



APTITUD DE LOS CULTIVOS DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*) Y CACAO (*THEOBROMA CACAO L.*) CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

APTITUDE OF COFFEE (*COFFEA ARABICA L.*) AND CACAO (*THEOBROMA CACAO L.*) CROPS CONSIDERING CLIMATE CHANGE

Ulises Gildardo Quiroz Antunez¹ , Alejandro Ismael Monterroso Rivas² ,
María Fernanda Calderón Vega³ y Adán Guillermo Ramírez García*⁴

¹Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora. Código Postal 85000, Ciudad Obregón, México.

²Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Código Postal 56230, Chapingo, México.

³Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Vida. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Código Postal EC090112, Guayaquil, Ecuador.

⁴Centro Regional Universitario del Noroeste. Universidad Autónoma Chapingo. Código Postal 8500, Ciudad Obregón, México.

*Autor para correspondencia: gramirezg@taurus.chapingo.mx

Manuscrito recibido el 27 de julio de 2020. Aceptado, tras revisión, el 01 de junio de 2021.

Resumen

Se evaluaron las zonas de aptitud actual y futura para los cultivos de cacao (*Theobroma cacao L.*) y café (*Coffea arabica L.*), en escenarios de cambio climático en la región del Soconusco, Chiapas, México y se definieron las áreas donde aumentó o disminuyó la aptitud de la tierra. Lo anterior permite tener información para recomendar su manejo y conservación. Se emplearon dos metodologías: ponderación de factores y factores limitantes; ambas con base en los valores óptimos y extremos de tolerancia de cada cultivo para cada requerimiento edafoclimático. Con la primera, se determinaron las áreas potenciales para el establecimiento de los cultivos; con la segunda, se diferenciaron las combinaciones de las variables ambientales que tuvieron lugar dentro del área de estudio. Se evaluaron escenarios de cambio climático y se determinó la distribución y superficies de aptitud. Además, se realizó una comparación entre aptitud actual y futura de ambos cultivos para cuantificar el impacto del cambio climático. Los resultados indican que la aptitud futura de la tierra tendrá una disminución de las áreas potenciales para el establecimiento de ambos cultivos de entre 4,5 y 4,8% para café y de 7,2 a 9,3% para cacao.

Palabras clave: Biodiversidad, Chiapas, Soconusco, sistemas agroforestales, sustentabilidad.

Abstract

The areas of current and future aptitude for cocoa (*Theobroma cacao* L.) and coffee (*Coffea arabica* L.) crops were evaluated, in climate change scenarios in the Soconusco region, Chiapas, Mexico and the areas where the aptitude of the land increased or decreased were defined. The above provides information to recommend its management and conservation. Two methodologies were used: weighting of factors and limiting factors; both based on the optimal and extreme tolerance values of each crop for each edaphoclimatic requirement. First one, for the determination of potential areas for the establishment of crops; the second one, for differentiation of the combinations of environmental variables that took place within the study area. Climate change scenarios were evaluated and the distribution and aptitude areas were determined. Also, a comparison was made between current and future suitability for both crops to quantify the impact of climate change. The results indicate that the future aptitude of the land will have a decrease in the potential areas for the establishment of both crops that range between 4.5 and 4.8% for coffee and from 7.2 to 9.3% for cocoa.

Keywords: Biodiversity, Chiapas, Soconusco, Agroforestry systems, Sustainability.

Forma sugerida de citar: Quiroz Antunez, U., Monterroso Rivas, A., Calderón Vega, M., y Ramírez García, A. (2022). Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. [Acceso Temprano]. <http://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>.

IDs Orcid:

Ulises Gildardo Quiroz Antunez: <http://orcid.org/0000-0001-9187-8473>

Alejandro Ismael Monterroso Rivas: <http://orcid.org/0000-0003-4348-8918>

María Fernanda Calderón Vega: <http://orcid.org/0000-0002-5191-7527>

Adán Guillermo Ramírez García: <http://orcid.org/0000-0002-1711-5942>

1 Introducción

El trópico mexicano presenta condiciones agroecológicas apropiadas para el desarrollo de cultivos perennes, como el cacao (*Theobroma cacao* L.) y el café (*Coffea arabica* L.), especies que se distribuyen en forma natural en los estratos medios de las selvas cálidas húmedas; sin embargo, la situación por la que atraviesan los bosques y selvas del mundo es preocupante y difícil, debido a múltiples factores como la tala no controlada, el aumento de la frontera agrícola, la ganadería extensiva, los cambios climáticos que repercuten en el aumento del número de incendios forestales, aumento en la incidencia de plagas y enfermedades, inundaciones y el crecimiento de la población, entre otras (Roa-Romero, Salgado-Mora y Álvarez-Herrera, 2009).

El cambio climático se compone de una serie de eventos meteorológicos que tienen influencia en el funcionamiento de los sistemas naturales; se manifiesta en alteraciones en la biodiversidad de los ecosistemas, en la productividad y fuentes de alimentos y, por consiguiente, en la cotidianidad humana. Existe un creciente interés por entender los procesos que componen el cambio climático y su influencia en la dinámica del ciclo de carbono en los ecosistemas naturales, ya que las plantas son fundamentales en el balance global de este gas, por su capacidad de absorber CO_2 mediante la fotosíntesis, secuestrarlo en forma de celulosa o transformarlo en otro tipo de compuesto orgánico (Yepes y Buckeridge, 2011; Fatichi y col., 2016; Baumgartner, Esperón-Rodríguez y Beaumont, 2018; Beaumont y col., 2019; Guisan y col., 2014).

En el caso de Chiapas, el área cultivada de cacao es de 18426 ha, con una producción de 9869 T con rendimiento promedio de $535,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (SIAP, 2018). De acuerdo con Avendaño y col. (2011) representa una fuente importante de ingresos con el 33,0% de la producción nacional de tal forma que 11069 productores dependen económicamente de este cultivo en Chiapas. En la mayoría de los casos, los cacaoteros cultivan el cacao con experiencia y conocimiento de agricultura tradicional y lo hacen con un enfoque de economía campesina (Nájera, 2012), aun cuando Avendaño y col. (2013) indican que las plantaciones de cacao presentan valor económico, social, cultural y ambiental. Estas apreciaciones son corroboradas con los resultados obtenidos por Her-

nández y col. (2015) quienes señalan que en Chiapas la producción de cacao es manejada por pequeños productores, con parcelas menores a 2 ha (58,7%) y 41,3% con parcelas de mayor tamaño. La mayoría de los productores corresponden al sexo masculino (80,7%) y 19,3% al sexo femenino, quienes además de productoras son amas de casa y se dedican al cuidado de sus hijos, con lo cual triplican sus jornadas de trabajo.

El cultivo de cacao enfrenta una crisis debido a factores ambientales, tecnológicos, económicos, sociales y fitosanitarios (Díaz y col., 2013; Hernández y col., 2015; Suárez-Venero y col., 2019); no obstante, presenta perspectivas alentadoras, dado que existe un mercado potencial nacional e internacional que reporta un crecimiento de la demanda de 2,5% anual, propiciado por que el consumo del cacao que está relacionado con la demanda industrial para fabricar principalmente chocolates (ICI, 2013). En Chiapas existen condiciones agroclimáticas para incrementar la producción. Lo anterior implica aumentar el área cultivada, por ello se requiere identificar áreas con alto potencial productivo y económico, generando información que se convierta en un elemento necesario para la toma de decisiones (Espinosa-García y col., 2015).

