen en gran medida del clima, como la precipitación y la temperatura; por lo que la agricultura es el sector afectado más gravemente por cambio climático. La afectación se genera por la alteración de las necesidades de agua por los cultivos, la disponibilidad y la calidad del agua para aprovisionar la demanda de estos (Cai *et al.*, 2015). Lo anterior amenaza la seguridad alimentaria mundial y nacional (IPCC, 2014b; Nelson *et al.*, 2009). Conocer cómo el cambio climático afecta las necesidades de agua de los cultivos, es crucial para planificar adaptaciones en la agricultura de temporal y en la gestión del agua agrícola, especialmente en las regiones áridas y semiáridas donde los recursos hídricos son limitados.

La evapotranspiración (ET) es un componente importante del ciclo del agua que describe el proceso físico de transferencia de agua a la atmósfera, tanto por evaporación del suelo como por transpiración de las plantas. La ET integra las demandas atmosféricas, las condiciones de la superficie y es un factor que determina la sequía en regiones áridas y semiáridas (Huo *et al.*, 2013). La demanda de agua por los cultivos se determina generalmente, con base en la evapotranspiración

potencial (ETP), que es la tasa de evaporación y transpiración de una superficie de suelo cubierta con pasto o alfalfa empleada como referencia; la cual debe contar con humedad disponible abundante y sin problemas de deficiencias nutrimentales, afectaciones de plagas o enfermedades. La ETP es la máxima cantidad de agua que puede perderse desde una capa continua de vegetación que cubre todo un terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortiz-Solorio, 1987). La evapotranspiración potencial de referencia se ajusta a la evapotranspiración del cultivo mediante un factor de cultivo denominado  $K_c$ . La ETP expresa así, la capacidad evaporadora de la atmósfera en un lugar y época específicas del año. La ETP sólo se ve afectada por parámetros climáticos y no tiene en cuenta las características del cultivo, tales como el índice foliar, resistencia estomatal, altura de la vegetación, entre otros; ni por factores del suelo (Allen *et al.*, 1998). Analizar la distribución espacial de la ETP actual y pronosticar su evolución como resultado del cambio climático, representa un primer paso crítico en la estimación de las necesidades futuras de agua de los cultivos. Los resultados de este análisis permitirán planificar, diseñar y programar mejor los sistemas de riego (Garatuza-Payan *et al.*, 1998), así como en sistemas de agricultura de secano que depende exclusivamente de las condiciones naturales para producir algún fruto o alimento.

Medir la ET en campo es difícil y costoso, requiere de equipo especializado que es complicado de distribuir en todo el país. Por lo que, al ser la ET un parámetro climático, es común su estimación a partir de datos obtenidos en estaciones u observatorios meteorológicos. Existen numerosos métodos para estimar la ET, desde los basados en temperatura, hasta otros que consideran radiación y física atmosférica. Los métodos basados en temperatura sólo requieren información sobre temperatura y dependen de la suposición, generalmente fiable, de que ésta es un indicador de la potencia evaporativa de la atmósfera (McKenney y Rosenberg, 1993). Aunque estos métodos pueden ser útiles cuando no se dispone de datos sobre otros parámetros meteorológicos, tales como humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, se ha observado que las estimaciones basadas en la temperatura no son del todo fiables para estudiar la demanda evaporativa a largo plazo (McKenney y Rosenberg, 1993; McAfee, 2013). Otros métodos para estimar la ETP consideran variables adicionales, los más conocidos y aplicados

son los métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Thornthwaite y el de Penman-Monteith. Los dos últimos han sido ampliamente utilizados en México para análisis en escala nacional y local (Estrada-Berg *et al.*, 2002<sup>1</sup>; Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2004; Gómez-Díaz y Monterroso-Rivas, 2008<sup>2</sup>). La ecuación Penman-Monteith (PM) requiere información de humedad relativa, radiación neta, velocidad del viento y temperatura (Allen *et al.*, 1998). Este método ha sido recomendado durante mucho tiempo por FAO para estimar ETP y ahora es ampliamente aceptado como el método de mejor rendimiento (Ortega-Farías *et al.*, 2009; McAfee, 2013; Wang *et al.*, 2015).

La FAO (1978) define el periodo de crecimiento (PECRE) como el número de días durante el año en que el cultivo tiene disponibilidad de agua y temperatura favorable para su desarrollo, en el cálculo se utiliza la precipitación (P) y la ETP; el inicio del PECRE se presentará en los primeros meses del año cuando la lluvia sea igual que la mitad de la ETP, y el final del PECRE cuando nuevamente se alcance la misma condición pero después del periodo de lluvias. Al PECRE definido, se le puede restar el número de días con temperaturas mínimas o medias que no son favorables para el crecimiento de las plantas, comúnmente temperaturas medias inferiores a 6.5 °C, para así ajustar el PECRE por temperatura (Ortiz-Solorio, 1987).

México es un país ubicado en la región tropical y subtropical del hemisferio norte, muy poblado, con recursos hídricos sometidos a alta demanda por los sectores agropecuario, industrial, urbano y turístico. Los efectos del cambio climático se han manifestado como una secuencia de desastres hidrometeorológicos (inundaciones o sequías) con graves consecuencias sociales, ecológicas y económicas (Montes-Rojas *et al.*, 2015). A pesar de la vulnerabilidad del país al cambio climático, los estudios que han abordado su impacto en los recursos hídricos y agrícolas son escasos, pero cada vez más frecuentes. En su mayoría, son específicos de sitios o cultivos (Garatuzza-Payan *et al.*, 1998; Muñoz-

Arriola *et al.*, 2009; Santillán-Gutiérrez *et al.*, 2013) o técnicos (Er-Raki *et al.*, 2010, 2013; Martín-Clemente *et al.*, 2015). Se han hecho pocos intentos para estimar la espaciación y tendencias temporales de la ET por región, y menos para todo el país, como consecuencia del cambio climático. El objetivo de esta investigación fue estudiar la distribución espacial de la ET y el PECRE en las condiciones presentes, así como en las condiciones futuras que creará el cambio climático, para contar con elementos técnicos suficientes que permitan recomendar acciones de adaptación en la producción agrícola nacional.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso se dividió en tres etapas: primero se obtuvo la evapotranspiración potencial (ETP), después el PECRE y finalmente se aplicaron las proyecciones de cambio climático, los cuales se describen a continuación:

**Áreas de influencia climática (AIC).** Son áreas con comportamiento similar en variación climática y su descripción se tomó de Gómez *et al.* (2008). Para su definición se requiere información mensual de la distribución espacial de la P y generar modelos de regresión para temperatura. Las AIC han mostrado ser una herramienta espacial eficaz en el estudio del clima regional (CONAFOR-UACH, 2013; Gómez-Díaz y Monterroso-Rivas, 2008<sup>2</sup>; SEMARNAT, 2009). Gómez *et al.* (2011) reportaron 594 995 poligonales o AIC para todo México a escala 1:250 000 con información del periodo 1970-2000, las que se utilizaron como base para el presente análisis de variables climáticas, así como para los escenarios de cambio climático.

**Estimación de evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>).** El cálculo de ET<sub>0</sub> se hizo con base en la fórmula Penman-Monteith recomendada por FAO (Allen *et al.*, 1998) y que ha mostrado representar adecuadamente las condiciones del país (Ventura-Ramos, 2011<sup>3</sup>) de acuerdo con la siguiente Ecuación (1):

<sup>1</sup> Estrada-Berg, J. W., Y. García, J. D. Gómez-Díaz, A. I. Monterroso-Rivas, J. B. Estrada, M. A. Bernal, C. E. Rodríguez y F. García. 2002. Zonificación ecológica de especies endémicas de las zonas áridas y semiáridas de México. Proyecto de investigación. CONAZA y Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México, México.

<sup>2</sup> Gómez-Díaz, J. D. y A. I. Monterroso-Rivas. 2008. Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación Fondo CONAFOR-CONACYT. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Texcoco, Edo. de México, México.

<sup>3</sup> Ventura-Ramos, E. 2011. Variaciones climáticas y estrés hídrico y cuencas de México. Monitoreo y selección de modelos para la predicción de la evapotranspiración en zonas semiáridas. Presentación en el Foro binacional (México-USA) sobre desertificación y sequía en relación con el cambio climático. CONAFOR, Gobierno de Zacatecas, USDA, SEMARNAT. Zacatecas, Zac., México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=2480&grupo=7>.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

donde:  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ );  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ );  $G$  es el flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ );  $T$  es la temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_s$  se refiere a la presión de vapor a saturación (kPa);  $e_a$  la presión actual de vapor (kPa);  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor;  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) así como  $\gamma$  es una constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Para todas las AIC y para la cobertura nacional se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) mensual según fórmula 1, multiplicando  $ET_0$  por el número de días del mes.

