



Madera y bosques

ISSN: 1405-0471

ISSN: 2448-7597

Instituto de Ecología A.C.

Gómez-Tosca, Elena G.; Alvarado-Castillo, Gerardo; Benítez, Griselda; Cerdán-Cabrera, Carlos R.; Estrada-Contreras, Israel
Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México
Madera y bosques, vol. 27, núm. 2, e2722070, 2021
Instituto de Ecología A.C.

DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722070>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770783004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNAM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México

Current and future potential distribution of *Coffea arabica* L. in the Decozalapa subbasin, Veracruz, Mexico

Elena G. Gómez-Tosca¹, Gerardo Alvarado-Castillo¹, Griselda Benítez², Carlos R. Cerdán-Cabrera¹, e
Israel Estrada-Contreras^{2*}

¹ Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias
Agrícolas. Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

² Instituto de Ecología A.C. Red de Ambiente y
Sustentabilidad. Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia.
is_raicesec@yahoo.com.mx

RESUMEN

El calentamiento global está provocando variaciones en el clima, lo cual representa una amenaza grave para los sistemas naturales, y México está particularmente expuesto a los efectos del cambio climático. En este sentido, el café es uno de los cultivos más susceptibles a las variaciones meteorológicas, pues requiere de un determinado régimen hidrotérmico para su desarrollo. El objetivo de este trabajo fue modelar la distribución potencial actual y futura de este cultivo ante diferentes escenarios de cambio climático proyectados al 2050 y 2070 en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México, usando el algoritmo Maxlike, a través de tres modelos de circulación general. Se determinó un intervalo de reducción de la distribución potencial de la superficie actual de café (924.5 km²) de entre 4.74 % y 61.67 %, un intervalo de 725 m a 1397 m s.n.m. en la altitud mínima potencial y de 2221 m a 2308 m s.n.m. en la altitud potencial máxima, un aumento posible de la temperatura de entre 1.1 °C y 3.5 °C, lo que implica la pérdida de áreas con idoneidad climática de 4.74% (43.8 km²) a 61.67% (570.1 km²) y cambios en la precipitación de -69 mm a 73 mm. Estas alteraciones sugieren la afectación de la zona cafetalera, incluyendo la posible desaparición de condiciones ambientales adecuadas en cuatro de los principales municipios productores y el desplazamiento del cultivo a latitudes superiores. Finalmente, es arriesgado ignorar los impactos potenciales que el clima presente y futuro puede tener sobre el café, por lo que se requiere tomar medidas de adaptación y mitigación específicas para este cultivo.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, escenarios de cambio climático, Maxlike, modelos de circulación general, nicho ecológico, rutas de concentración representativas.

ABSTRACT

Global warming is causing variations in the climate that poses a serious threat to natural systems, and Mexico is particularly exposed to the effects of climate change. In this context, coffee is one of the most susceptible crops to weather variations, as it requires a certain hydrothermal regime for its development. The aim of this work was to model the current and future potential distribution of this crop in the face of different climate change scenarios projected to 2050 and 2070 in the Decozalapa subbasin, Veracruz, Mexico using the Maxlike algorithm, through three general circulation models. An interval of reduction in the potential distribution of the current coffee area (924.5 km²) was determined from 4.74% to 61.67%, an interval of variation of 725 m to 1397 m a.s.l. at the potential minimum altitude and from 2221 m to 2308 m a.s.l. at the maximum potential altitude, and possible temperature changes between 1.1 °C and 3.5 °C, which means the loss of climate-appropriate areas from 4.74% (43.8 km²) to 61.67% (570.1 km²) and changes in precipitation from -69 mm to 73 mm. These alterations suggest the affectation of the coffee area, including the possible disappearance of suitable environmental conditions in four of the main producing municipalities and the displacement of the crop to higher latitudes. Finally, it is risky to ignore the potential impacts that present and future climate can have on cultivation, so specific adaptation and mitigation measures are required for this crop.

KEYWORDS: climatic change, climatic change scenarios, Maxlike, general circulation models, ecological niche, representative concentration pathways.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, resultado del incremento de los gases efecto invernadero, está generando un aumento de temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos, provocando variaciones en el clima que de forma natural no ocurrirían (Ovalle-Rivera, Läderach, Bunn y Obersteiner, 2015). De continuar estos cambios, se afectará tanto a la biodiversidad, como a la producción de alimentos (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Esto representa una amenaza grave para los sistemas naturales ya que está provocando que muchas especies modifiquen sus áreas de distribución geográfica, actividad estacional, abundancia e interacciones con otras especies (Duan, Kong, Huang, Varela y Ji, 2016; Estrada-Contreras, Equihua, Laborde, Martínez-Meyer y Sánchez-Velásquez, 2016; Hannah *et al.*, 2017).

La alta variabilidad climática (mayor número e intensidad en sequías, granizadas, lluvias e inundaciones) generará cambios en la distribución, idoneidad y productividad de los cultivos en el mundo (Monterroso-Rivas, Conde-Álvarez, Gómez-Díaz y López-García, 2007; Monterroso-Rivas, Conde-Álvarez, Gay-García, Gómez-Díaz y López-García, 2012; Chemura, Kutwayo, Chidoko y Mahoya, 2016; Chemura *et al.*, 2021), así como la pérdida de servicios ecosistémicos (Chemura *et al.*, 2016; Monterroso-Rivas *et al.*, 2007; Schroth y Ruf, 2014). México, está particularmente expuesto a los efectos del cambio climático (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2014), siendo uno de los países más vulnerables (Harmeling y Eckstein, 2012).

En este sentido, el estado de Veracruz es también es uno de los más afectados por eventos hidrometeorológicos producto del cambio climático (Monterroso-Rivas *et al.*, 2012) y, al ser uno de los principales productores de café (*Coffea arabica* L.) a escala nacional (López-García, Escamilla-Prado, Zamarripa-Colmenero y Cruz-Castillo, 2016; Contreras, 2008), será de los más afectados, ya que este es uno de los cultivos más susceptibles a las variaciones meteorológicas, pues requiere de un determinado régimen

hidrotérmico para su desarrollo (Fain, Quiñones, Álvarez-Berrios, Parés-Ramos y Gould, 2017; González-Hernández y Hernández-Santana, 2016; Monterroso-Rivas *et al.*, 2007).

Los efectos del cambio climático pueden incidir en la variación anual de la producción del café, afectando las fases fenológicas del cultivo; por ejemplo, el aumento de la temperatura reduce el crecimiento, la floración y la fructificación, resultando en una pérdida total o parcial de la cosecha (Rivera-Silva *et al.*, 2013); cambios en los patrones de precipitación ocasionan una floración errática, una maduración incompleta y la caída del fruto, aumentando así la presión de plagas y enfermedades (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015) y las sequías reducen la actividad fisiológica de la planta (Rivera-Silva *et al.*, 2013).

Por ello, para poder proponer y adoptar medidas pertinentes que ayuden a mitigar los efectos negativos del cambio climático sobre este cultivo, es necesario conocer cuáles serán los posibles cambios en su distribución geográfica ante los diferentes escenarios de cambio climático, particularmente, en áreas específicas y delimitadas de manera natural y funcional (Fain *et al.*, 2017; Ávila-Flores, 2015; Läderach, *et al.*, 2011), como es el caso de la subcuenca Decozolapa (perteneciente a la Cuenca de La Antigua, considerada como una de las regiones hidrológicas prioritarias de México) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2010), la cual define la existencia de diversos paisajes y ecosistemas, cuyos elementos naturales conforman el capital ecológico del estado y está estrechamente relacionada con importantes regiones productoras de café. En este sentido, los modelos de circulación general (MCG), enfocados a escala de microcuenca son una herramienta importante para evaluar la respuesta de este cultivo al cambio climático.