El cultivo del café se introdujo en México en el año de 1796, y se consolidó como un cultivo importante en el contexto económico, ambiental y social que forma parte de la cultura agroproductiva de las regiones subtropicales y tropicales. Chiapas, por su parte, es el principal productor de café (var. robusta y arábica), con una superficie sembrada equivalente a 252743,77 ha, con aproximadamente 180856 productores cafetaleros y 367874,15 T de producción en el ciclo 2019 (SIAP, 2018). Las zonas cafetaleras del estado de Chiapas se caracterizan por sus contrastes ambientales, técnicos, económicos y socioculturales, que influyen en la producción del grano (Medina-Meléndez y col., 2016). Actualmente, el café se produce en 11 estados de la República. Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca concentran el 89,7% de la producción nacional total en el 85% del área total sembrada, concentrando el 83% de los productores nacionales, (SIAP, 2018). A nivel internacional, México es el octavo productor mundial de café (Organización Internacional del Café, 2018).

De allí la importancia de generar escenarios de

cambio climático que representen la variación térmica en la región de estudio. La vulnerabilidad regional revela los efectos diferenciales del clima sobre la sociedad y sus actividades productivas, por ello es imperativo el estudio de las causas y la distribución de los impactos del cambio climático en los sistemas agroproductivos a partir de considerar la compleja interacción de los factores ambientales, sociales, económicos y políticos involucrados en cada región o área geográfica (Torres, Cruz y Barradas, 2011).

Estudios realizados sobre el incremento de la temperatura por efecto del cambio climático muestran que el cultivo del café sufrirá una importante redistribución geográfica en México y en otros países productores (Paes, 2010; Hagggar y Schepp, 2012; Ovalle-Rivera y col., 2015); en este sentido, son pocos los estudios sobre el cacao; sin embargo, el panorama no es distinto. Sobre la ponderación de factores y factores limitantes para la producción agrícola, la zonificación agroecológica es una herramienta práctica que define zonas a través de la combinación de características similares de clima, suelo y potencial biofísico para la producción agrícola. Esta combinación se traduce en zonas con limitaciones y potencialidades, lo que permite ser una referencia para recomendaciones que permitan mejorar la situación existente, incrementando la producción o la superficie del cultivo, o limitar la degradación de los recursos naturales (Suárez-Venero y col., 2019).

La variabilidad del clima es el principal factor responsable de las oscilaciones anuales de la producción de algunos cultivos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2010); por ello, el propósito de esta investigación es evaluar las zonas de aptitud actual y futura (2018-2040) para los cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L.) y café (*Coffea arabica* L.), en escenarios de cambio climático en la región del Soconusco, Chiapas, México y definir las regiones donde aumenta o disminuye la aptitud para contar con información que permita recomendar su manejo y conservación.

2.3 Zonificación por ponderación

A partir de las matrices de requerimientos anteriores se generaron mapas de aptitud actual por requerimiento para ambos cultivos, asignando a cada una de las variables la ponderación siguiente: precipi-

2 Materiales y Métodos

2.1 Zona de estudio

La región socioeconómica de Soconusco tiene una superficie de 4605,4 km² aproximadamente, equivalente al 6,28% del territorio estatal y se integra por 16 municipios: Acacoyagua, Acapetahua, Cacaohatán, Escuintla, Frontera Hidalgo, Huehuetán, Huixtla, Mapastepec, Mazatán, Metapa, Suchiate, Tapachula, Tuxtla Chico, Tuzantán, Unión Juárez y Villa Comaltitlán. Según el Censo de población y vivienda (INEGI, 2010), esta región tenía una población de 664437 habitantes, que representó el 16,9% del total estatal.

2.2 Requerimientos de los cultivos

Se definieron los requerimientos edafoclimáticos que intervienen en el desarrollo y productividad de cada uno de los cultivos con la finalidad de asignar niveles de importancia a cada una de las variables a considerar. Se creó una tabla para cada cultivo con sus respectivos requerimientos y se clasificaron en diferentes niveles de aptitud: muy apto, marginalmente apto y no apto, utilizando como referencia los rangos inferiores y superiores de cada uno de los requerimientos que toleró cada cultivo (Tabla 1 y 2).

La cartografía fue manejada y generada empleando el software ArcGIS 9.3. Las capas utilizadas para la clasificación en niveles de aptitud según las tablas 1 y 2 fue obtenida de las siguientes fuentes. 1) Los mapas de precipitación y temperatura fueron obtenidos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (Gómez y col., 2008). 2) Los mapas de altura y pendiente del terreno fueron generados mediante las herramientas 3D Analysis y Spatial Analyts de ArcGIS, a partir de los modelos de elevación digital de INEGI (1994) escala 1:50.000, disponibles en línea en el sitio web oficial. 3) El mapa de suelos fue clasificado a partir del mapa de suelos dominantes de escala 1:1.000.000.

tación= 0,4, temperatura= 0,2, altura= 0,2, pendiente= 0,1 y suelos= 0,1. Después, se asignaron nuevos valores ponderados a cada nivel aptitud por cada variable o mapa: 4, 2 y 0 para muy apto, marginalmente apto y no apto, respectivamente. Finalmente

Tabla 1. Requerimientos ambientales para *Coffea arabica* L. y niveles de aptitud con respecto de variables ambientales.

Requerimiento (variable)	Nivel de aptitud				
	No apto	Marginalmente apto	Muy apto	Marginalmente apto	No apto
Precipitación media anual (mm)	<750	750-1400	1400-2200	2200-4200	>4200
Temperatura media anual (°C)	<10	10-14	14-28	28-34	>34
Altura (msnm)	<1000	1000-1200	1200-1700	1700-2800	>2800
Pendiente del terreno (%)			<30	30-40	>40
Suelos(textura)	Ligeros (arenosos)		Franco (medios)		Pesados (arcillosos)

Fuente: Adaptado de INIFAP (2018) y Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006).

Tabla 2. Requerimientos ambientales para *Theobroma cacao* L. y niveles de aptitud con respecto de variables ambientales.

Requerimiento (variable)	Nivel de aptitud				
	No apto	Marginalmente apto	Muy apto	Marginalmente apto	No apto
Precipitación media anual (mm)	<1000	1000-1500	1500-2500	2500-3000	>3000
Temperatura media anual (°C)	<18	18-22	22-28	28-32	>32
Altura (msnm)	<5		5-400	401-601	>601
Pendiente del terreno (%)			0-15	15-30	>30
Suelos(textura)	arenosos		aluviales		arcillosos, gravosos

Fuente: Adaptado de INIFAP (2018) y SIAP-SAGARPA (2019).

empleando la herramienta Spatial Analyst se realizó una sobreposición y algebra de mapas para obtener los rangos de potencialidad actual. Los mapas se clasificaron en tres intervalos iguales y se les asignó nuevamente la nomenclatura clave muy apto, marginalmente apto y no apto (Figura 1).