**Periodo de crecimiento (PECRE).** De acuerdo con FAO (1978), el PECRE es el número de días en el año en que las condiciones de humedad y de temperatura son favorables para el desarrollo de los cultivos. La duración del PECRE se puede estimar mediante un balance de humedad entre la P y la evapotranspiración. El inicio del periodo de crecimiento está basado en el comienzo de la estación lluviosa y se obtiene cuando  $P = 0.5 \text{ ETP}$ . Es decir, cuando la cantidad de lluvia es igual o mayor a la mitad de la ETP se satisfacen las necesidades de agua para la germinación y crecimiento de los cultivos (Ortíz-Solorio, 1987). Por su parte, el fin del periodo de crecimiento será cuando se vuelve a cumplir que la lluvia es igual a la mitad de la ETP. Al considerar el total de ETP, es posible estimar el periodo húmedo (PH), que se define como el intervalo de tiempo en el cual la P es mayor a la evapotranspiración potencial ( $P > \text{ETP}$ ). Cuando existe PH, no solamente se satisfacen las demandas de la ETP de los cultivos a una completa o máxima cobertura, sino también el déficit de humedad en el perfil de suelo (Ortíz-Solorio, 1987). El PECRE y el PH fueron estimados para las zonas agrícolas del país, esto es, extrayendo las clases agrícolas de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI (2015) en su serie V.

**Escenarios de cambio climático.** Se aplicaron los escenarios de cambio climático obtenidos de Fernández-Eguiarte *et al.* (2015) para cinco modelos: HadGEM2-ES, GFDL\_CM3, MPI-ESM-LR, CNRMCM5 y REA; tres horizontes de tiempo: cercano (2015-2039), medio (2040-2069) y lejano (2070-2099); además de dos escenarios radiativos RCP (Representative

Concentration Pathway): 4.5 y 8.5  $\text{W m}^{-2}$ . Los modelos y horizontes de tiempo se seleccionaron por ser ampliamente usados en México y porque hace posible la comparación de los resultados (Cavazos *et al.*, 2013; INECC-SEMARNAT, 2012, 2018; INECC, 2013; SEMARNAT, 2014). Lo anterior implicó trabajar con 28 escenarios de cambio climático en total. En cada una de las AIC con uso agrícola se reemplazaron los valores de temperatura y P por las proyecciones de cambio climático y se recalculó la ETP así como el periodo de crecimiento para obtener los escenarios de cambio climático. Todos los procesos se realizaron con el sistema de información geográfico ArcMap (ESRI, 2016) lo que permitió gestionar las bases de datos y realizar todos los procesos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Escenario actual de evapotranspiración potencial (ETP).** La estimación de ETP para toda la superficie de México se presenta en la Figura 1a. Ésta se ubicó en el rango de 460 mm anuales, en las zonas de alta montaña del Pico de Orizaba hasta 2130 mm anuales en el norte del estado de Sinaloa; es decir, una diferencia de 1670 mm entre ambos valores extremos. En la mayoría del territorio nacional (67%) se registró un rango de 1200 a 1600 mm anuales, en 7% del territorio la ETP fue mayor a 1800 mm y en 4% menor de 1000 mm. El restante 19% de la superficie del país es posible encontrar rangos de ETP de 1000 a 1200 mm anuales, así como 1600 a 1800 mm anuales. El promedio nacional es del orden de 1280 mm de evapotranspiración con desviación estándar de 218 milímetros.

El uso de las AIC en un sistema de información geográfico ayudó a mejorar el trazo de la cartografía actual de ETP en México, y permitió confeccionar mapas más detallados. INEGI (2004) reportó cartografía de ETP elaborada a escala 1:1 000 000, cuyo propósito es de exploración y referencia únicamente. En la presente cartografía es posible identificar valores desde 100 mm y hasta poco más de 1400 mm de ETP anual, lo cual constituye una gran ventaja y mayor exactitud en la predicción. Maderrey (1990) estimó la ET real en rangos que van de menos de 100 mm y hasta 1500 mm anuales. Ambas cartografías son de referencia nacional (INEGI, 2004; Maderrey, 1990) y son complementados por los presentes resultados que reportan ETP en rangos similares.

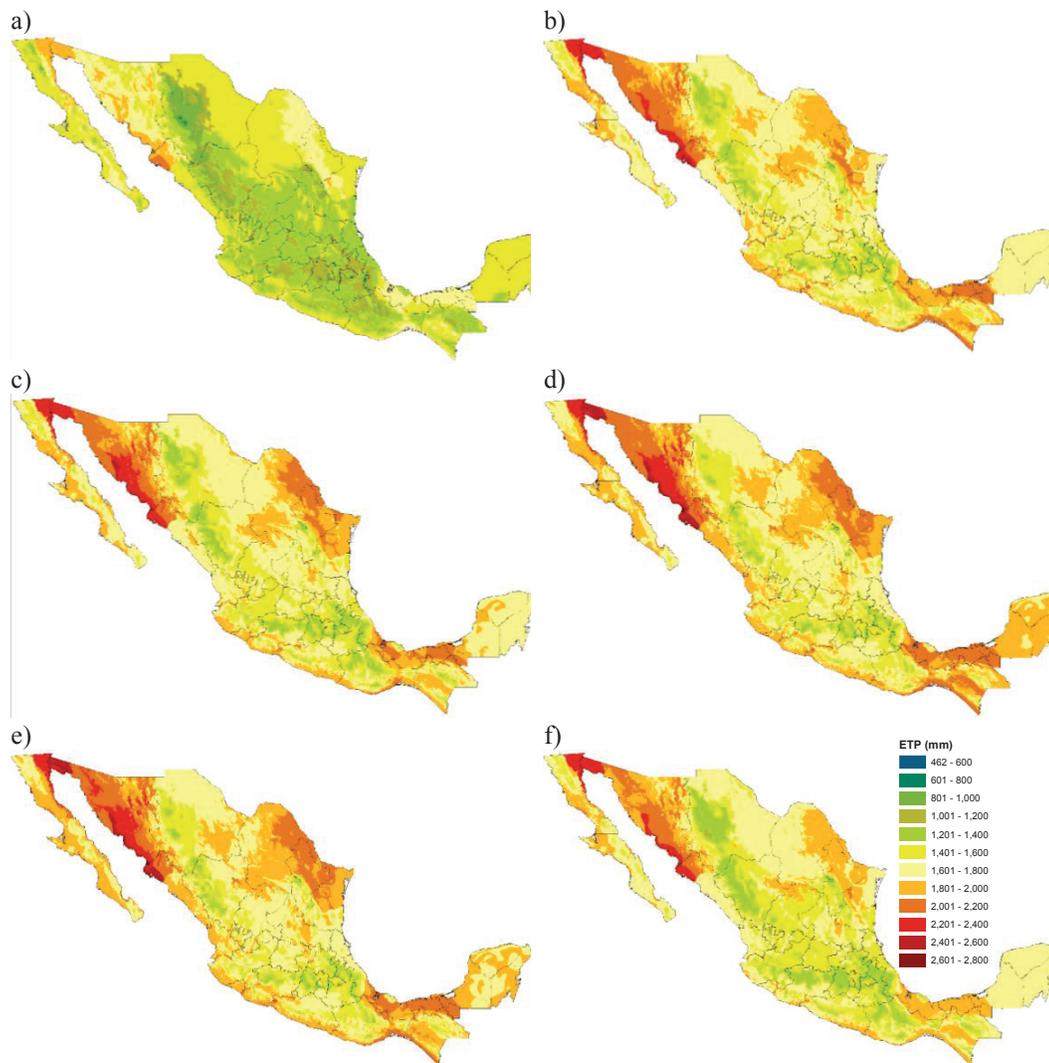


Figura 1. Evapotranspiración de referencia ETP según escenario actual (a) y escenarios de cambio climático al horizonte lejano 2069-2099 y RCP8.5: (b) MPI; (c) REA; (d) HADGEM; (e) GFDL y (f) CNRM.