OBJETIVOS

El propósito de este trabajo fue modelar la distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. ante diferentes escenarios de cambio climático proyectados al 2050 y 2070 en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México usando el algoritmo Maxlike.



MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en la subcuenca Decozalapa perteneciente a la cuenca La Antigua que incluye la zona montañosa central de Veracruz (Inegi, 2010), que está dentro del intervalo altitudinal óptimo para el cultivo de café en la región (Läderach *et al.*, 2011; Manson, Contreras

y López-Barrera, 2008; Monterroso-Rivas *et al.*, 2007) (Fig. 1). El clima predominante es el Templado-húmedo C(f), seguido del Semicálido-húmedo (A)C(fm), la temperatura promedio anual oscila entre 12 °C y 19 °C y la precipitación anual varía de 1350 mm a 2200 mm (Manson *et al.*, 2008). Actualmente, la región está dominada por áreas agrícolas (33.4%), bosques perturbados (que incluyen cultivo de café 24%), bosques no perturbados (23.1%), pastizales (16.2%), y algunas zonas urbanas (1.5%) (Manson *et al.*, 2008).

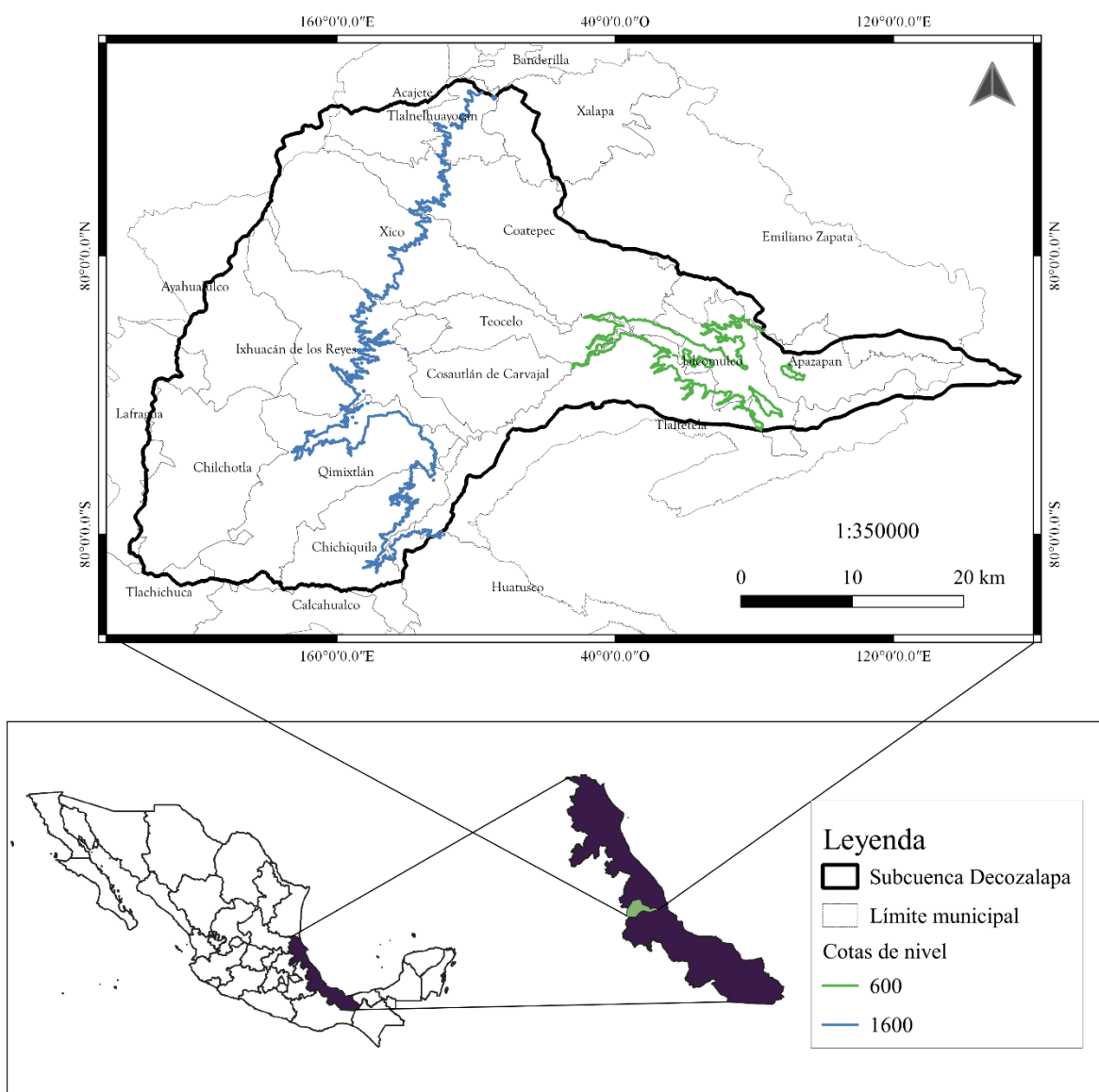


FIGURA 1. Área de estudio, subcuena Decozalapa, México. Las cotas de nivel señalan los límites de intervalo altitudinal óptimo para el cultivo de café en la región.

Registros de presencia y zona de modelado

Para generar los modelos de distribución potencial de *C. arabica* se utilizaron registros de presencia del Herbario XAL del Instituto de Ecología, A.C (Inecol) y de la base de datos de “Plants of the World online” (Kew Science, 2019). Se verificaron las coordenadas de cada registro mediante un sistema de información geográfica y se eliminó la autocorrelación espacial (sesgo del muestreo) con la herramienta Niche Tool box (Osorio-Olvera *et al.*, 2020), con duplicado de base de datos por distancia y un “*threshold distance for duplicates*” (δ) de: 0.0083, para obtener solamente un registro de presencia por píxel, obteniendo un total de 220 puntos de presencia. La zona de modelado se obtuvo mediante una intersección espacial entre los registros obtenidos para *C. arabica* y las provincias biogeográficas de México (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 1997). Con las provincias seleccionadas se generó un buffer de 50 km.

Selección de las variables bioclimáticas actuales y futuras

Las variables bioclimáticas utilizadas fueron: Bio5 (temperatura máxima del mes más cálido), Bio6 (temperatura mínima del mes más frío), Bio13 (precipitación del mes más lluvioso) y Bio14 (precipitación del mes más seco) obtenidas de la base de datos de WorldClim (2016), por ser de cobertura global, robusta y de fácil acceso (Conabio, 2018; Varela, Mateo, García-Valdés y Fernández-González, 2014). Dichas variables coinciden con la tolerancia fisiológica a escala regional para *C. arabica* (Monterroso-Rivas *et al.*, 2007; Gay, Estrada, Conde y Eakin, 2004), representan más de 90% de la variabilidad de los datos, y presentan un coeficiente de correlación de Pearson menor a 0.75 (Austin, 2002), por lo que se considera que las variables ambientales seleccionadas no están correlacionadas y tienen aporte individual y en conjunto hacia el modelo.

Se utilizaron tres modelos de circulación general (MCG): MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y HADGEM2-

ES (Met Office Hadley), por ser correspondientes a los elegidos por la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (Conde, Estrada, Martínez, Sánchez y Gay, 2011). Las proyecciones se llevaron a cabo para el 2050 y 2070 y se utilizaron dos trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés): RCP 4.5 y RCP 8.5, las cuales hacen referencia a la posible gama de valores de forzamiento radiativo para el año 2100 (IPCC, 2014). Las variables bioclimáticas fueron estandarizadas (actuales y futuras), tal como lo recomiendan los autores de MaxLike, restando el promedio de cada escenario y dividiéndolo entre la desviación estándar de la variable correspondiente a condiciones actuales (Royle, Chandler, Yackulic y Nichols, 2012; Chandler, Royle y Kindt, 2017).