2.3.1 Zonificación de cultivos por factores limitantes

La zonificación por factores limitantes se realizó utilizando una sobreposición de capas con la herramienta Geoprocessing. Los mapas se reclasificaron de acuerdo a las tablas de requerimientos de los cultivos en sus diferentes niveles de aptitud. Para ello fue necesario asignarle claves a cada nivel de aptitud y generar una nomenclatura que permitió conocer con exactitud la incidencia de cada factor al sobreponer los mapas (Tabla 3).

Con las claves asignadas, se procedió a realizar la sobreposición de capas con la finalidad de obtener un solo mapa que mostró todas las posibles combinaciones (celdas agroecológicas) entre niveles

de aptitud de cada uno de los indicadores estudiados como se muestra en la Figura 2.

2.3.2 Escenarios de cambio climático

La temperatura y la precipitación, y en general, el ciclo del agua fueron las variables a través de las cuales se hizo evidente el cambio climático; por lo que, para la elaboración de un escenario futuro de aptitud para los cultivos, considerando dicho cambio, fueron necesarios los datos de salida de modelos de circulación general atmosféricos-oceánicos (MCGAO) de estos dos parámetros. Para la realización de los mapas de cambio climático se emplearon los datos de salida de dos MCGAO: HadleyCM3 y GFDLR30. Los modelos de cambio climático fueron obtenidos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM para el escenario A2 y B2 al horizonte de tiempo del año 2030 (Gómez y col., 2008). Para la elaboración de los mapas de aptitud futura con cambio climático se utilizaron los mismos pasos, nomenclatura y criterios empleados en la determinación de la aptitud actual (escenario ba-

se) por ponderación y limitantes. Toda vez que se modificaron las variables temperatura y precipitación, fueron aplicadas nuevamente las tablas de re-

querimientos climáticos para obtener los posibles escenarios futuros. La Figura 3 describe el proceso general del presente estudio.

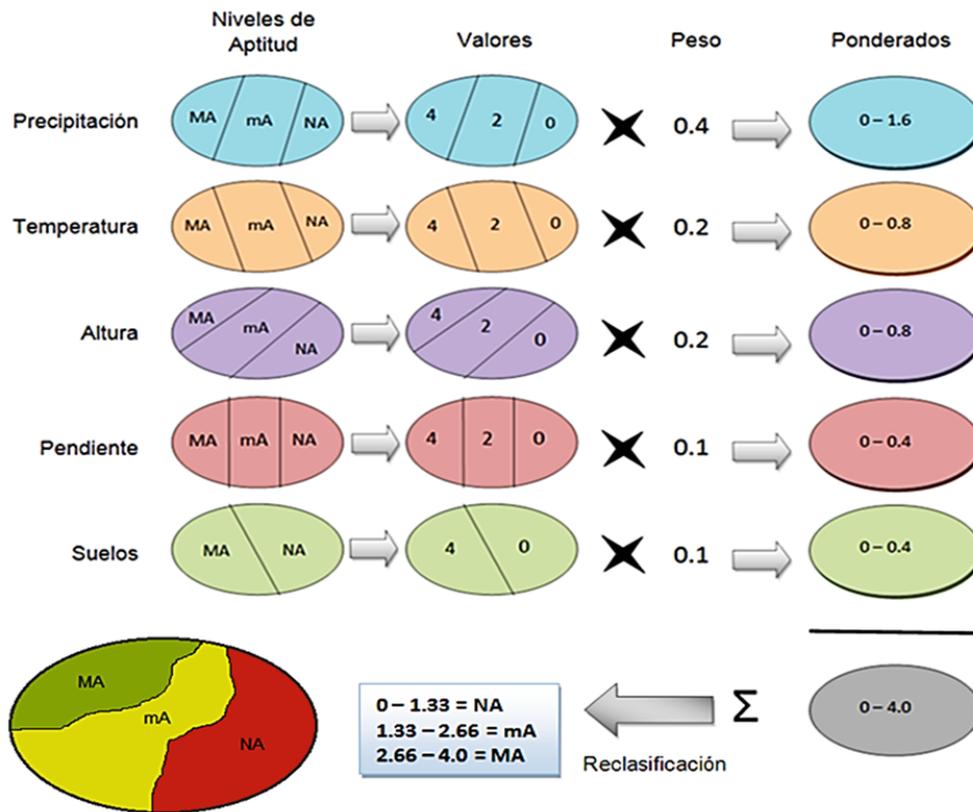


Figura 1. Método de ponderación de factores con nomenclatura y valores asignados.

Tabla 3. Nomenclatura empleada para la determinación de fórmulas.

Variable	Muy Apto	Marginalmente Apto	No Apto
Precipitación	P_{MA}	P_{mA}	P_{NA}
Temperatura	T_{MA}	T_{mA}	T_{NA}
Altura	A_{MA}	A_{mA}	A_{NA}
Pendiente	Pe_{MA}	Pe_{mA}	Pe_{NA}
Suelos	S_{MA}	S_{mA}	S_{NA}

3 Resultados y discusión

3.1 Aptitud actual por ponderación para los dos cultivos

Una vez realizado el álgebra de mapas, las superficies de tierra de los diferentes niveles de aptitud

para el caso del café fueron: 37,8% para muy apto; 61,0% para marginalmente apto y 1,1% para no apto. Por su parte, los distintos niveles de aptitud para cacao fueron: 59,2; 24,3 y 16,5% muy apto, marginalmente apto y no apto; respectivamente, Figura 4.

La Figura 4 se interpreta como una distribución

de áreas: (1) donde es recomendable establecer los cultivos (Muy apto); (2) donde se pueden establecer, pero requieren de mayor manejo para su desarrollo (marginalmente apto); y finalmente, (3) donde no se recomienda establecer los cultivos porque la tierra no tiene el potencial necesario para su producción.

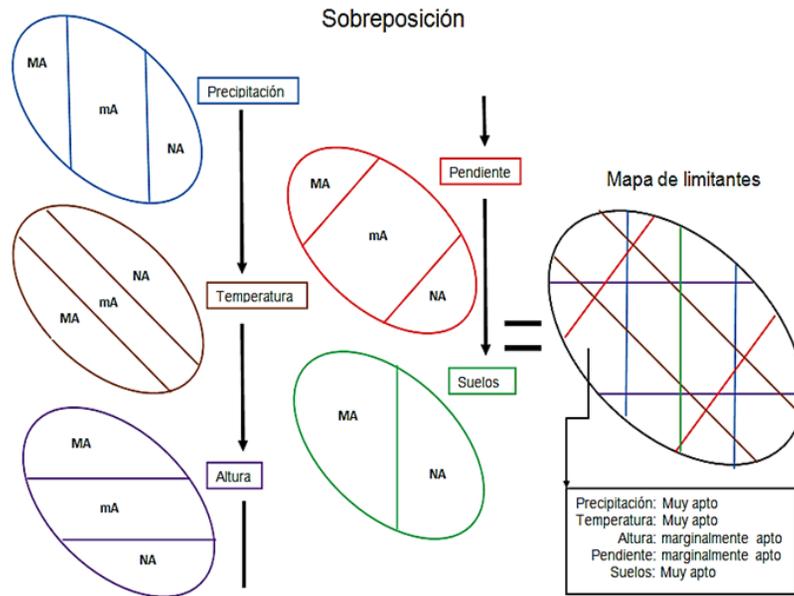


Figura 2. Método de limitantes con nomenclatura y descripción de las celdas agroecológicas.