Figure 1. PET reference evapotranspiration according to current scenario (a) and far-horizon climate change scenarios 2069-2099 and RCP8.5: (b) MPI; (c) REA; (d) HADGEM; (e) GFDL and (f) CNRM.

#### Horizonte cercano de cambio climático (2015-2039).

En ambos escenarios RCP4.5 y RCP85 disminuye la superficie con ETP en menos de 1000 mm según todos los modelos de cambio climático, desde 4% actualmente hasta  $0.3\% \pm 0.06\%$ . En contraste, la superficie con rango de ETP entre 1400 a 1600 mm anuales aumenta en promedio 5%, según todos los escenarios de 40% actualmente a  $44\% \pm 2\%$ . La ETP en la clase mayor a 2000 mm aumenta en poco menos de 2 millones de hectáreas, al pasar de 0.28% actualmente a  $1.3\% \pm 0.34\%$ , en comparación con el mismo rango del escenario base (Figuras 2 y 4). El valor más bajo

de ETP empieza en 947 mm según el modelo más drástico. Por su parte, el valor más alto es 2560 mm según el modelo más extremo.

Los resultados muestran que al considerar el cambio climático la ET tiende a aumentar, principalmente por el incremento de las temperaturas ambientales globales, ya que provocan mayor evaporación de humedad desde el suelo, a la vez la humedad relativa tiende a disminuir al incrementarse la capacidad de retención de humedad del aire, por el aumento de la temperatura y cambios menores en la humedad real. Todo ello, por consiguiente, incrementa la demanda

evapotranspirativa. Los rangos menores a 1000 mm anuales son los que mostrarán mayores cambios, debido a mayor exposición a temperaturas más altas con respecto a las actuales. El efecto del aumento de la temperatura deberá estudiarse por época del año, ya que cada estación genera cambios que deben contextualizarse según los sistemas de producción locales. Por ejemplo, en un ejercicio regional, Liu *et al.* (2013) estudiaron las tendencias en ET sobre las cuencas de drenaje del Golfo de México a largo plazo (1901-2008); esa es una zona que ha experimentado, durante ese período, cambios significativos del uso de la tierra hacia una agricultura comercial y aumento sustancial de la temperatura, en casi 1 °C. Los resultados de la simulación en esa área de estudio, indicaron una disminución estadísticamente significativa de ET durante la temporada de invierno, que fue causada casi por igual por la tendencia de calentamiento y el cambio de uso de la tierra.

#### Horizonte medio de cambio climático (2040-2069).

En este horizonte, el área con ETP menores a 1000 mm de ETP anuales también tiende a disminuir, ya que pasa de 4 a 0%  $\pm 0.01\%$ . El rango 1400 a 1600 mm disminuye de 40 a 35%  $\pm 5.6\%$  y el rango mayor a 2000mm aumenta considerablemente con cambio de 0.28% actualmente hasta 3.1%  $\pm 1.2\%$ . Aunque solamente el modelo MPI sugiere un menor aumento,

hasta 1.62% de la superficie nacional (Figuras 2 y 4). El comportamiento de los escenarios es consistente con lo encontrado para el de corto plazo, esto es, aumento en la necesidad evapotranspirativa en todo el país. Conviene resaltar que la superficie con clases de ETP que actualmente son menores a 1600 mm aumenta considerablemente a clases con valores superiores. En el horizonte medio de cambio climático fue posible identificar los efectos combinados de cambio en temperatura y de P sobre la ETP. El aumento en temperatura resultó ser consistente en todo el país, mientras que para la P se observa aumento o disminución según zona o región. En algunos casos se espera que llueva muy cerca de lo observado actualmente, pero concentrado en menor tiempo. Así, serán más días los que falte humedad, pero con excesos concentrados en otros días, incluso del mismo mes (Harmsen *et al.*, 2009). La ETP refleja esta combinación particularmente en regiones áridas donde se podrán tener repercusiones sobre la cantidad de agua para riego que cubra la mayor demanda hídrica de la producción agrícola (Seager *et al.*, 2007).

#### Horizonte lejano de cambio climático (2069-2099).

Los cambios en este horizonte de tiempo son más intensos y drásticos (Figura 1b, c, d, e y f). La ETP anual en el rango de menos de 1000 mm se observa que desaparece en todos los escenarios y modelos.

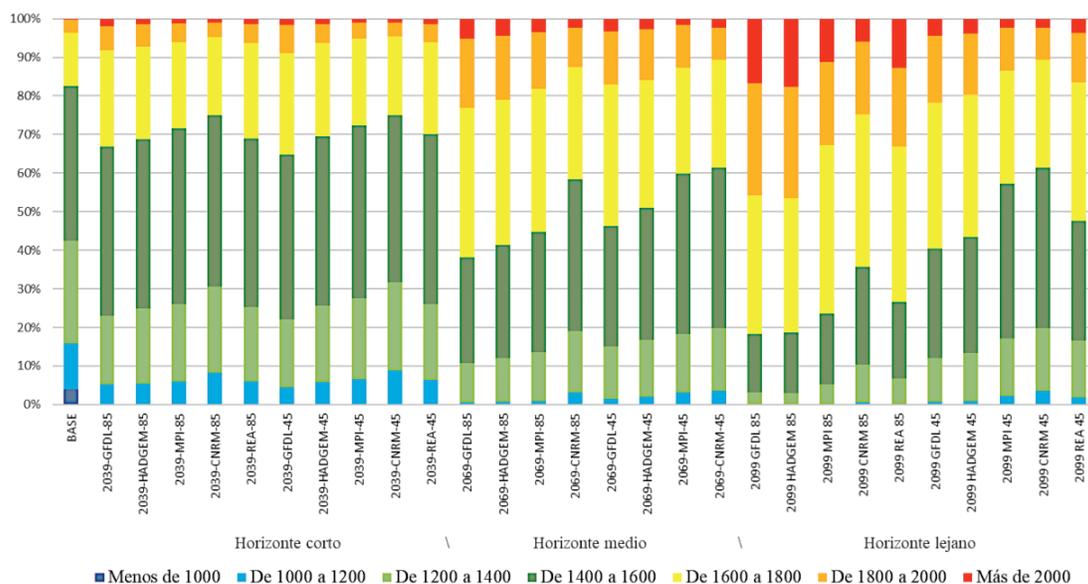


Figura 2. Superficie nacional ocupada (%) y rango de ETP (mm) actual y con cambio climático.

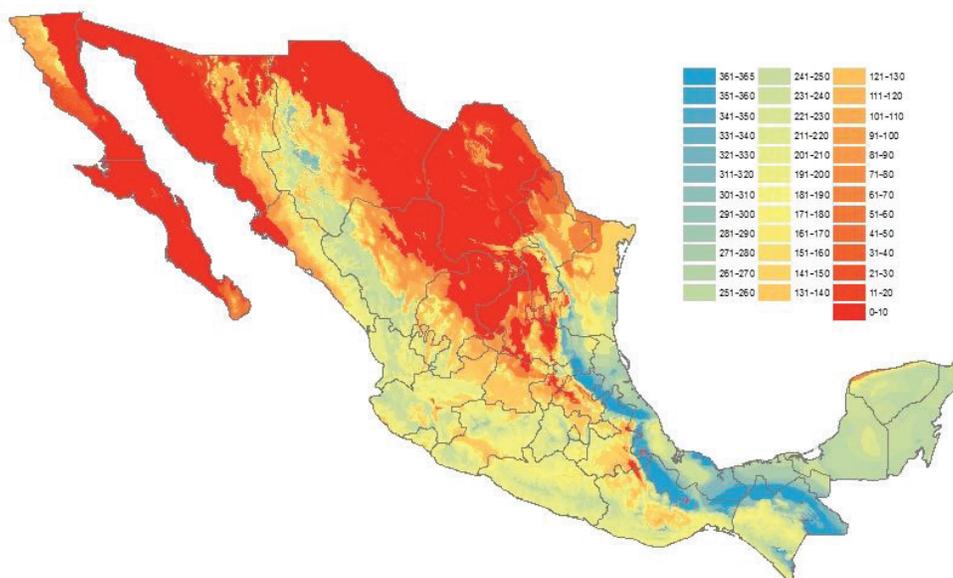
Figure 2. National occupied area (%) and range of ETP (mm) current and climate change scenarios.