Modelos de distribución potencial

Se utilizó el algoritmo MaxLike ver. 0.1-7 (Royle *et al.*, 2012), así como las librerías raster ver. 2.5-8, rgdal ver. 1.2-8, sp ver. 1.2-5, tcltk2 ver. 1.2-11, grid ver. 3.3-3, lattice ver. 0.20.34 y maptools ver. 0.9-2 en la plataforma de programación R versión. 3.5.3 (R Core Team, 2019). Se realizó un total de 2000 iteraciones, seleccionando al azar 65% de los registros para entrenamiento del modelo y 35% para validación cruzada. Es importante dividir los datos dado que los mejores resultados se obtienen en una proporción de 20%-30% de los datos para las pruebas y 70%-80% para entrenamiento (Gholamy, Kreinovich, y Kosheleva, 2018). Una vez generado cada modelo a condiciones actuales (producto de una iteración), este debía cumplir lo siguiente: converger (encontrar una solución a los parámetros que maximizan la probabilidad que es igual a 1), no tener datos faltantes (presencia de NoData) y presentar una proporción de errores de omisión menor o igual a 10% (Estrada-Contreras *et al.*, 2016). Cumpliendo lo anterior, se utilizaron los coeficientes del modelo actual para proyectar la distribución potencial a futuro de la especie.

El mapa consenso (Anderson, Lew y Peterson, 2003) se obtuvo al promediar los siete mapas obtenidos tanto para



condiciones actuales como para las proyecciones a futuro. Se consideró como indicativo de la probable existencia de cada especie el valor mínimo de probabilidad de presencia que fue 0.342553, obtenido mediante una extracción de los valores del mapa de distribución potencial a condiciones actuales con las coordenadas de todos los registros usados en la generación de los modelos (entrenamiento y validación). Este valor mínimo es denominado por Pearson, Raxworthy, Nakamura y Townsend-Peterson (2007) como el "umbral de presencia más bajo" (LPT, 'lowest presence threshold') el cual puede ser interpretado ecológicamente como la identificación de píxeles predichos que son al menos tan adecuados como aquellos en los que la presencia de la especie ha sido registrada.

Para evaluar el modelo a condiciones actuales se utilizó el análisis ROC-parcial (*Receiver Operating Characteristic*) mediante la herramienta "Tool for Partial-ROC" versión 1.0. (Barve, 2008). Este es una modificación de la curva ROC original para superar problemas en la evaluación de modelos de distribución de especies (Lobo, Jiménez-Valverde y Real, 2007), es decir, la inclusión en el cálculo de la AUC (*area under the curve*) da la gama completa de áreas proporcionales en el área de estudio, así como un mismo peso a los errores de omisión y comisión (Peterson, Papes y Soberón, 2008).

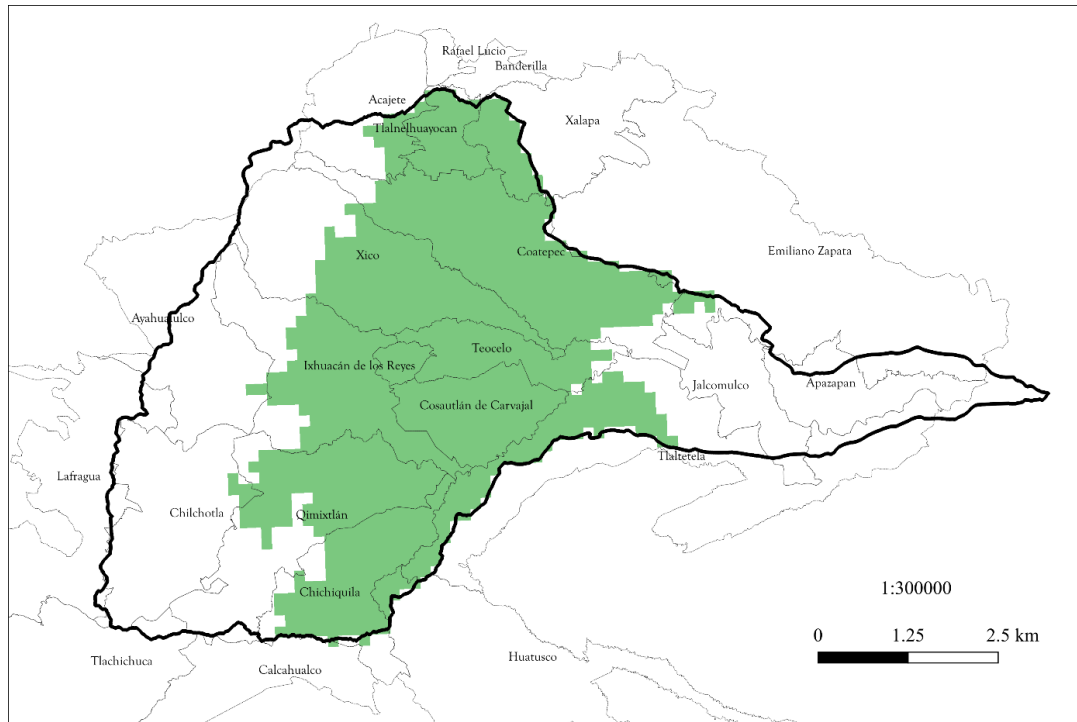
Los resultados de ROC-parcial se presentan como la relación entre el modelo AUC en contraste con lo esperado simplemente por azar (referido como "AUC radios"). Para evaluar la significancia estadística de AUC se hizo el recuento del número de repeticiones ("bootstrap") con valores de "AUC radios" < 1 , con selección aleatoria de 50% de los registros utilizados en la generación de los modelos actuales y un remuestreo con reemplazo de 1000 iteraciones cada uno, acorde con la propuesta de Peterson *et al.* (2008). Una vez obtenidos los modelos de distribución potencial, se realizó un corte con el perímetro de la cuenca Decozalapa. Los mapas resultantes indican para cada píxel la probabilidad de presencia de la especie en cuestión, y el mapa de salida es de tipo raster en formato TIF.

RESULTADOS

La evaluación del mapa de distribución potencial a condiciones actuales de *C. arabica* con la herramienta ROC-parcial produjo valores de la variable AUC radio que van desde 1.495 hasta 1.765, con un valor de omisión de 5%, por lo que los modelos obtenidos son adecuados y estadísticamente significativos basados en el recuento de las repeticiones con valores de AUC radio < 1 (Peterson *et al.*, 2008). Una vez que se realizó el proceso de "extracción" de los valores de probabilidad de presencia a condiciones actuales con todos los registros de *C. arabica* utilizados para generar los modelos, se obtuvo un valor mínimo de probabilidad de presencia potencial de 0.34 ($p < 0.05$). Por lo tanto, se considera este valor como indicativo de la "presencia probable" para el cultivo, tanto para el mapa actual, como para los proyectados a condiciones futuras.

El modelo de distribución potencial actual (Fig. 2) indica condiciones adecuadas para la presencia de *C. arabica* en un área aproximada de 924.5 km², ocupando 57.78% de la subcuenca Decozalapa, ubicada en la parte central y abarcando los municipios de Xalapa, Tlalnahuayocan, Coatepec, Xico, Teocelo, Ixhuacán de los Reyes y Tlaltetela del estado de Veracruz y dos municipios de estado de Puebla: Quimixtlán y Chichiquila. Todos ellos con presencia del cultivo de café. Sin embargo, al compararlo con los mapas de distribución potencial a futuro, se observa una reducción que va de 4.74% (escenario RCP 4.5, modelo MPI-ESM-LR al 2050), hasta 61.67% (escenario RCP 8.5, modelo GFDL-CM3 al 2070) (Tabla 1; Fig. 3, 4 y 5).