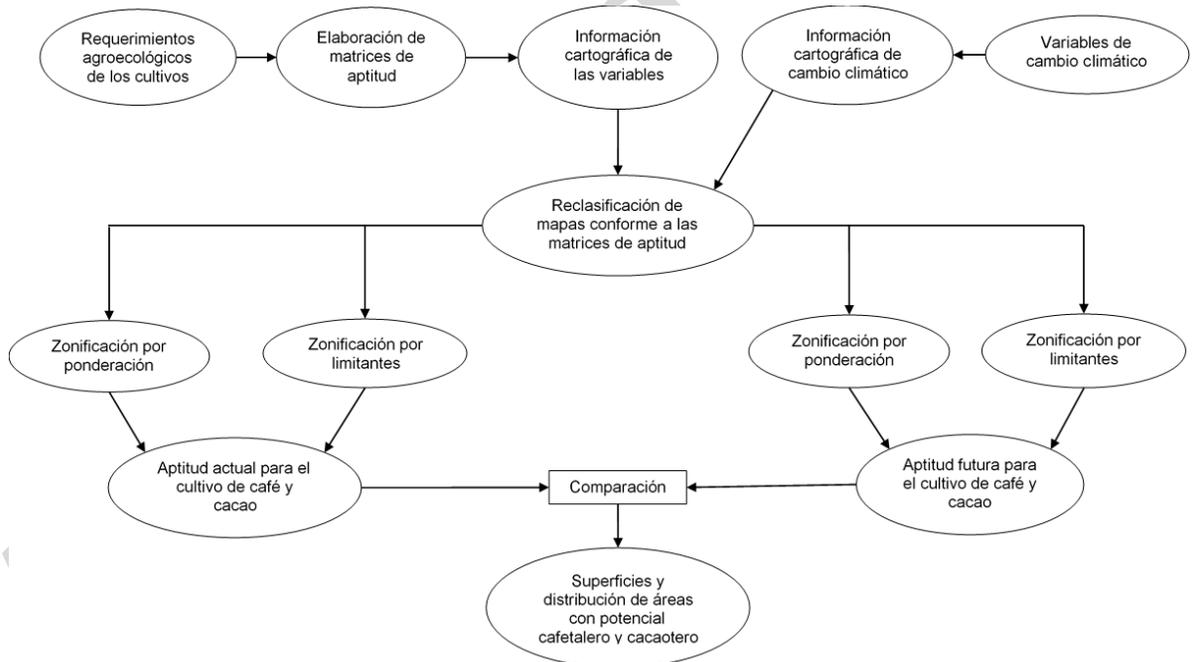


Figura 3. Diagrama general del método empleado.

3.2 Aptitud actual por limitantes para el cultivo de café y cacao

Los mapas de limitantes para ambos cultivos mostraron la variabilidad de unidades distintas, perfectamente identificables por las condiciones ambientales que tuvieron lugar en cada una de ellas, por lo que las combinaciones de colores empleadas no fueron jerárquicas ni exclusivas. Así mismo, cada una de las unidades fue descrita por una fórmula única. En el caso de la aptitud actual para el cultivo del café se presentaron 24 unidades diferentes, aunque las primeras siete abarcaron más del 75% de la superficie de la región. Por otro lado, la aptitud

actual para el cacao presentó 36 clases distintas, de las cuales las primeras seis cubrieron más del 50% de la superficie total, Figura 5.

La aptitud por limitantes es totalmente cualitativa y representa un complemento de lo obtenido en la ponderación, porque permite identificar la incidencia de cada una de las variables consideradas en la zonificación agroecológica. En la Figura 5a) y 5b) se puede apreciar que las áreas coloreadas en rojo están limitadas por un mayor número de variables y es posible identificarlas utilizando la nomenclatura descrita en la Tabla 3.

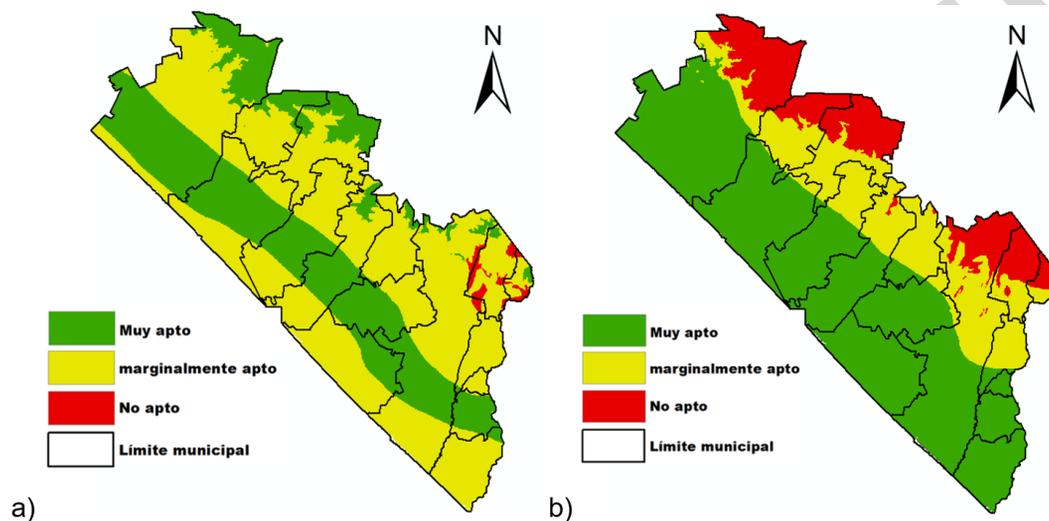


Figura 4. Aptitud actual de la tierra con el método de ponderación para café (a) y cacao (b) en la región del Soconusco, Chiapas, México.

3.3 Escenarios de cambio climático por ponderación

Los cambios en las superficies con potencial cafetalero y cacaoero son presentados en el Tabla 4, considerando que la superficie total de la región de estudio fue de 590 mil ha aproximadamente. Como se muestra en la Tabla 4, no hubo cambios porcentuales entre escenarios (A2 y B2) para ninguno de los dos modelos aun cuando se observó una diferencia

en los valores de salida de precipitación y temperatura de cada modelo; lo anterior se debió a que durante la reclasificación de los mapas se les asignó el mismo nivel de aptitud porque la diferencia que había entre los valores no fue suficiente para clasificarlos en rangos de aptitudes distintos de acuerdo a las Tablas 1 y 2. Se observó también un cambio mínimo entre ambos modelos debido a la diferencia en el procesamiento de los datos de cada modelo.