En el rango 1400 a 1600 mm se ubica 33.7%  $\pm$  9.4% de la superficie nacional (de 40% actual). El rango de más de 2000 mm aumenta considerablemente en relación al escenario base (Figura 2), al cambiar de 0.28% actualmente hasta 17.55%  $\pm$  5.9% de la superficie nacional. Los resultados son consistentes con lo reportado por el IPCC recientemente (IPCC, 2014a), donde se confirma el calentamiento inequívoco del sistema climático mundial que se ha producido desde finales del siglo XIX. Un planeta más cálido se traducirá en mayores demandas de humedad por el suelo y cultivos. El reporte también predice que de continuar las emisiones humanas de gases de efecto invernadero con la actual tendencia provocará un mayor calentamiento global que probablemente superará 1.5 a 2 °C a finales del siglo XXI. El reporte indica que los incrementos estimados para México son mayores en la parte más continental del territorio que corresponde a la mesa del norte. Dado que la ETP no es sólo una función de la temperatura, sino también de la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento; el cambio en cualquiera de estos factores (aislado o integrado) en el horizonte lejano debe considerarse para conocer la influencia del aumento de la temperatura en el potencial de ETP. Como ya se indicó anteriormente, se estima una disminución de la humedad relativa y con ello se potencia el incremento de la ETP (McAfee, 2013; McKenney y Rosenberg, 1993).

### Período húmedo y período de crecimiento (PECRE).

El PECRE se estimó para todo el país (Figura 3) y para las zonas con superficie agrícola de México, es decir, para poco más de 32.5 millones de hectáreas. En el Cuadro 1 se presentan los resultados de la superficie correspondiente a cada periodo en el escenario base, para el horizonte lejano (2069-2099) y para RCP8.5, esto es, un aumento cercano a 4.4 °C hacia el 2100. Para mejor referencia en producción agrícola se muestra la superficie proyectada y porcentaje de cambio, en periodos de 90 días para PECRE y periodo húmedo. Así, el periodo de crecimiento que abarca prácticamente todo el año ( $> 275$  días) está presente en 9.1% de la superficie agrícola nacional.

Los PECRE según escenarios del horizonte lejano de cambio climático aumentan en el rango menor a 180 días como consecuencia de disminuir los mayores a 181 días. El periodo de crecimiento menor a 180 días ocupa poco más de 42% de la superficie nacional y se espera que aumente otro 30%. En el caso del PH también se observa consistencia, las zonas del país que presentan menos de 90 días tienden a aumentar de 13 a 31%, en tanto que disminuye según todos los escenarios de cambio climático y en lugares con más de 91 días (14 a 31%). Los resultados también muestran algunas regiones del país que no presentan PECRE; sin embargo, se realiza actividad agrícola bajo condiciones de riego y humedad agregada.



**Figura 3. Duración del periodo de crecimiento (días) de acuerdo con condiciones actuales o base.**  
**Figure 3. Length of growing period (days) according to current conditions or base year.**

**Cuadro 1. Rango en días para periodo de crecimiento y periodo húmedo y superficie ocupada para el horizonte lejano de cambio climático (RCP8.5) en la superficie agrícola nacional.****Table 1. Range in days for length of growing period and wet period and occupied area for the far horizon of climate change (RCP8.5) in the national agricultural area.**

Rango (días)	Superficie	Actual o base	Escenario de cambio climático				
			CNRMCM	ECHAM	HADGEM	GDFDL	REA
Superficie proyectada y porcentaje de cambio							
Periodo de crecimiento							
0 - 90	ha	5 947 812	7 104 308	8 811 305	11 640 217	14 368 402	17 820 790
	%	18.3	19.4	24.0	32.1	23.4	24.0
91 - 180	ha	7 767 755	8 792 999	9 548 229	9 646 374	10 325 516	11 212 374
	%	23.9	13.2	8.6	1.0	7.0	8.6
181 - 270	ha	15 831 031	11 183 593	7 868 420	5 537 854	4 014 243	2 824 293
	%	48.7	-29.4	-29.6	-29.6	-27.5	-29.6
271 - 365	ha	2 963 990	2 866 586	2 781 350	2 683 609	2 604 032	2 526 603
	%	9.1	-3.3	-3.0	-3.5	-3.0	-3.0
Periodo húmedo							
0 - 90	ha	16 819 028	19 063 567	23 870 796	31 484 140	38 474 789	48 176 916
	%	51.7	13.3	25.2	31.9	22.2	25.2
91 - 180	ha	12 217 154	10 632 100	8 547 945	6 237 942	5 198 170	4 179 200
	%	37.6	-13	-19.6	-27	-16.7	-19.6
181 - 270	ha	1 988 348	2 064 789	2 034 924	2 024 982	1 998 077	1 969 177
	%	6.1	3.8	-1.4	-0.5	-1.3	-1.4
271 - 365	ha	1 486 059	1 423 411	1 364 084	1 304 319	1 249 452	1 197 375
	%	4.6	-4.2	-4.2	-4.4	-4.2	-4.2

Los números negativos sugieren disminución en la superficie por los escenarios de cambio climático con respecto al escenario base.  
The negative numbers suggest a decrease in the surface due to the climate change scenarios with respect to the base scenario.

La región sureste proyecta cambios que serán drásticos con relación a lo actual, la duración del PH podrá disminuir, ya que las fechas de inicio y final se estrechan según todos los modelos. Algunas zonas del sur o sureste del país que actualmente muestran un PECRE mayor a 200 días del año, realizan actividades con cultivos perennes como caña de azúcar, café, aguacate y otros frutales de importancia económica. Si bien en estas regiones los requerimientos hídricos de los cultivos son cubiertos, el riesgo será problemas de exceso de humedad, que pueden afectar negativamente a los cultivos y su producción. Sin embargo, en el noreste del país se observan cambios drásticos particularmente por el adelanto del final del PECRE, que es en promedio 30 días con relación a las condiciones actuales; es decir, el PECRE se acorta en breve. La región occidente del país muestra que la distribución del PECRE y PH será de menor tiempo para el desarrollo de cultivos de ciclo

largo e incluso podría llegar a imposibilitar su cultivo en algunas áreas.

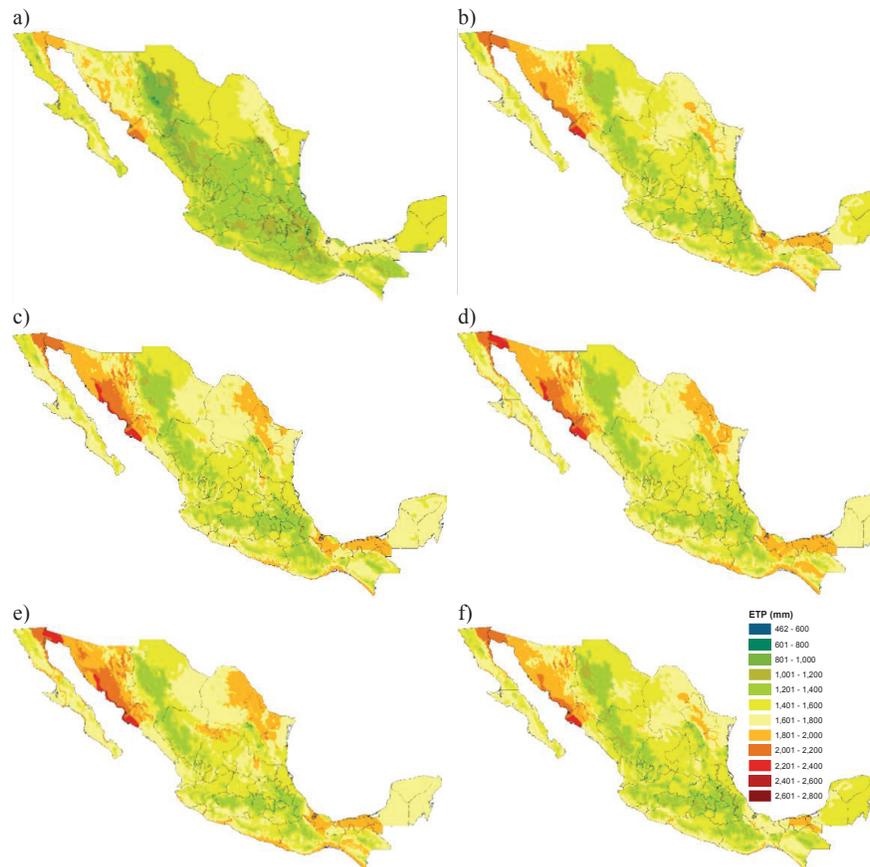
Las diferencias en el comportamiento de PECRE y ETP en las diversas regiones del país se explican por los factores climáticos que las determinan. La incidencia de radiación ha mostrado que puede ser motor de la variabilidad en la estimación de la ETP en el país, como lo han señalado Huo *et al.* (2013). El cambio en la temperatura ambiental propicia cambios (McAfee, 2013). Además de la temperatura, se ha encontrado que el cambio en la ETP es sensible a los cambios en humedad relativa del ambiente (Reddy, 1995; McKenney y Rosenberg, 1993). Incluso, en lugares con evidencia de degradación de tierras y climas semiáridos, donde la disminución en la humedad relativa propicia aumento en la ETP casi igual al alza de temperatura (Li *et al.*, 2012). La velocidad del viento, que en el país cambia a lo largo del año,