El intervalo de altitud estimado para la distribución potencial actual oscila desde 589 m hasta 2262 m s.n.m., con un promedio de 1405 m s.n.m., no obstante, al compararlo con los MCG en diferentes escenarios, existe una variación que va de 725 m a 1397 m s.n.m. en la altitud mínima potencial y de 2221 m a 2308 m s.n.m. en la altitud potencial máxima (Tabla 2). Lo que implicaría una posible pérdida en el límite inferior en la idoneidad climática donde actualmente se cultiva café y una ganancia en el límite superior, es decir, habrá un "desplazamiento" de las condiciones adecuadas cuesta arriba (Läderach *et al.*, 2017).

FIGURA 2. Distribución potencial actual para *C. arabica* L. en la subcuenca Decozalapa.TABLA 1. Pérdida de áreas de distribución potencial bajo diferentes escenarios de cambio climático de *C. arabica* en la subcuenca Decozalapa.

<i>Modelos de Circulación General</i>	<i>Escenario</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Diferencia entre área actual y futura (%)</i>
GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)	Potencial actual	924.50	100
	RCP 4.5 a 2050	779.16	-15.72
	RCP 4.5 a 2070	704.34	-23.81
	RCP 8.5 a 2050	707.78	-23.44
	RCP 8.5 a 2070	354.32	-61.67
HADGEM2-ES (Met Office Hadley)	RCP 4.5 a 2050	824.74	-10.79
	RCP 4.5 a 2070	790.34	-14.51
	RCP 8.5 a 2050	798.94	-13.58
	RCP 8.5 a 2070	709.5	-23.25
MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute)	RCP 4.5 a 2050	880.64	-4.74
	RCP 4.5 a 2070	814.42	-11.91
	RCP 8.5 a 2050	811.84	-12.19
	RCP 8.5 a 2070	778.30	-15.81



TABLA 2. Altitud mínima, máxima y promedio de las áreas de distribución potencial actual y diferentes escenarios de cambio climático a futuro de *C. arabica* L. en la subcuenca Decozalapa.

Modelos de Circulación General	Escenarios	Altitud de presencia potencial		
		mínima (m s.n.m.)	máxima (m s.n.m.)	promedio (m s.n.m.)
	Potencial actual	589	2 262	1 405
GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)	RCP 4.5 a 2050	903	2 262	1 516
	RCP 4.5 a 2070	951	2 274	1 567
	RCP 8.5 a 2050	925	2 221	1 550
	RCP 8.5 a 2070	1 397	2 221	1 756
HADGEM2-ES (Met Office Hadley)	RCP 4.5 a 2050	799	2 292	1 522
	RCP 4.5 a 2070	906	2 306	1 560
	RCP 8.5 a 2050	906	2 306	1 559
	RCP 8.5 a 2070	1 052	2 306	1 627
MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute)	RCP 4.5 a 2050	725	2 292	1 487
	RCP 4.5 a 2070	799	2 290	1 521
	RCP 8.5 a 2050	903	2 292	1 528
	RCP 8.5 a 2070	906	2 308	1 570

Respecto a los cambios proyectados de temperatura a futuro, los MCG indican un incremento en la temperatura del aire, tanto para la proyección al año 2050 como para el 2070 (Fig. 6). Por ejemplo, el escenario RCP 4.5, modelo MPI-ESM-LR al 2050, estima un incremento mínimo de 1.1 °C en la temperatura mínima del mes más frío (Fig. 6a) y en el escenario RCP 8.5 del modelo GFDL-CM3 al 2070 un aumento de hasta 3.5 °C en la temperatura máxima del mes más cálido (Fig. 6b), lo cual tendrá consecuencias en la distribución de *C. arabica*.

En cuanto a precipitación, las proyecciones de los diferentes MCG son dispares (Fig. 7), pues en algunos casos se presentan incrementos de hasta 73 mm (escenario RCP 4.5, modelo MPI-ESM-LR al 2070) (Fig. 7b) y en otros una disminución drástica de hasta 69 mm (escenario RCP 8.5, modelo MPI-ESM-LR al 2050) (Fig. 7a), ambos en el mes más húmedo.

DISCUSIÓN

El café requiere un determinado régimen hidrotérmico para su desarrollo, particularmente una temperatura de entre 15 °C y 24 °C con umbrales críticos mínimos de 14 °C y mayores a 27 °C, una precipitación de entre 1500 mm y lo 2500 mm y un intervalo en altitud que varía de 600 m a 1600 m s.n.m. (Monterroso-Rivas *et al.*, 2007; Fain *et al.*, 2017). Estas condiciones, según los MCG, se verán modificadas de tal forma que se estima la pérdida de áreas con idoneidad climática de al menos 4.74% (43.8 km²), en el escenario más optimista, hasta 61.67% (570.1 km²), en el escenario más pesimista (Tabla 1 y Fig. 3, 4 y 5); de tal forma que, al menos cuatro municipios cafetaleros (Teocelo, Cosautlán de Carvajal, Ayahualulco y Tlaltetela), así como gran parte de Xico, Coatepec y Xalapa (Fig. 3) no reunirían las condiciones bioclimáticas adecuadas para el desarrollo del cultivo (escenario RCP 8.5, modelo GFDL-CM3 al 2070).

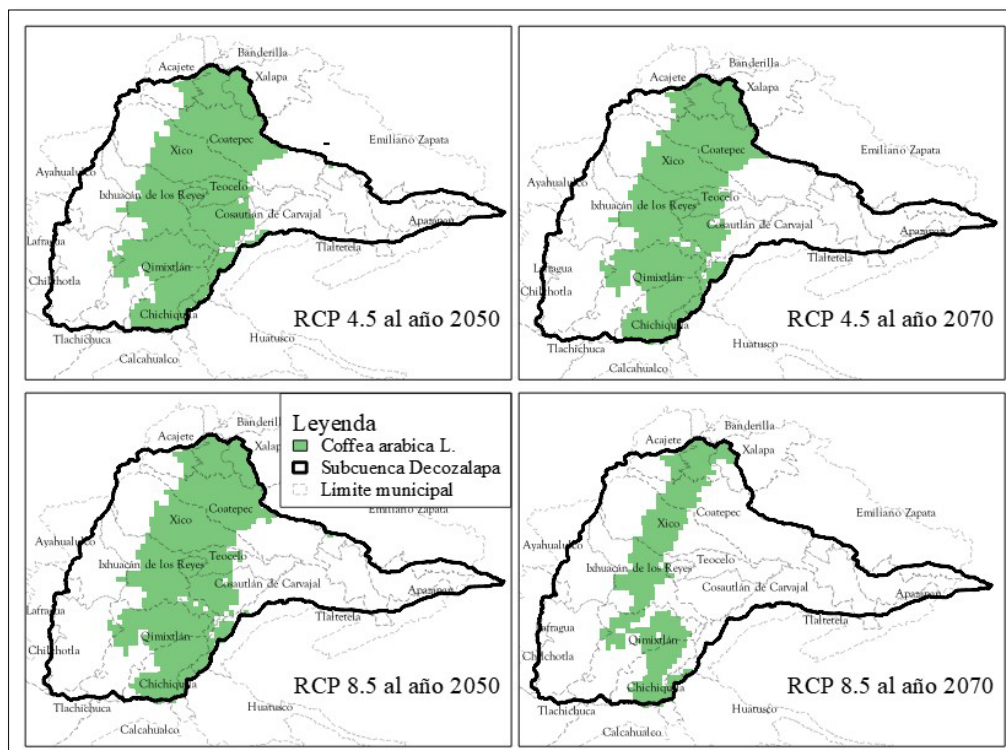


FIGURA 3. Proyecciones bajo diferentes escenarios de cambio climático del modelo GFDL-CM3 en la distribución potencial futura de *C. arabica* L. en la subcuenca Decozalapa.