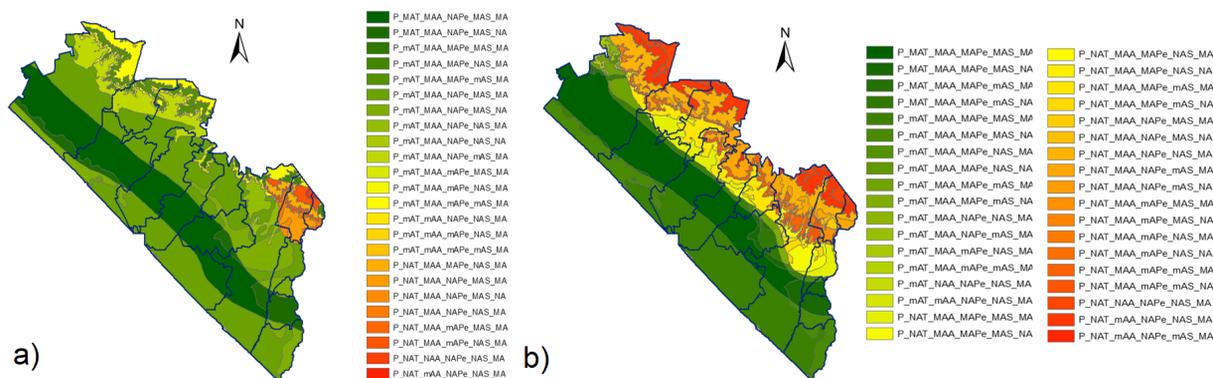


Figura 5. Aptitud actual de la tierra con el método de limitantes para café (a) y para cacao (b) en la región del Soconusco, Chiapas, México.

Tabla 4. Superficie (%) por rango de aptitud para los cultivos de café y cacao con escenarios de cambio climático en la región del Soconusco, Chiapas, México.

Escenarios	Café			Cacao		
	Muy apto	Marginalmente apto	No apto	Muy apto	Marginalmente apto	No apto
Base	37,8	61,0	1,1	59,2	24,3	16,5
GFDL A2	33,3	66,3	0,4	52,0	31,7	16,3
GFDL B2	33,3	66,3	0,4	52,0	31,7	16,3
Hadley A2	33,0	64,9	2,1	49,9	33,5	16,6
Hadley B2	33,0	64,9	2,1	49,9	33,5	16,6

En el caso del café, el modelo GFDL mostró que la zona más afectada de la región de estudio fue la sureste en los municipios Frontera Hidalgo, Suchiate, Tapachula, Huehuetán; también en el noroeste de la región, los municipios Mapastepec y Acapetahua perdieron potencial en las áreas cercanas a la costa. Las zonas sin potencial también se vieron reducidas en Cacahoatán y el norte de Tapachula; la disminución en las zonas sin potencial se debió principalmente al aumento de temperatura a mayor altura, lo que permitió que el cultivo se desarrollara de mejor manera, de 450 a 550 msnm. El modelo Hadley por su parte indicó una reducción de aptitud en los mismos municipios que el anterior, aunque también marcó un ensanchamiento de las zonas sin potencial en el norte del municipio de Tapachula y Tuxtla Chico y el este de Cacahoatán, debido a un mínimo incremento en la precipitación a menor altura en esas áreas. El modelo Hadley mostró un panorama menos alentador, Figura 6.

A nivel municipal, los cambios más importantes se presentaron en Acapetahua, Huehuetán, Mapastepec, Metapa, Suchiate, Tapachula y Frontera Hidalgo, este último con una reducción de aptitud de hasta 82,5% de su superficie. Sin embargo, el mo-

delo GFDL proyectó pequeños cambios positivos como el incremento de aptitud de hasta un 4% en el municipio de Cacahoatán, Tabla 5.

Para el caso del cacao, el modelo GFDL indicó que el potencial de cacao se vio mayormente disminuido en la zona sureste en los municipios de Suchiate, Frontera Hidalgo, Metapa, Tuxtla Chico, Tapachula y Huehuetán; así como también la línea costera de Mapastepec, Acapetahua y en menor proporción Villa Comaltitlán. Por otra parte, las áreas sin potencial se redujeron en el norte de los municipios Huixtla y Tuzantán, debido también al aumento de la temperatura en las zonas altas, de 1250 a 1500 msnm. El modelo Hadley indicó la misma tendencia que el anterior, reduciéndose las zonas con potencial en los mismos municipios, aunque con mayor proporción (2,1%) y reduciéndose las zonas sin potencial en los municipios de Huixtla y Tuzantán; además de un incremento de éstas últimas en el norte del municipio de Mapastepec, debido también al incremento de la temperatura, pero en este caso en zonas bajas, Figura 7. Nuevamente el modelo Hadley fue menos favorable en su predicción.

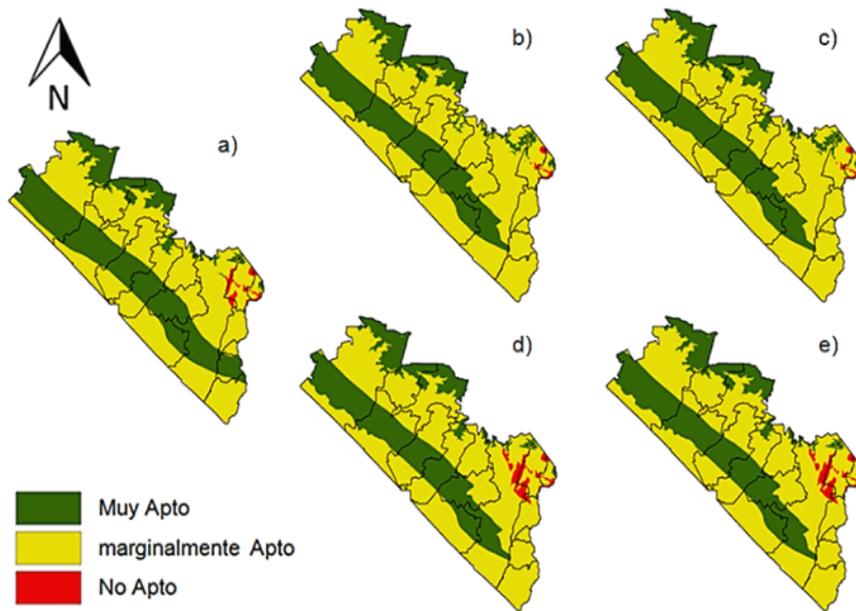


Figura 6. Zonificación para el cultivo de café: a) Aptitud actual y; Aptitud con escenarios de cambio climático para el año 2030: b) GFDL A2, c) GFDL B2, d) Hadley A2 y e) Hadley B2.

Tabla 5. Comparación de superficies (%) a nivel municipal del escenario base con escenarios de cambio climático para el cultivo de café en la región del Soconusco, Chiapas, México.

Municipio	Área total (ha)	Escenario base			Modelo GFDL A2 y B2			Modelo Hadley A2 y B2		
		Muy apto	Marginal apto	No apto	Muy apto	Marginal apto	No apto	Muy apto	Marginal apto	No apto
Acacoyagua	26.160,90	30,3	69,7	-	30,3	69,7	-	30,3	69,7	-
Acapetahua	55.293,90	53,7	46,3	-	47,3	52,7	-	47,3	52,7	-
Cacahoatán	17.996,90	3,8	76,6	19,6	7,8	85,2	7,0	3,2	76,5	20,3
Escuintla	39.464,80	38,6	61,4	-	38,6	61,4	-	38,6	61,4	-
Frontera Hidalgo	11.493,40	84,3	15,7	-	1,8	98,2	-	1,8	98,2	-
Huehuetán	30.644,40	62,3	37,7	-	50,0	50,0	-	49,0	51,0	-
Huixtla	43.295,10	40,4	59,6	-	40,4	59,6	-	40,4	59,6	-
Mapastepec	120.802,30	57,4	42,6	-	52,3	47,7	-	52,3	47,7	-
Mazatán	37.277,50	28,0	72,0	-	28,0	72,0	-	28,1	71,9	-
Metapa	3.054,30	1,8	98,2	-	-	100,0	-	-	100,0	-
Suchiate	22.997,90	4,8	95,2	-	0,2	99,8	-	0,2	99,8	-
Tapachula	95.371,20	26,0	72,1	1,9	23,7	76,3	-	20,9	72,0	7,1
Tuxtla Chico	13.073,20	2,2	97,5	0,3	-	100,0	-	-	95,4	4,6
Tuzantán	20.435,30	8,7	91,3	-	8,7	91,3	-	8,7	91,3	-
Unión Juárez	5.716,00	12,1	64,1	23,8	14,5	62,4	23,1	9,4	66,7	23,9
Villa Comaltitlán	45.800,30	33,8	66,2	-	33,8	66,2	-	33,8	66,2	-