es un factor que define la ETP. En algunas regiones áridas de China se ha descrito que al disminuir la velocidad del viento disminuye significativamente la ETP (Nam *et al.*, 2015); por consiguiente al aumentar su velocidad aumenta la ETP. El cambio en la ETP puede deberse a las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas diarias (oscilación térmica). El aumento en temperaturas mínimas acorta la oscilación y en consecuencia eleva la evaporación del suelo (IPCC, 2014c). De esta forma, la importancia de las variables meteorológicas que definen las tendencias de la ETP y PECRE en el país varía tanto temporal como espacialmente (Figura 4).

Otros resultados relevantes son las fechas de inicio y fin del PECRE y PH. Las primeras son importantes dado que son usadas como indicador para empezar

la actividad agrícola. También, son usadas como indicador de impacto del cambio climático. En el Anexo 1 se muestran los resultados para cada entidad del país.

**Inicio de periodo de crecimiento (PECRE).** Aquellas entidades que muestran comportamiento muy similar a su situación actual son 11: Baja California, Baja California Sur, Coahuila y San Luis Potosí en el norte del país; Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Estado de México y Morelos en el centro, así como Guerrero y Oaxaca en el sur. Sólo para las áreas agrícolas del sur de la Ciudad de México se encontró que sería posible adelantar el inicio del PECRE en una semana. Los estados que podrán experimentar impacto por el retraso del inicio del PECRE en una a dos semanas son 16: Chihuahua, Durango, Sinaloa, Tamaulipas y Zacatecas en el norte;



**Figura 4.** Evapotranspiración de referencia ETP según escenario (a) actual y de cambio climático RCP4.5 horizonte lejano 2069-2099: (b) MPI; (c) REA; (d) HADGEM; (e) GFDL y (f) CNRM.

**Figure 4.** PET reference evapotranspiration according to a) current scenario and climate change scenarios RCP4.5 far horizon 2069-2099: (b) MPI; (c) REA; (d) HADGEM; (e) GFDL and (f) CNRM.

Jalisco, Michoacán, Nayarit, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro en el occidente, mientras que en el sureste toda la península de Yucatán, Chiapas y Tabasco. Las entidades donde las proyecciones indican más de dos semanas en el retraso del inicio del PECRE son Nuevo León y Colima.

**Final de periodo de crecimiento (PECRE).** Los resultados del Anexo 1 muestran que al considerar el escenario de cambio climático hay cinco entidades que no muestran cambio en el final del PECRE: Baja California Sur, Sonora, Coahuila, Michoacán y San Luis Potosí. Los estados que muestran consistencia en que se adelantará de una a dos semanas el final del PECRE de acuerdo al escenario de cambio climático son 13: Baja California, Nuevo León, Tamaulipas, Jalisco, Hidalgo, Tlaxcala, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Zacatecas, Ciudad de México, Chiapas y Guerrero. Por su parte, los escenarios que proyectan más de dos semanas de anticipación en el final del PECRE son también para 13 estados: Chihuahua, Durango, Sinaloa, Colima, Nayarit, Puebla, Veracruz, México, Morelos, Campeche, Quintana Roo, Yucatán y Oaxaca.

El efecto combinado de inicio tardío y finalización anticipada (hasta dos semanas en ambos) se proyecta para algunas regiones de siete entidades: Tamaulipas, Zacatecas, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Chiapas. Por su parte, el efecto combinado de cambio en más de dos semanas tanto en inicio como final estaría presente en una sola entidad, Colima. Este será el estado que podrá experimentar mayor impacto al reducir drásticamente su PECRE. Sin cambio en ambas fechas, se encontrarían tres entidades: Baja California Sur, Coahuila y San Luis Potosí. Los otros estados experimentarían cambio significativo solo en inicio o solo en final del PECRE.

Los resultados son semejantes a los encontrados en otros estudios. Por ejemplo, Zarazúa-Villaseñor *et al.* (2011) reportaron que la temperatura en las áreas agrícolas de México se ha incrementado desde la década de 1990, lo que aunado a la disminución de la P en las zonas de cultivo, provocan reducción en los periodos de crecimiento. Hatfield *et al.* (2011) y Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) también reportaron incrementos en la ETP, balance hídrico menos favorable, así como periodos de crecimiento más cortos en zonas tropicales y subtropicales del país. Para el noroeste del país, Lobell *et al.* (2005) aplicaron el mismo concepto de PECRE entre otros métodos para evaluar el impacto del cambio

climático en la producción de trigo y observaron una disminución del PECRE por el aumento de las temperaturas nocturnas.

Por lo general, se considera que el aumento de las temperaturas conducirá a mayor demanda evaporativa (Reddy, 2015). Sin embargo, una atmósfera más cálida en conjunto con otros cambios en variables climáticas requiere mayor esfuerzo local para comprender su magnitud e implicaciones sobre la producción agrícola. Estimar la ETP futura representa un desafío adicional a la estimación de información meteorológica actual. Los factores básicos para operar la ecuación que ha mostrado mejor desempeño en el país, esto es la ecuación de Penman-Monteith, deberán considerarse en las simulaciones de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera. También, es posible explorar métodos certeros de reducción de escala para las salidas de esos modelos, como aquellos métodos estadísticos de reducción de escala (SDSM) acompañados de calibraciones y regresiones con mediciones *in situ* y con variables atmosféricas cuantificadas.

Por último, se requieren esfuerzos locales y detallados que permitan establecer medidas de adaptación al cambio climático en la producción agrícola. Los cambios de la ETP y PECRE, aquí mostrados, pueden ser detonantes de otras condiciones que afectan a los cultivos como sequías, ondas de calor e incidencia de plagas o enfermedades. Tradicionalmente se ha sugerido para ese efecto, el cambio en las fechas de siembra regularmente de retraso, pero se requieren más estudios para orientarla según cultivo y región en el país. Otra adaptación que se recomienda frecuentemente como medida de adaptación, es el uso de variedades tolerantes o resistentes (Hellin *et al.*, 2014) pero poco se sabe sobre el comportamiento futuro de la variable que se desea atender.

## CONCLUSIONES

Se estimó la distribución espacial de cuatro variables clave para la producción agrícola en el país: la evapotranspiración potencial (ETP), la duración del periodo de crecimiento (PECRE), así como las fechas de inicio y final de este último. Las ventajas mostradas en este estudio son: 1) actualiza la cartografía y su resolución espacial detallada, 2) aplica escenarios de cambio climático que muestran el impacto que se observará sobre las variables en el país, y 3) tiene utilidad para iniciar con la planeación futura del uso

agrícola del agua. Los modelos de cambio climático analizados sugieren modificaciones considerables de la principal época de producción de cultivos, esto es, los meses de verano que son importantes en el país. Las consecuencias de lo estudiado sugieren la necesidad de intensificar los esfuerzos y la investigación para reducir a nivel local el impacto de los cambios, así como garantizar los mismos rendimientos que se observan actualmente en las regiones y municipios del país.

### DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplica.

### CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplica.

### DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

### FONDOS

No se declaran para la investigación reportada.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

A.I.M.R. y J.D.G.D. por igual conceptualizaron el manuscrito, diseñaron la metodología, prepararon el borrador original y revisaron la edición final.

### AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (DGIP, CIRENAM y Departamento de Suelos) donde se realizó la investigación. A la ingeniera Rosa H. Herrera Vázquez por procesamiento y cálculos. Así como a los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron considerablemente a mejorar el manuscrito.