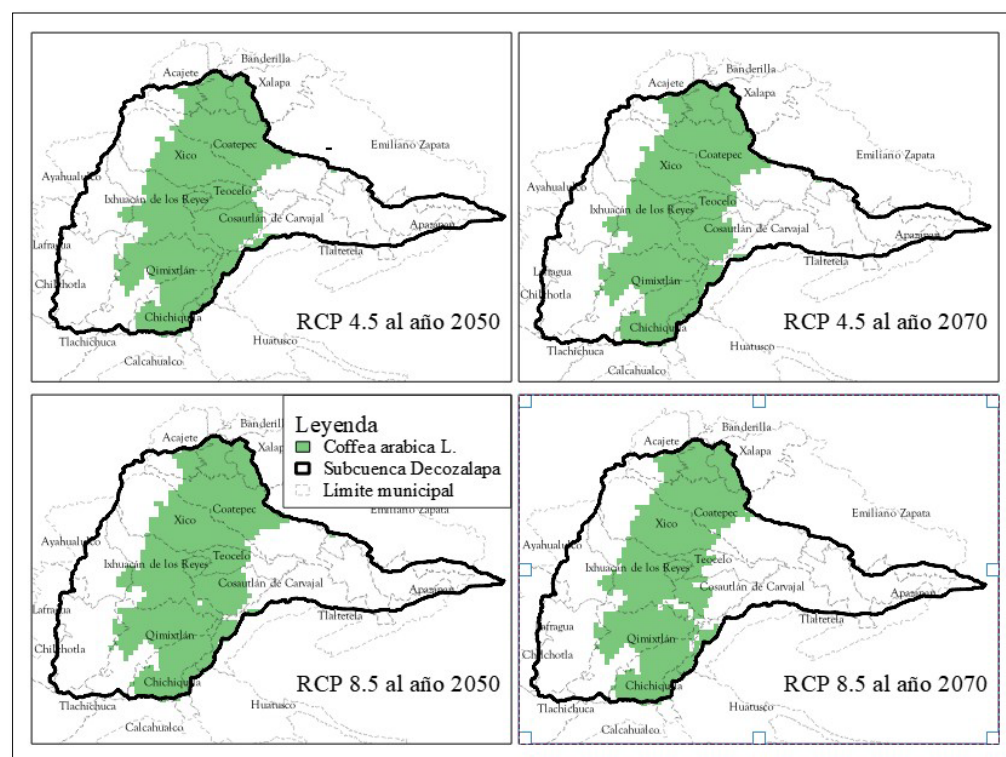


FIGURA 4. Proyecciones bajo diferentes escenarios de cambio climático del modelo HADGEM2-ES en la distribución potencial futura de *C. arabica* L. en la subcuenca Decozalapa.

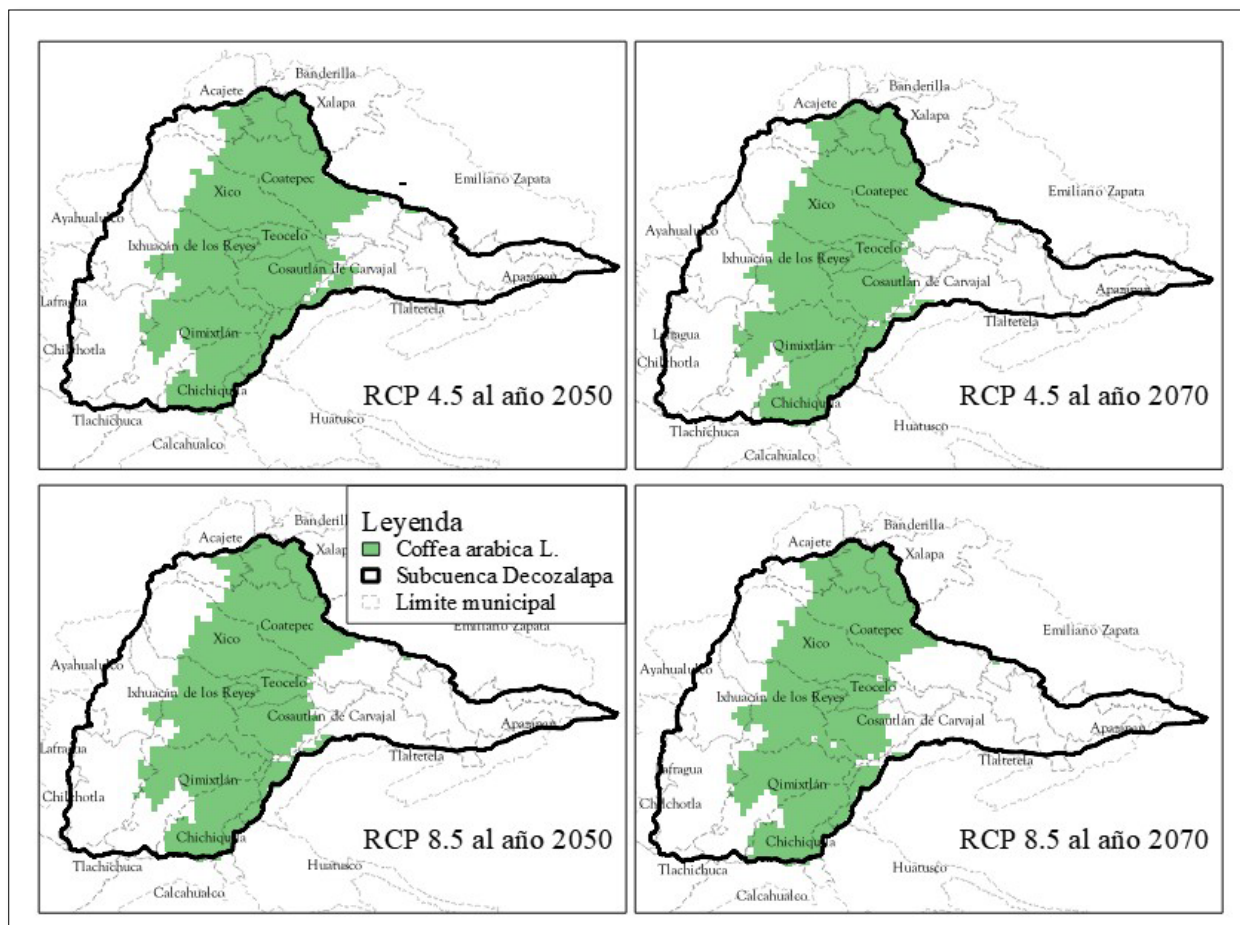


Figura 5. Proyecciones bajo diferentes escenarios de cambio climático del modelo MPI-ESM-LR en la distribución potencial futura de *C. arabica* L. en la subcuenca Decozalapa.

Estos resultados son diferentes a las proyecciones realizadas por Ovalle-Rivera *et al.* (2015) para el año 2050, cuyos resultados indican una pérdida promedio de 29% para la región cafetalera del centro de Veracruz.

Lo anterior podría inducir impactos socioeconómicos y ambientales adversos, pues la demanda del cultivo continua. Estos impactos estarían principalmente asociados con la deforestación para la apertura de nuevas áreas de siembra, además de condiciones adversas para el cultivo (suelos pobres, pendientes inclinadas, grandes distancias de los centros de consumo, etc.), conflictos con áreas protegidas o de otros usos, etc. (Bunn, Läderach, Jimenez, Montagnon, Schilling, 2015; Pham, Reardon-Smith, Mushtaq y Cockfield, 2019). Por lo que para valorar

adecuadamente las pérdidas de estas zonas es necesaria investigación adicional a escala local.

Así mismo, se estima que la altitud mínima actual donde se presentan las características de idoneidad climática potencial para el cultivo de café pasaría de 589 m s.n.m. a un promedio mínimo para el 2050 de 725 m s.n.m., en el escenario más optimista, y hasta 925 m s.n.m., en el más pesimista. Para el año 2070, este desplazamiento llegaría hasta 1397 m s.n.m. (un movimiento de 808 m s.n.m.) (Tabla 2). En el caso del límite superior se estima como altitud máxima la cota de 2262 m s.n.m., la cual podría incrementarse hasta 2306 m s.n.m. en el 2050, hasta 2308 m s.n.m. en el 2070.