De igual forma, los cambios más significativos en escala municipal se encontraron reflejados en Acapetahua, Huehuetán, Mapastepec, Metapa, Tapachula, Tuxtla Chico, Tuzantán, Villa Comaltitlán, Frontera Hidalgo y Suchiate, estos dos últimos con

una reducción de aptitud de hasta 38% de su superficie. En este caso, no se apreciaron cambios positivos en la aptitud para ninguno de los dos modelos, Tabla 6.

En concordancia con lo anterior, todos los expe-

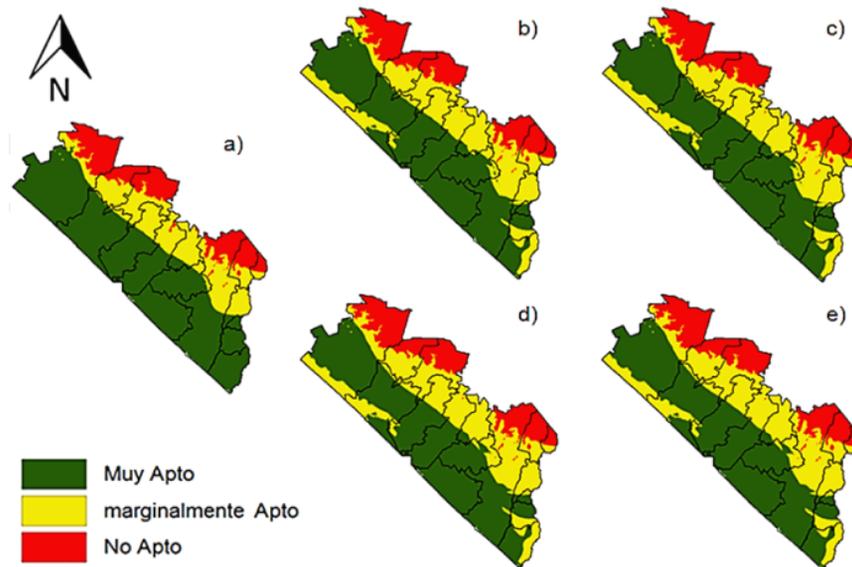


Figura 7. Zonificación para el cultivo de cacao: a) Aptitud actual y; Aptitud con escenarios de cambio climático para el año 2030: b) GFDL A2, c) GFDL B2, d) Hadley A2 y e) Hadley B2.

rimentos A2 del Informe Especial de Escenarios de Emisiones del Pacific Climate Impacts Consortium (IPCC, 2013) registraron que en promedio habrá un aumento de 2°C en la temperatura media de la región de estudio en comparación con la actual para mediados de la década de los 80 del presente siglo. Por su parte, la precipitación anual fue más errática en cuanto a su predicción, puesto que mostró cambios porcentuales positivos y negativos, aunque la mayoría de los modelos indicó un incremento significativo de la misma, entre ellos el modelo Hadley.

Es importante destacar que para O'Connor y col. (2020) las inquietudes transcendentales debidas al cambio climático se corresponden con la acelerada pérdida de la biodiversidad y la variación de la distribución de la vida silvestre; por lo que Rice (2018) sugirió que se genera disminución de los espacios disponibles para la agricultura, y, por ende, reducción en la oferta de alimentos. Para vislumbrar el impacto de la variabilidad climática, en el caso del cultivo de café, se requiere conocer la distribución en el mundo. Este cultivo se puede encontrar como policultivo tradicional, policultivo comercial y monocultivo. Cada una de las formas de manejo del cultivo tiene ventajas y desventajas. Según Janissen y Huynh (2018) y Torres y col. (2020) los policultivos tradicionales y los cultivos silvestres disminuyen la transpiración de las hojas, la velocidad del calenta-

miento nocturno y diurno, lo que se traduce en un menor estrés para la planta debido a cambios bruscos de temperatura.

Desde el punto de vista ambiental, estos sistemas permiten la conservación de una gran cantidad de plantas y animales, conservando los ecosistemas nativos. Por el contrario, el policultivo comercial retiene las especies correctamente asociadas a los cultivos que generan las utilidades monetarias para los cafeteros. El monocultivo y el policultivo comercial son los más productivos a corto plazo. Sin embargo, son los cultivos más susceptibles a las plagas porque ofrecen un entorno más propicio para el crecimiento de patógenos.

3.4 Escenarios de cambio climático por limitantes para el cultivo de café y cacao

Al igual que la aptitud actual (escenario base) por limitantes, los mapas de aptitud futura pretenden mostrar cómo se comportará la variabilidad de unidades existentes, es decir, si se reducirán o aumentarán el número de clases distintas debido al efecto del cambio climático. En la Figura 8 se aprecia que el modelo GFDL mostró para el cultivo del café 27 clases distintas, tres más que en el escenario base. Por otra parte, el modelo Hadley presentó 28 unidades distintas.

Tabla 6. Comparación de superficies (%) a nivel municipal del escenario base con escenarios de cambio climático para el cultivo de cacao en la región del Soconusco, Chiapas, México.

Municipio	Área total (ha)	Escenario base			Modelo GFDL A2 y B2			Modelo Hadley A2 y B2		
		Muy apto	Marginal apto	No apto	Muy apto	Marginal apto	No apto	Muy apto	Marginal apto	No apto
Acacoyagua	26.160,91	1,1	59,5	39,4	1,1	59,9	39,0	0,5	60,5	39,0
Acapetahua	55.293,91	95,7	4,3	-	77,9	22,1	-	75,2	24,8	-
Cacahoatán	17.996,89	-	39,3	60,7	-	39,4	60,6	-	39,4	60,6
Escuintla	39.464,77	3,2	43,9	52,9	3,2	44,1	52,7	2,6	44,7	52,7
Frontera Hidalgo	11.493,41	100,0	-	-	61,5	38,5	-	61,5	38,5	-
Huehuetán	30.644,37	89,1	10,9	-	84,3	15,7	-	75,1	24,9	-
Huixtla	43.295,09	63,7	34,9	1,4	63,6	36,3	0,1	62,5	37,4	0,1
Mapastepec	120.802,31	64,5	8,6	26,9	54,5	18,7	26,8	52,3	19,7	28,0
Mazatán	37.277,47	100,0	-	-	99,5	0,5	-	99,5	0,5	-
Metapa	3.054,27	99,9	0,1	-	91,9	8,1	-	76,3	23,7	-
Suchiate	22.997,88	100,0	-	-	61,2	38,8	-	61,2	38,8	-
Tapachula	95.371,22	51,2	30,2	18,6	48,6	32,8	18,6	46,4	35,0	18,6
Tuxtla Chico	13.073,17	16,9	83,1	-	10,9	89,1	-	6,2	93,8	-
Tuzantán	20.435,30	18,2	80,8	1,0	14,5	85,5	-	12,2	87,8	-
Unión Juárez	5.716,02	-	32,3	67,7	-	32,4	67,6	-	32,4	67,6
Villa Comaltitlán	45.800,34	70,0	30,0	-	66,6	33,4	-	65,4	34,6	-