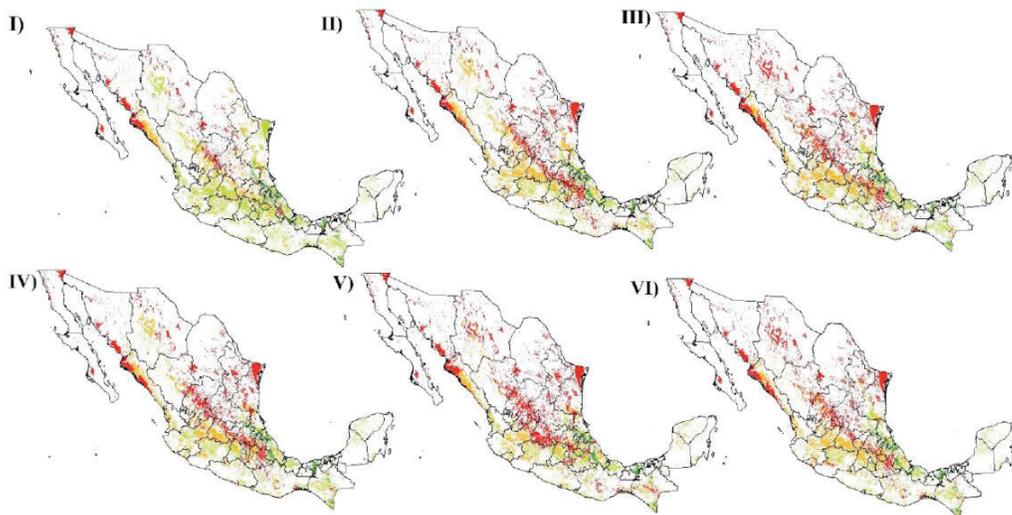
### LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy. ISBN: 92-5-104219-5.
- Cai, X., X. Zhang, P. H. Noël, and M. Shafiee-Jood. 2015. Impacts of climate change on agricultural water management: A review. *WIREs Water* 2: 439-455. doi: <https://doi.org/10.1002/wat2.1089>.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. Grau, R. Prieto-González, C. Conde, A. Quintanar, J. Santana, R. Romero, M. E. Maya, J. G. Rosario, R. Ayala, H. Carrillo, O. Santiesteban y M. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe final del proyecto al INECC. Mexico, D. F.
- CONAFOR-UACH (Comisión Nacional Forestal-Universidad Autónoma Chapingo). 2013. Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe Final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco, México.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, S. Khabba, V. Simonneau, L. Jarlan, A. Ouldbba, J. C. Rodriguez, and R. Allen. 2010. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *J. Arid Environ.* 74: 1587-1596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.002>.
- Er-Raki S., J. C. Rodriguez, J. Garatuza-Payan, C. J. Watts, and A. Chehbouni. 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agric. Water Manage.* 122: 12-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.007>.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2016. ArcMap Desktop: Release 10.4. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, USA.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1978. Report on the Agro-ecological Zones Project: Methodology and results for Africa. Vol. 1. FAO World Soil Resources Report Nr. 48/1. ISBN: 9789251005897.
- Fernández-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno, A. C. Conde-Álvarez y R. I. Trejo-Vázquez. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNAM, UNIATMOS, INECC. México, D. F. [http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas\\_2\\_190215\\_documentacion.pdf](http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf). (Consulta: octubre 15, 2019).
- Garatuza-Payan, J., W. J. Shuttleworth, D. Encinas, D. D. McNeil, J. B. Stewart, H. deBruin, and C. Watts. 1998. Measurement and modelling evaporation for irrigated crops in north-west Mexico. *Hydrol. Process.* 12: 1397-1418. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199807\)12:9<1397::AID-HYP644>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199807)12:9<1397::AID-HYP644>3.0.CO;2-E).
- Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers, A. I. Monterroso, C. Gay, J. Campo, and M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21: 35-56.

- Gómez-Díaz, J. D., A. I. Monterroso-Rivas, J. A. Tinoco-Rueda, M. Toledo-Medrano, C. Conde-Álvarez, and C. Gay-García. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24: 31-52.
- Harmsen, E. W., N. L. Miller, N. J. Schlegel, and J. E. González. 2009. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agric. Water Manage.* 96: 1085-1095. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.006>.
- Hatfield, J. L., K. J. Boote, B. A. Kimball, L. H. Ziska, R. C. Izaurralde, D. Ort, A. M. Thomson, and D. Wolfe. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron. J.* 103: 351-370. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>.
- Hellin, J., M. R. Bellon, and S. J. Hearne. 2014. Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico. *J. Crop Improv.* 28: 484-501. doi: <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.921800>.
- Huo, Z., X. Dai, S. Feng, S. Kang, and G. Huang. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *J. Hydrol.* 492: 24-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.011>.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2013. México ante el clima. Sistema de información sobre cambio climático en México (Núm. 1). <https://cambioclimatico.gob.mx/>. (Consulta: octubre 15, 2019).
- INECC-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. México: Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. INECC-SEMARNAP. México, D. F.
- INECC-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2018. Sexta comunicación nacional ante la convención de Naciones Unidas de Cambio Climático (CMNUCC). INECC-SEMARNAP. México, D. F. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Evapotranspiración. INEGI. México, D. F. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267520>. (Consulta: octubre 15, 2019).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Uso de suelo y vegetación a escala 1:250000, Serie V (conjunto nacional). INEGI. México, D. F. <https://www.inegi.org.mx/>. (Consulta: octubre 15, 2019).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014a. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014b. Parte A: Impactos, vulnerabilidad y adaptación observados en un mundo complejo y cambiante. pp. 4-9. *In:* C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.). Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014c. Parte B: Futuros riesgos y oportunidades en relación con la adaptación. pp. 11-21. *In:* C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.). Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.
- Li, Z., F. L. Zheng, and W. Z. Liu. 2012. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the Loess Plateau of China. *Agric. For. Meteorol.* 154-155: 147-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.019>.
- Liu, M., H. Tian, Q. Yang, J. Yang, X. Song, S. E. Lohrenz, and W. J. Cai. 2013. Long-term trends in evapotranspiration and runoff over the drainage basins of the Gulf of Mexico during 1901-2008. *Water Resour. Res.* 49: 1988-2012. doi: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20180>.
- Lobell, D. B., J. I. Ortiz-Monasterio, G. P. Asner, P. A. Matson, R. L. Naylor, and W. P. Falcon. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Res.* 94: 250-256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.007>.
- Maderey, L. E. 1990. Evapotranspiración real. *In:* Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4 000 000. Instituto de Geografía UNAM. México, D. F.
- Martín-Clemente, C., J. Sosa-Ramírez, M. Maass-Moreno, J. J. Luna-Ruíz, A. Méraz-Jiménez y E. Flores-Ancira. 2015. Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. *Terra Latinoamericana* 33: 17-26.
- McAfee, S. A. 2013. Methodological differences in projected potential evapotranspiration. *Clim. Change* 120: 915-930. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0864-7>.
- McKenney, M. S. and N. J. Rosenberg. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 64: 81-110. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90095-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90095-Y).
- Monterroso-Rivas, A. I. y J. D. Gómez-Díaz. 2004. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático II. Comisión Nacional de las Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.
- Montes-Rojas, R. T., J. E. Ospina-Noreña, C. Gay-García, C. Rueda-Abad, and I. Navarro-González. 2015. Water-resource management in Mexico under climate change. pp. 215-241. *In:* S. Setegn and M. Donoso (eds.). Sustainability of integrated water resources management. Springer International Publishing. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12194-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12194-9_13).
- Muñoz-Arriola, F., R. Avissar, C. Zhu, and D. P. Lettenmaier. 2009. Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resour. Res.* 45: W00A20 (1-13). doi: <https://doi.org/10.1029/2007WR006783>.