Estos resultados contrastan con lo obtenido por Baca, Läderach, Hagggar, Schroth y Ovalle (2014), quienes estimaron en sus proyecciones para México un intervalo de idoneidad climática entre 1200 m y 2300 m s.n.m., posiblemente por su carácter regional. Así mismo, Schroth *et al.* (2009) calcularon para Chiapas una disminución drástica de la idoneidad para el cultivo de café en altitudes menores a 1100 m - 1200 m s.n.m. Esto, para la subcuenca Decozolapa, implicaría un desplazamiento de las condiciones adecuadas cuesta arriba (Isaza Ramírez y Cornejo Hurtado, 2014). No obstante, no es posible asegurar esa hipótesis, pues Sáenz-Romero *et al.* (2010) señalan que 100 m de altitud en promedio por cada 0.5 °C de aumento de temperatura son necesarios para adaptarse a las nuevas condiciones climáticas.

En tal sentido, los factores clave de los cambios proyectados en la adecuación bioclimática para el cultivo del café son la temperatura y precipitación (Phan *et al.*, 2019). Aunque estudios indican que la precipitación (anual y estacional) es de menor importancia en comparación con las temperaturas para determinar la idoneidad (Bunn *et al.*, 2015; Gay, Estrada, Conde, Eakin y Villers, 2006). En el caso de los modelos estudiados para la subcuenca Decozolapa habrá un incremento en las temperaturas desde 1.1 °C hasta 3.5 °C, según el tipo de escenario (Fig. 6), estos cambios afectarán los ciclos de producción y calidad del café, ya que temperaturas arriba de 23 °C aceleran la maduración del fruto, mientras que, por encima de los 25 °C, se reduce la tasa fotosintética, y cerca de 30 °C se detiene el crecimiento de la planta. En general, las temperaturas altas pueden causar anomalías en hojas y flores (Café y Clima, 2016) pues, como sugieren Bunn *et al.* (2015), el café es muy sensible al cambio climático y un incremento de temperatura reducirá su rendimiento entre 22% y 27%, sin considerar el efecto de la deforestación (Loreto, Esperón-Rodríguez y Barradas, 2017), hasta 34% (Gay *et al.*, 2006). Este panorama ya ha sido establecido por Läderach *et al.* (2017) y Ovalle-Rivera *et al.* (2015), quienes estiman que el calentamiento global provocará en el año 2050 un aumento en las temperaturas máximas y medias de

2 °C, afectando no solo a las regiones cafetaleras de México, sino de todo Centroamérica (IPCC, 2014).

Con respecto a las precipitaciones, los resultados indican variaciones que van desde un aumento (73 mm) hasta una reducción drástica (-69 mm) en el mes más húmedo, así como variaciones marginales (-4.5 mm a 3 mm) para el mes más seco (Fig. 7). A pesar de que estas no serían significativas para el desarrollo del cultivo (la precipitación anual en la región varía de 1350 mm a 2200 mm) (Manson *et al.*, 2008), pues el óptimo oscila entre 1500 mm y 2500 mm (Gay *et al.*, 2006), no se tiene certeza en su distribución a lo largo del año, lo cual puede ser más importante que el total anual, porque el suministro de agua en algunas etapas del desarrollo del fruto puede ser crucial.

Este es el caso de la precipitación de primavera, donde la floración tiene lugar justo después de las primeras lluvias, requiriendo previamente de un corto periodo de secas donde, si no hay suficiente agua, las flores (y consecuentemente los frutos) no se producen y, por el contrario, las fuertes lluvias podrían ocasionar una floración errática, una maduración incompleta y la caída de la fruta (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015). Por ejemplo, Gay *et al.*, (2006) señalan que un cambio en el promedio de lluvia de primavera de 47.87 mm, en una proyección para el 2020, traería una caída de 24% en la producción y los cambios en la temperatura y las precipitaciones podrían causar una reducción de hasta 34% en producción de café en Veracruz.

Lo cierto es que las medidas de adaptación a las condiciones climáticas extremas no son sencillas, obligando a los productores a adaptarse a los cambios futuros, incluso si son graduales (Gay *et al.*, 2006), pues adicionalmente, las variables climáticas también controlan la incidencia de plagas y enfermedades graves como la roya (*Hemileia vastatrix*) y el barrenador del café (*Hypothenemus hampei*), que podrían reducir el rendimiento y la calidad del café y aumentar los costos de producción (Pham *et al.*, 2019). Läderach *et al.* (2017) sugieren que, bajo estas circunstancias, se requiere de una adaptación transformadora de los productores, la cual puede incluir la reconfiguración de uno o más medios de vida, incluyendo el traslado a otra industria o región. No obstante, los



productores de café en Veracruz han demostrado una capacidad limitada para adaptarse a los factores de estrés climáticos y económicos y esta seguirá siendo reducida si prevalecen las políticas gubernamentales y las condiciones

del mercado internacional (Gay *et al.*, 2006). Aunque cabe señalar que actualmente se están haciendo algunos esfuerzos para atender la situación.