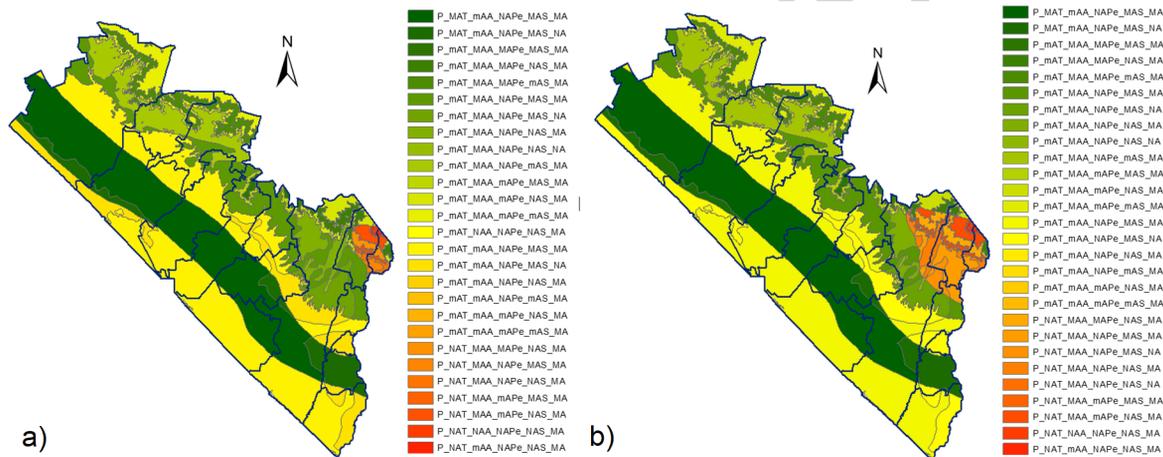


Figura 8. Aptitud futura por limitantes a) modelo GFDL A2 y B2, b) modelo Hadley A2 y B2 para café en escenarios de cambio climático en la región del Soconusco, Chiapas, México.

Para el cacao, el modelo GFDL mostró 47 clases distintas, es decir, 11 unidades más que en el escenario base; el modelo Hadley presentó 43 clases diferentes, Figura 9. Se deduce que los cacaotales y cafetales fueron adecuados para reforestar áreas completamente taladas y pueden convertirse en corredores biológicos entre segmentos de selva, permitiendo la repoblación de aves, mamíferos, reptiles y anfibios, entre otros, tal como lo sugirió Oga-

ta (2007). Los sistemas agroforestales tanto de cafetales como de cacaotales fueron herramientas importantes para la conservación de la biodiversidad, porque presentaron diferentes especies y formas de vida vegetal y animal coincidiendo con lo indicado por Salgado-Mora y col. (2007), y produjeron muchas ventajas positivas, siendo necesario caracterizar los factores más relevantes en el aspecto socioeconómico y ambiental para mejorar las potenciali-

dades de los cultivos aquí estudiados y promoverse como una alternativa de manejo sostenible (Roa-Romero, Salgado-Mora y Álvarez-Herrera, 2009), pues pueden ser un “puente” entre el desarrollo

agrícola y la conservación, facilitando la cooperación y la colaboración entre los finqueros y los conservacionistas (Parrish y col., 1999).

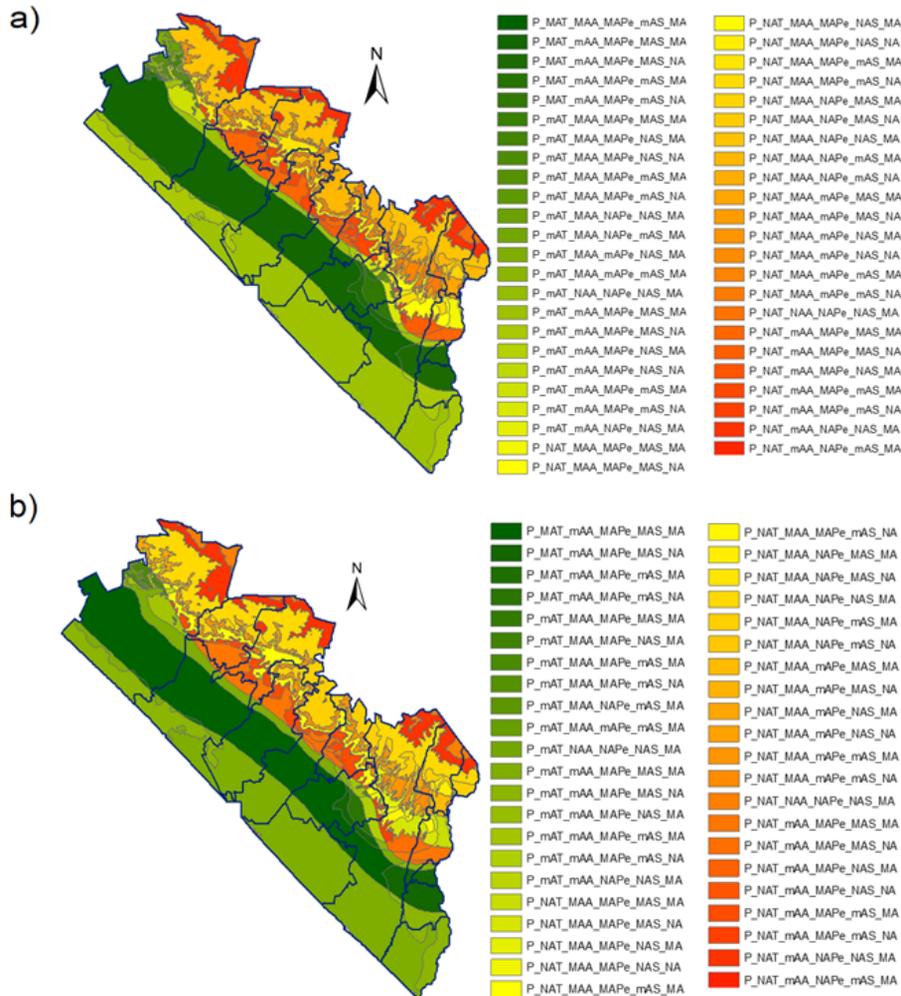


Figura 9. Aptitud futura por limitantes a) modelo GFDL A2 y B2, b) modelo Hadley A2 y B2 para cacao en escenarios de cambio climático en la región del Soconusco, Chiapas, México.

4 Conclusiones

Para el cultivo de café y cacao, el modelo GFDL predice en las áreas con muy alto potencial una reducción de 4,5 y 7,2%, y en las de potencial marginal un aumento de 5,3 y 7,4%, mientras que las áreas sin potencial presentan una disminución de 0,7 y 0,2%, respectivamente; este último caso representa un impacto positivo del cambio climático, aun

cuando es menor que el producido en las zonas con muy alto potencial. Con respecto al modelo Hadley, éste pronostica para café y cacao en las áreas con muy alto potencial una reducción de la superficie del 4,8 y 9,3%, y en las áreas de potencial marginal un incremento de 3,9 y 9,2% y en las áreas sin potencial un incremento de 1,0% y una disminución de 0,1%, respectivamente.