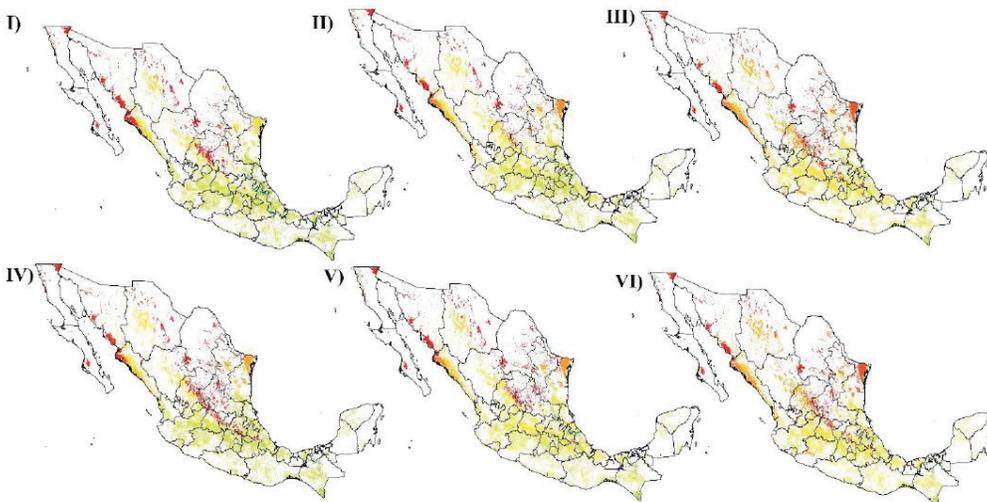
- Nam, W. H., E. M. Hong, and J. Y. Choi. 2015. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? *Agric. Water Manage.* 150: 129-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.019>.
- Nelson, G. C., M. W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing, and D. Lee. 2009. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. Food Policy Report 21. International Food Policy Research Institute (IFPRI). Washington, D. C. ISBN13-digit: 978-0-89629-535-3. doi: <https://doi.org/10.2499/0896295354>.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, M. Íñiguez-Covarrubias y M. J. Montero-Martínez. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45: 1-11.
- Ortega-Farias, S., S. Irmak, and R. H. Cuenca. 2009. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. *Irrigat. Sci.* 28: 1-3. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0184-x>.
- Ortiz-Solorio, C. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.
- Reddy, P. P. 2015. Impacts of climate change on agriculture. pp. 43-90. *In*: P.P. Reddy (ed.). *Climate resilient agriculture for ensuring food security*. Springer. New Delhi, India. doi: [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2199-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2199-9_4).
- Reddy, S. Jeevananda. 1995. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 77: 121-125. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02239-T](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02239-T).
- Santillán-Gutiérrez, E., G. Dávila-Vázquez, J. de Anda-Sánchez y J. J. Díaz-Torres. 2013. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. *Rev. Ambient. Água* 8: 104-117. doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1147>.
- Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H. P. Huang, N. Harnik, A. Leetmaa, N. Lau, C. Li, J. Velez, and N. Naik. 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science* 316: 1181-1184. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1139601>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2009. México: Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático. INE-SEMARNAT. México, D. F. ISBN: 978-607-7908-00-5.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2014. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC). Diario Oficial de la Federación. 28 de abril de 2014. México, D. F.
- Wang, W., W. Xing, and Q. Shao. 2015. How large are uncertainties in future projection of reference evapotranspiration through different approaches? *J. Hydrol.* 524: 696-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.033>.
- Zarazúa-Villaseñor, P., J. Ruiz-Corral, D. González-Eguiarte, H. Flores-López y J. Ron-Parra. 2011. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en ciénega de Chapala, Jalisco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 351-363.

**ANEXO 1. Mapas de duración del periodo de crecimiento en áreas agrícolas.**  
**ANNEX 1. Maps of length of growing period in agricultural areas.**



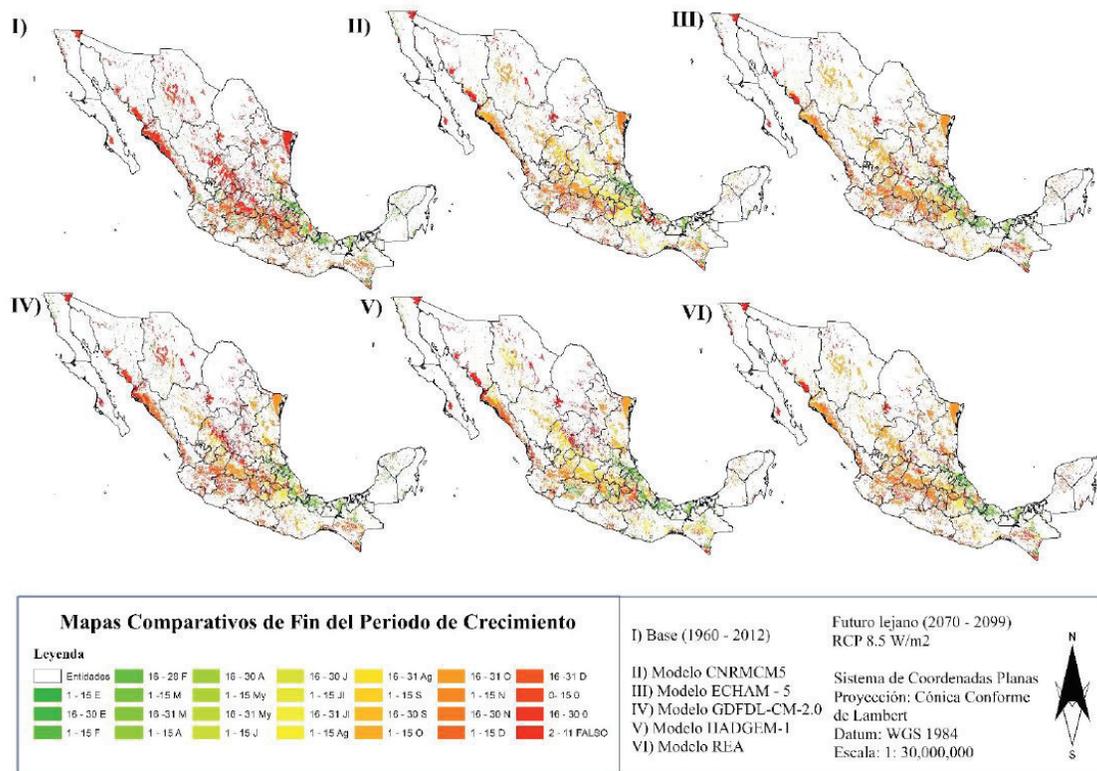
I) escenario base; II) modelo CNRMCM5; III) modelo ECHAM5; IV) modelo GFDL CM2; V) Modelo HADGEM1; VI) REA. Todos para el escenario lejano (2070-2099) y RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.  
 I) baseline scenario; II) CNRMCM5 model; III) ECHAM5 model; IV) GFDL CM2 model; V) HADGEM1 model; VI) REA. All for the far scenario (2070-2099) and RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.

**ANEXO 2. Mapas de inicio del periodo de crecimiento en áreas agrícolas.**  
**ANNEX 2. Maps of the beginning of growing period in agricultural areas.**



I) escenario base; II) modelo CNRMCM5; III) modelo ECHAM5; IV) modelo GFDL CM2; V) Modelo HADGEM1; VI) REA. Todos para el escenario lejano (2070-2099) y RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.  
 I) baseline scenario; II) CNRMCM5 model; III) ECHAM5 model; IV) GFDL CM2 model; V) HADGEM1 model; VI) REA. All for the far stage (2070-2099) and RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.

**ANEXO 3. Mapas de final del periodo de crecimiento en áreas agrícolas.**  
**ANNEX 3. Maps of the end of the growing period in agricultural areas.**



I) escenario base; II) modelo CNRMCM5; III) modelo ECHAM5; IV) modelo GFDL CM2; V) Modelo HADGEM1; VI) REA. Todos para el escenario lejano (2070-2099) y RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.

I) baseline scenario; II) CNRMCM5 model; III) ECHAM5 model; IV) GFDL CM2 model; V) HADGEM1 model; VI) REA. All for the far stage (2070-2099) and RCP8.5 W/m<sup>2</sup>.