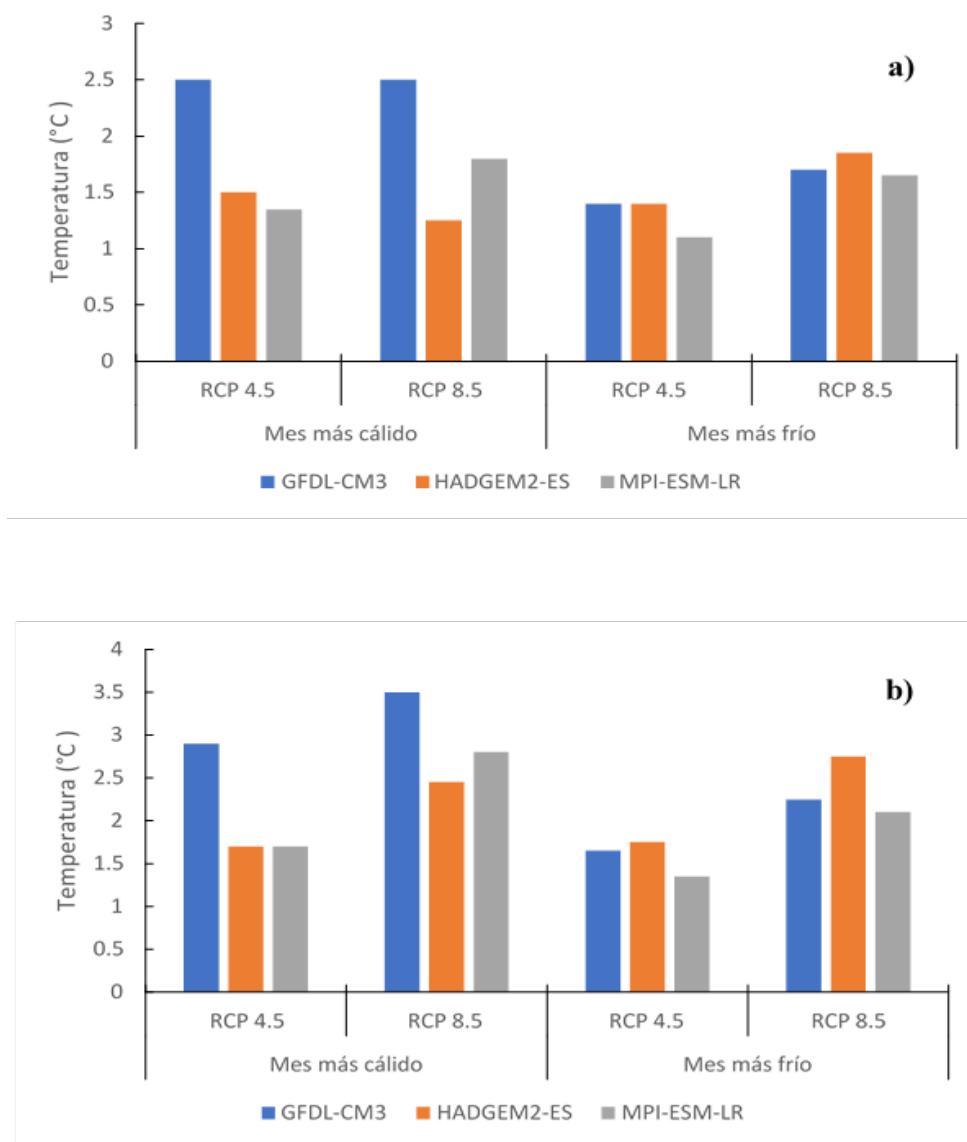


FIGURA 6. Variación promedio de la temperatura máxima del mes más cálido y mínima del mes más frío, con relación en la línea base de la distribución potencial actual para 2050 (a) y 2070 (b). Usando tres modelos de circulación general, (GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR).

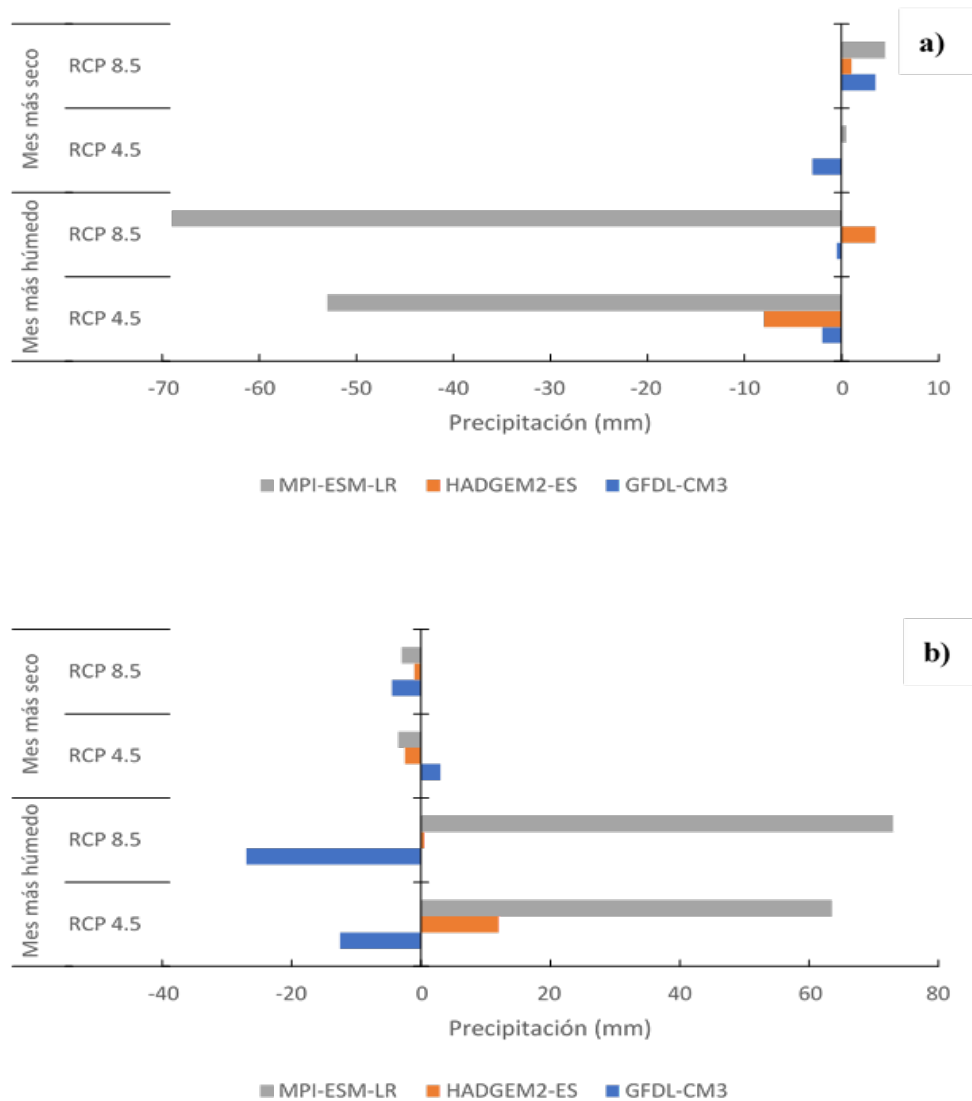


FIGURA 7. Variación de la precipitación promedio del mes más húmedo y del mes más seco con relación en la línea base de la distribución potencial actual para 2050 (a) y 2070 (b). GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR.

CONCLUSIONES

Los modelos estudiados para la cuenca Decozolapa indican que habrá una pérdida del área de distribución potencial para *C. arabica* al modificarse la altitud y el régimen hidrotérmico para su desarrollo, de tal forma que las predicciones más pesimistas para el año 2070 sugieren la afectación de la zona cafetalera, incluyendo la desaparición de cuatro de los principales municipios productores. El aumento de la temperatura cambiará las condiciones idóneas para el cultivo del café desplazándolo a latitudes

superiores y, aunque el modelo no indica que los cambios en la precipitación en sí mismos sean significativos para que haya un cambio en la distribución potencial del café, es necesario aumentar la certidumbre de los modelos (particularmente con la distribución de la lluvia) a escala local para hacer proyecciones futuras climáticas más precisas. Finalmente, es arriesgado ignorar los impactos potenciales que el clima presente y futuro pueden tener en el cultivo, especialmente si se produce un cambio en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos, por



lo que se requiere tomar medidas de adaptación y mitigación específicas, tales como la diversificación productiva de la finca y la agroforestería, junto con la formulación, implementación y evaluación de políticas medioambientales.

RECONOCIMIENTOS

La primera autora agradece el financiamiento otorgado por el Conacyt con la beca de manutención de Maestría (No. CVU 744813) para la realización este trabajo. Al Dr. René A. Palestina Guerrero su apoyo para resolver algunas dudas relacionados con el procesamiento de imágenes.