La aptitud futura de ambos cultivos se verá afectada negativamente por el cambio climático. La disminución en la superficie con nivel muy apto para el establecimiento de ambos cultivos a lo largo del tiempo concuerda con la reducción en el volumen de producción que se presentó en la última década, según los datos históricos de producción. Para el año 2030 se perderá entre 5,5 y 5,8% de áreas potenciales para el establecimiento de café; mientras que en cacao se perderán entre 7,2 y 9,3% de las áreas potenciales.

Referencias

- Avendaño, C. y col. (2011). *Diagnóstico del cacao en México*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Avendaño, C. y col. (2013). «Mejoramiento genético participativo en cacao (*Theobroma cacao* L.)» En: *Agroproductividad* 6.5, 71-81. Online: <https://bit.ly/3ACMwBm>.
- Baumgartner, J., M. Esperón-Rodríguez y L. Beaumont (2018). «Identifying in situ climate refugia for plant species». En: *Ecography* 41.11, 1850-1863. Online: <https://bit.ly/3H3Uk1s>.
- Beaumont, L. y col. (2019). «Incorporating future climate uncertainty into the identification of climate change refugia for threatened species». En: *Biological Conservation* 237, 230-237. Online: <https://bit.ly/3nVR6Fu>.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2010). *Agricultura y cambio climático: instituciones, política e innovación*. Inf. téc. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Online: <https://bit.ly/3fVEIRB>.
- Díaz, O. y col. (2013). «Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico». En: *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura* 40.2, 279-289. Online: .
- Espinosa-García, J. y col. (2015). «Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 6.5, 1051-1063. Online: <https://n9.cl/6d2j4>.
- Fatichi, S. y col. (2016). «Uncertainty partition challenges the predictability of vital details of climate change». En: *Earth's Future* 4.5, págs. 240-251.
- Gómez, J. y col. (2008). «Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information». En: *Atmósfera* 21.1, 35-56. Online: <https://n9.cl/1qq9t>.
- Guisan, A. y col. (2014). «Unifying niche shift studies: insights from biological invasions». En: *Trends in ecology y evolution* 29.5, 260-269. Online: <https://bit.ly/3Au5iuD>.
- Haggard, J. y K. Schepp (2012). «Coffee and climate change. Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam». En: *NRI Working Paper Series: Climate Change, Agriculture and Natural Resource* 4, 55. Online: <https://bit.ly/3rLRiZb>.
- Hernández, E. y col. (2015). «Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México». En: *Revista mexicana de fitopatología* 33.2, 232-246. Online: <https://bit.ly/3qX2O18>.
- ICI (2013). *Análisis del sector cacao elaborados*. Inf. téc. Inteligencia Comercial e Inversiones. Pro Ecuador, Instituto de Promoción de Importaciones e Inversiones. Online: <https://bit.ly/3IxBY2g>.
- INEGI (1994). *Modelos de elevación digital. Cartas D15B21, D15B22, D15B31, D15B32, D15B41, D15B42, D15B43, D15B52, D15B53, D15B62 y D15B63*. INEGI.
- (2010). *XIII Censo de población y vivienda*. INEGI.
- INIFAP (2018). *Agromapas digitales*. INIFAP.
- IPCC (2013). «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». En: ed. por T. Stocker y col. Cambridge University Press. Cap. Summary for Policymakers, págs. 3-29.
- Janissen, B. y T. Huynh (2018). «Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review». En: *Resources, Conservation and Recycling* 128, 110-117. Online: <https://bit.ly/3KJF7oj>.
- Medina-Meléndez, J. y col. (2016). «Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas». En: *CienciaUAT* 10.2, 33-43. Online: <https://n9.cl/mwgu0>.
- Nájera, M. (2012). «El mono y el cacao: la búsqueda de un mito a través de los relieves del Grupo de la Serie Inicial de Chichén Itzá». En: *Estudios de cultura Maya* 39, 133-172. Online: <https://bit.ly/32y1sUB>.
- O'Connor, B. y col. (2020). «Monitoring global changes in biodiversity and climate essential as eco-

- logical crisis intensifies». En: *Ecological Informatics* 55, 101033. Online: <https://bit.ly/3rMXKzb>.
- Ogata, N. (2007). «El cacao». En: *Biodiversitas* 72.3, 2-5. Online: <https://bit.ly/3KKd5Jl>.
- Organización Internacional del Café (2018). *Producción total de los países exportadores de los años de cosecha de 2014/15*. OIC.
- Ovalle-Rivera, O. y col. (2015). «Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change». En: *PLoS one* 10.4, 1-13. Online: <https://bit.ly/3KEXVoG>.
- Paes, M. (2010). «The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil». En: *Bragantia* 69.1, 239-247. Online: <https://bit.ly/3ggZknH>.
- Parrish, J. y col. (1999). «Los cacaotales como herramienta para la conservación de la biodiversidad en corredores biológicos y zonas de amortiguamiento». En: *Agroforestería en las Américas* 6.22, 16-19. Online: <https://bit.ly/3rNyIjk>.
- Pérez-Portilla, Emiliano y Daniel Geissert-Kientz (2006). «Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.)-Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.)». En: *Interciencia* 31.8, 556-562. Online: <https://n9.cl/nrqap>.
- Rice, R. (2018). «Coffee in the crosshairs of climate change: agroforestry as abatis». En: *Agroecology and Sustainable Food Systems* 42.9, 1058-1076. Online: <https://bit.ly/3g27obu>.
- Roa-Romero, H., M. Salgado-Mora y J. Álvarez-Herrera (2009). «Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas-México». En: *Acta Biológica Colombiana* 14.3, 97-110. Online: <https://bit.ly/3nY3h4z>.
- SIAP-SAGARPA (2019). *Cierre de la producción agrícola por estado 2019*. SIAP-SAGARPA.
- SIAP (2018). *Intención de cosecha de cultivos perennes por estado en México 2018*. SIAP.
- Salgado-Mora, M. y col. (2007). «Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México». En: *Interciencia* 32.11, 763-768. Online: <https://n9.cl/xz2g6>.
- Suárez-Venero, G. y col. (2019). «Estructura e impacto de la diversidad taxonómica en cacao del Soconusco, Chiapas, México». En: *Agronomía Mesoamericana* 30.2, 353-365. Online: <https://bit.ly/3Ha512n>.
- Torres, N. y col. (2020). «Impact of climate change and early development of coffee rust-An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico». En: *Science of the Total Environment* 738, 140225. Online: <https://bit.ly/3u3Z2sm>.
- Torres, P., J. Cruz y R. Barradas (2011). «Vulnerabilidad agroambiental frente al cambio climático: Agendas de adaptación y sistemas institucionales». En: *Política y cultura* 36, 205-232. Online: <https://bit.ly/34bfZG6>.
- Yepes, A. y M. Buckeridge (2011). «Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global: Revisión». En: *Colombia forestal* 14.2, 213-232. Online: <https://n9.cl/fpyoc>.