**ANEXO 4 (continuación). Superficie ocupada por entidad federativa y fecha de inicio del periodo de crecimiento en áreas agrícolas y escenarios de cambio climático en el horizonte lejano y RCP85.**

**ANNEX 4 (continuation). Area occupied by state and start date of the growing period in agricultural areas and scenarios of climate change in the distant horizon and RCP85.**

		FECHA DE FIN DEL PERIODO DE CRECIMIENTO (% Superficie en tierras agrícolas del estado)																										
		San PECE	1-15 E	16-30 E	1-15 F	16-28 F	1-15 M	16-31 M	1-15 A	16-30 A	1-15 Mj	16-31 Mj	1-15 J	16-30 J	1-15 Jj	16-31 Jj	1-15 Ag	16-31 Ag	1-15 S	16-30 S	1-15 O	16-31 O	1-15 N	16-30 N	1-15 D	16-31 D		
CENTRONORTE	Aguascalientes	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM	0.000003																									
		GFDL	0.2																									
		HADGEM	0.000003																									
	Guanajuato	BASE	3.8	0.1																								
		CNRM																										
		ECHAM	11.8																									
		GFDL	20.9																									
		HADGEM	0.4																									
	Querétaro	BASE	3.0	1.3																								
		CNRM																										
ECHAM		0.7																										
GFDL		38.3																										
HADGEM		1.1		0.1	0.1																							
San Luis Potosí	BASE	0.0004																										
	CNRM	41.3	3.4																									
	ECHAM	3.5	0.009																									
	GFDL	27.3																										
	HADGEM	64.3		0.1	0.003																							
Zacatecas	BASE	56.2	2.0	0.8	0.7																							
	CNRM	27.3																										
	ECHAM	36.6																										
	GFDL	1.3																										
	HADGEM	7.8																										
CENTRO	Ciudad de México	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										
	México	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										
	Morelos	BASE																										
		CNRM																										
ECHAM																												
GFDL																												
HADGEM																												
SURESTE	Campeche	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										
	Quintana Roo	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										
	Tabasco	BASE																										
		CNRM																										
ECHAM																												
GFDL																												
HADGEM																												
Yucatán	BASE																											
	CNRM																											
	ECHAM																											
	GFDL																											
	HADGEM																											
SUR	Chiapas	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										
	Oaxaca	BASE																										
		CNRM																										
		ECHAM																										
		GFDL																										
		HADGEM																										

CENTRONORTE

**ANEXO 5. Superficie ocupada por entidad federativa y fecha de fin del periodo de crecimiento en áreas agrícolas.**  
**ANNEX 5. Area occupied by state and end date of the growing period in agricultural areas.**

		FECHA DE FIN DEL PERIODO DE CRECIMIENTO (% Superficie en tierras agrícolas del estado)																									
		1-15 E	16-30 E	1-15 F	16-28 F	1-15 M	16-31 M	1-15 A	16-30 A	1-15 Mj	16-31 Mj	1-15 J	16-30 J	1-15 Jj	16-31 Jj	1-15 Ag	16-31 Ag	1-15 S	16-30 S	1-15 O	16-31 O	1-15 N	16-30 N	1-15 D	16-31 D		
NOROESTE	Baja California	BASE																									
		CNRM		0.6		3.9	13	13.9	4	0.1																	
		ECHAM	0.002	7.4		3.9	3.2	0.0003																			
		GFDL	6.7	28.4																							0.3
		HADGEM																									1.5
	Baja California Sur	BASE																									
		CNRM																			7	3	4	0.004			
		ECHAM									0.03										4.2	2.2	0.1				
		GFDL																					0.4		15.8	0.004	0.1
		HADGEM	3.9	0.004																					0.8	5	7.5
	Chihuahua	BASE	1.1	0.8	2.4	1.7	0.6	0.4	0.2	0.9											4.2	2.2	0.1	0.5	2.6	3	0.1
		CNRM	5.3	3.1	0.5	0.5	0.03																				55.2
		ECHAM	0.02	0.1	0.0000004	0.002										0.2	0.05	2.7	6.6	62.2	2.2	2.3	1.3	0.6	0.4	0.1	0.4
		GFDL	5.3	3.1	0.5	0.5	0.03									0.00004	0.8	1.15	0.03	3.9	7.2	0.4	0.1	0.1	0.1	1.1	55.2
		HADGEM	0.2	2.4	0.5	0.03											6.9	2.6	1.8	5.3	9.3	13.3	0.1	0.1	0.3	0.043	1.5
	Durango	BASE	0.02	0.1	0.0000004	0.002																					0.4
		CNRM	0.1	0.1	0.7	2.7	1.9	0.2																			1.9
		ECHAM	0.1	0.3	0.5	0.9	0.04					0.9	0.004								0.01	0.4	13	48.9	6.8	4.4	3.7
		GFDL	0.6	1.2	0.3	0.4	1.2														0.1	1.5	62.7	16.7	2.9	1.1	2.8
		HADGEM	0.3	0.7	0.6	0.6	0.9														1	12.5	16.6	31.1	6.5	1.9	0.4
Sinaloa	BASE	0.1	0.3																							15.5	
	CNRM	0.01	0.01	0.003																	9.9	25.9	2.2	4.4	7.3	9.1	
	ECHAM	0.04	0.01																		4.2		12.8	26.9	18	27.3	
	GFDL	0.1	0.02	0.003	0.001																0.02	0.9	8.2	1.4	6.6	33.5	
	HADGEM	0.1	0.03	0.02	0.003																0.002	12.8	2	0.5	0.7	30.7	
Sonora	BASE	0.04	0.01																							5.4	
	CNRM	0.01	0.01																							0.6	
	ECHAM	0.04	0.01																							0.6	
	GFDL	0.1	0.02	0.003	0.001																					17.3	
	HADGEM	0.1	0.03	0.02	0.003																					17.3	
NORESTE	Coahuila	BASE																									
		CNRM																									
		ECHAM																									
		GFDL																									
		HADGEM																									
	Nuevo Leon	BASE																									
		CNRM																									
		ECHAM																									
		GFDL																									
		HADGEM																									
	Tamaulipas	BASE	0.5	1.9	1.1	1	0.9	0.1																			
		CNRM	0.1	0.01			0.04																				
		ECHAM	0.01																								
		GFDL																									
		HADGEM	0.1	0.006																							
	Colima	BASE	3.9	3.8	0.1																						
		CNRM																									
		ECHAM																									
		GFDL																									
		HADGEM	0.5																								
Jalisco	BASE	1.6	6.6	1.2	0.6																						
	CNRM																										
	ECHAM																										
	GFDL	0.02																									
	HADGEM	1.8	0.1																								
Michoacán de Ocampo	BASE	6.2	4.3	0.8	0.8	0.2	0.1																				
	CNRM	0.2																									
	ECHAM	0.04	0.0001																								
	GFDL	0.2																									
	HADGEM	11.7	12.6	0.2																							
Nayarit	BASE	3.2	20.7	1.2	0.2																						
	CNRM																										
	ECHAM																										
	GFDL																										
	HADGEM	0.01	0.2																								
Hidalgo	BASE	0.4	0.5	0.4	3.3	0.2	7.1	0.4	3.9	0.6																	
	CNRM	1.34	8.5	5.6	3.7	0.6	0.8																				
	ECHAM	3.1	6.6	2.1	5	1	0.1																				
	GFDL	0.4	3.8	2.3	7.5	5.1	0.3																				
	HADGEM	1.1	6.8	4	9.03	0.02	1.4	0.0																			
Puebla	BASE	0.6	5.1	1.4	4.5	1	4.3	0.1	3.3	0.3																	
	CNRM	2.5	4.6	3.9	4	1.4	1.7	0.01	2.9	0.1																	
	ECHAM	2.1	3.3	3.1	3.6	1.38	3.3	0.04	1.5	0.2	0.001	0.02	15	14.9	8	0.3	2.8	0.6	3	2.5	14.5	1.7	8.1	2.6	3.2		
	GFDL	0.7	2.6	1.3	5.8	4.4	4.1	1.1	2.8	0.1	0.2	0.8	11	23.1	5.5	2.3	0.7	0.01	0.02	2.6	14.9	3.3	2.5	1	3.4		
	HADGEM	1.4	5.12	5.6	5.7	0.5	2.1	0.05	3.1	0.1	0.5	0.1	1.1	1.8	10.3	1.6	2.9	0.1	0.2	0.5	2.2	0.2	0.04	3.9	15.8		
Tlaxcala	BASE	0.2	3.8	2.6	0.03																						
	CNRM	4.3	0.4																								
	ECHAM																										
	GFDL																										
	HADGEM	0.0	5.7	0.4																							
Veracruz de Ignacio de la Llave	BASE																										
	CNRM	3.9	19.1	8.9	11.2	3.5	3.6	0.3	1.3	0.02	0.2	0.7	0.2	0.1	0.1	0.4	3.5	0.00001	0.3	0.1	3.7	1.1	13.9	0.5	23.7		
	ECHAM	13.0	26.5	9.79	9.7	3.6	5.1	0.4	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	1.8	0.01	3.5	0.1	0.1	0.2	4.7	2.8	6.5	1.8	7.8		
	GFDL	3.4	29.8	2.583	10.8	12.4	10.1	0.6	1.6	0.001	0.0002	0.02	0.01	0.03	6.2	2.2	0.04	2.8	0.01	6.6	0.2	5.4	0.1	1.4	3.8		
	HADGEM	3.7	28	18																							