REFERENCIAS

- Anderson, R. P., Lew, D. & Peterson, A. T. (2003). Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162(3), 211-232. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00349-6
- Austin, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157, 101-118
- Ávila-Flores, B. (2015). *Un estudio sobre la percepción del riesgo de poblaciones vulnerables al cambio climático en la cuenca del Papaloapan*. Tesis Doctoral, Doctorado en Investigación Educativa, Universidad Veracruzana, México.
- Baca, M., Läderach, P., Haggard, J., Schroth, G., & Ovalle, O. (2014). An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. *PLoS ONE*, 9(2), e88463. doi: 10.1371/journal.pone.0088463
- Barve, N. (2008). Tool for Partial-ROC. Version 1. Lawrence, KS: Biodiversity Institute. Recuperado de <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/10059>
- Bunn, C., Läderach, P., Jimenez, J. G. P., Montagnon, C., & Schilling, T. (2015). Multiclass classification of agro-ecological zones for Arabica coffee: an improved understanding of the impacts of climate change. *PLoS ONE*, 10(10), e0140490. doi: 10.1371/journal.pone.0140490
- Café & Clima. (2016). *La adaptación al cambio climático en la producción de café. Una guía paso a paso para apoyar a los productores de café en la adaptación al cambio climático*. Recuperado de https://toolbox.coffeeandclimate.org/wp-content/uploads/cc-step-by-step-guide-for-climate-change-adaptation-in-coffee-production_SPANISH.pdf
- Chandler, R., Royle, A. & Kindt, R. (2017). Model species distributions by estimating the probability of occurrence using presence-only data. Package 'maxlike'. Version 0.1-7. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages>
- Chemura, A., Kutwayo, D. Chidoko, P., & Mahoya C. (2016). Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica* L.) production in Zimbabwe. *Regional Environmental Change*, 16(2), 473-485. doi: 10.1007/s10113-015-0762-9
- Chemura, A., Mudereri, B. T., Yalew, A.W. & Gornott C. (2021). Climate change and specialty coffee potential in Ethiopia. *Sci Rep* 11, 8097. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87647-4>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2018). *Nichos y Áreas de Distribución. Comisión Nacional de Biodiversidad, Universidad de Kansas*. México: Conabio.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (1997). Provincias biogeográficas de México. Escala 1:4000000. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, México, D.F.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1), 125-140
- Contreras, H. A. (2008). Retos en la organización de un proyecto de investigación acción. En R. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, & K. Mehlreter, (Eds.), *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, manejo y conservación* (pp. 35-54). México: Instituto Nacional de Ecología e Instituto de Ecología, A.C.
- Duan, R. Y., Kong, X. Q., Huang, M.Y., Varela, S., & Ji, X. (2016). The potential effects of climate change on amphibian distribution, range fragmentation and turnover in China. *PeerJ* 4, e2185. doi: 10.7717/peerj.2185
- Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Laborde, J., Martínez-Meyer, E., & Sánchez-Velásquez, L. (2016). Current and Future Distribution of the Tropical Tree *Cedrela odorata* L. in Mexico under Climate Change Scenarios Using MaxLike. *PLoS ONE*, 11(10), e0164178. doi:10.1371/journal.pone.0164178
- Fain, S. J., Quiñones, M., Álvarez-Berrios, N. L., Parés-Ramos, I. K. & Gould, W.A. (2017). Climate change and coffee: assessing vulnerability by modeling future climate suitability in the Caribbean Island of Puerto Rico. *Climatic Change*, 146(1-2), 175-86. doi: 10.1007/s10584-017-1949-5
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C. & Eakin, H. (2004). Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). En: C.D. Líaño, J.C. García, D.F. Rasilla, P. Fernández de Arróyabe & C. Garmendia

- (Eds.), *El Clima entre el mar y la montaña. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria* (pp. 651-660), Santander, España.
- Gay, F., Estrada, C., Conde, H., Eakin, & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change* 79, 259-288. doi: 10.1007/s10584-006-9066-x
- Gholamy, A., Kreinovich, V., & Kosheleva, O. (2018). Why 70/30 or 80/20 relation between training and testing sets: A pedagogical explanation. Departmental Technical Reports (CS). 1209. Recuperado de: https://digitalcommons.utep.edu/cs_techrep/1209.
- González-Hernández, H. A. & Hernández-Santana, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, 90, 105-118. doi: 10.14350/ig.49329
- Hannah, L., Donatti, C. I., Harvey, C. A., Alfaro, E., Rodríguez, D. A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Díaz, F., Fung, E., Hidalgo, H. G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J. P., & Solano, A.L. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change*, 141(1), 29-45. doi: 10.1007/s10584-016-1867-y
- Harmeling, S. & Eckstein, D. (2012). *Global Climate Risk Index 2013. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2011 and 1992 to 2011*. German Watch, Bonn and Berlin, Germany.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2010). *Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición: 2.0, subcuenca hidrográfica RH28Bf R. Decozalapa/Cuenca R. Jamapa y otros /R.H. Papaloapan*. Recuperado de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Isaza-Ramírez, C. H. & Cornejo-Hurtado, J. M. (2014). *Cambio climático y su impacto en el cultivo del café*. Norad.
- Kew Science. (2019). *Plants of the World online*. Recuperado de <http://powo.science.kew.org/>
- Läderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramirez, J., Portilla, E. P., Schepp, K. & Eitzinger A. (2011). Predicted impact of climate change on coffee supply chains, En W. Leal-Filho (Eds.), *The economic, social and political elements of climate change* (pp. 703-723), Springer, Berlin.
- Läderach, P., Ramírez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martínez-Valle, A. & Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic change*, 141(1), 47-62. doi: 10.1007/s10584-016-1788-9
- Lobo, J., Jiménez-Valverde, A. & Real, R. (2007). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 145-151. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x
- López-García, F. J., Escamilla-Prado, E., Zamarripa-Colmenero, A., & Cruz-Castillo, J. G. (2016). Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 39(3), 297-304.
- Loreto, D., Esperón-Rodríguez, M., & Barradas V.L. (2017). The climatic-environmental significance, status and socio-economic perspective of the grown-shade coffee agroecosystems in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 92, 87-100. doi: 10.14350/ig.51876
- Manson, R., Contreras, A. & López-Barrera, F. (2008). Estudios de la biodiversidad en cafetales. En R. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (Eds.), *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, manejo y conservación* (1-14). México. Instituto de Ecología, A.C.
- Monterroso-Rivas, A. I., Conde-Álvarez, A. C., Gay-García, C., Gómez-Díaz, J. D. & López-García, J. (2012). Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología*. 8, 881-890
- Monterroso-Rivas, A. I., Conde-Álvarez, A. C., Gómez-Díaz, J. D., & López-García, J. (2007). Vulnerabilidad y riesgo en agricultura por cambio climático en la Región Centro del estado de Veracruz, México. *Zonas áridas*, 11(1), 47-60
- Osorio-Olvera, L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Townsend, P. A., Falconi, M., Contreras-Díaz, R.G., Martínez-Meyer, E., Barve, V. & Barve, N. (2020). NTBOX: An R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*. doi:10.1111/2041-210X.13452
- Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C. & Obersteiner, M. (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS ONE*, 10(4), e0124155. doi: 10.1371/journal.pone.0124155.
- Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M. & Townsend-Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117. doi:10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x
- Peterson, A. T., Papes, M. & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche



- modeling. *Ecological modelling*, 213(1), 63-72. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008
- Pham, Y., Reardon-Smith, K., Mushtaq S., & Cockfield G. (2019). The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review. *Climatic Change*, 156:609–630. doi: 10.1007/s10584-019-02538-y
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. Recuperado de <https://www.R-project.org/>
- Rivera-Silva, M. D. R., Nikolskii-Gavrilov, L., Castillo-Álvarez, M., Ordaz-Chaparro, V. M., Díaz-Padilla, G. & Guajardo-Panes, R. A. (2013). Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313.
- Royle, J., Chandler, R., Yackulic, C., & Nichols, J. (2012). Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(3), 545-554, doi: 10.1111/j.2041-210X.2011.00182.x
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595–623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Schroth, G., & Ruf, F. (2014). Farmer strategies for tree crop diversification in the humid tropics. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 139-154. doi: 10.1007/s13593-013-0175-4
- Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S.M., Hagggar, J.P., Eakin, H., Castillejos, T., Garcia-Moreno, J., Soto-Pinto, L., Hernandez, R., Eitzinger, A. & Ramirez-Villegas, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14, 605-625. doi:10.1007/s11027-009-9186-5
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat]. (2014). *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018*. México.
- Varela, S., Mateo R. G., García-Valdés, R., & Fernández-González, F. (2014). Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Ecosistemas*, 23(1), 46-53. doi: 10.7818/ECOS.2014.23-1.07
- WorldClim. (2016). *Free climate data for ecological modeling and GIS*. Recuperado de <http://www.worldclim.org>
- Manuscrito recibido el 13 de mayo de 2020
Aceptado el 14 de julio de 2020
Publicado el 21 de diciembre de 2021
- Este documento se debe citar como:
Gómez-Tosca, E. G., Alvarado-Castillo, G., Benítez, G., Cerdán-Cabrera, C. R., & Estrada-Contreras, I. (2021). Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722070. doi: 10.21829/myb.2021.2722070
- Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.

