



Análisis de la aptitud de las tierras del estado de Chiapas, México para la producción de café arábica (*Coffea arabica*) †

[Land suitability analysis for arabica coffee (*Coffea arabica*) production in the state of Chiapas, Mexico]

Jose Manuel Salvador-Castillo¹, Martín Alejandro Bolaños-González^{1*},
Carlos Ramírez-Ayala¹, Antoine Libert-Amico²
and Axel Eduardo Rico-Sánchez¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo C.P. 56264. Texcoco, Estado de México, México. Email: slcastillo990@gmail.com, martinb72@gmail.com*, cara@colpos.mx, rico.axel@colpos.mx

²Programa Mexicano del Carbono, Morelos N° 17, San Simón C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México. Email: antoinelibert@hotmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Chiapas is the main coffee (*Coffea arabica*) producer in Mexico. However, this sector faces environmental, productive, and socio-economic limitations. Among them, the lack of spatial information at the local level to support decision-making constitutes a critical factor. **Objectives:** i) To generate a land suitability map for *C. arabica* production in Chiapas, Mexico and ii) to assess under which suitability conditions coffee is currently grown in the state. **Methodology:** We used geospatial information on mean annual temperature, annual accumulated precipitation, soil texture, and altitude, along with the locations of 325,268 plots cultivated with *C. arabica*, covering an area of 246,911.4 ha. The suitability map was developed using a weighted sum multicriteria analysis, assigning equal weight to all variables. **Results:** Precipitation was identified as the most restrictive variable, providing the smallest area with optimal conditions, which highlights the sector's vulnerability under climate change scenarios. In Chiapas, Mexico, 214,300 ha were classified as highly suitable for coffee cultivation; however, only 25,045.6 ha (50,209 plots) are currently cultivated under these conditions. In contrast, about 90% of the coffee-growing area is located on lands with limitations for optimal development: 126,659.4 ha classified as medium suitability; 40,118.9 ha as low suitability and 36,899.8 ha as unsuitable. This same trend was observed in six of the most important coffee-producing municipalities located in the Sierra Madre of Chiapas, Mexico. **Implications:** The generated suitability map represents a strategic tool for land-use planning and shade coffee management, aimed at optimizing productivity and reducing climate risks. It also supports the design of promotion policies, the implementation of sustainable production practices, and fair pricing schemes for producers in highly suitable areas. **Conclusions:** Although Chiapas, Mexico, has a considerable area of highly suitable land for coffee cultivation, most coffee plantations are located on land with productive limitations. This underscores the need to integrate spatial information into decision-making to strengthen the resilience of coffee farming, anticipate future scenarios, and ensure the sustainability of the sector in this region. **Key words:** land suitability; edaphoclimatic variables; multicriteria analysis; coffee farming; land-use planning.

RESUMEN

Antecedentes: Chiapas es el principal productor de café (*Coffea arabica*) en México. Sin embargo, este sector enfrenta limitaciones ambientales, productivas y socioeconómicas. Entre ellas, la falta de información espacial a nivel local para apoyar la toma de decisiones constituye un factor crítico. **Objetivos:** i) Generar un mapa de aptitud de las tierras para la producción de *C. arabica* en Chiapas, México y ii) evaluar bajo qué condiciones de aptitud se produce café en el estado. **Metodología:** Utilizamos información geoespacial de temperatura media anual, precipitación acumulada anual, textura del suelo y altitud, junto con la ubicación de 325,268 parcelas cultivadas con *C. arabica*, que abarcan una superficie de 246,911.4 ha. Elaboramos el mapa de aptitud mediante un análisis multicriterio de suma ponderada,

† Submitted September 11, 2025 – Accepted March 11, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6590>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J. M. Salvador-Castillo: <https://orcid.org/0000-0002-8814-9891>; M. A. Bolaños-González: <https://orcid.org/0000-0002-8110-1051>; C. Ramírez-Ayala: <https://orcid.org/0000-0001-9310-0526>; A. Libert-Amico: <https://orcid.org/0000-0002-9716-0283>; A. E. Rico-Sánchez: <https://orcid.org/0000-0002-8864-9319>

asignando igual peso a todas las variables. **Resultados:** La precipitación fue la variable más restrictiva, al ofrecer la menor superficie con condiciones óptimas, lo que resalta la vulnerabilidad del sector ante escenarios de cambio climático. En Chiapas, México, 214,300 ha presentan alta aptitud para el cultivo; sin embargo, solo 25,045.6 ha (50,209 parcelas) fueron cultivadas bajo estas condiciones. En contraste, alrededor del 90% de la superficie cafetalera se localiza en tierras con limitaciones para su desarrollo óptimo: 126,659.4 ha en aptitud media; 40,118.9 ha en aptitud baja y 36,899.8 ha en no aptas. Observamos esta misma tendencia en seis de los municipios más importantes para la producción de café ubicados en la Sierra Madre de Chiapas, México. **Implicaciones:** El mapa de aptitud generado constituye una herramienta estratégica para la planificación territorial y el manejo de cafetales, orientada a optimizar la productividad y reducir riesgos climáticos. Asimismo, respalda el diseño de políticas de fomento, la implementación de prácticas de producción sostenibles y esquemas de precios justos para productores en zonas de alta aptitud. **Conclusiones:** Aunque Chiapas, México, cuenta con una superficie considerable de tierras aptas para cultivar café, la mayor superficie se encuentra en terrenos con limitaciones productivas. Esto refuerza la necesidad de integrar información espacial en la toma de decisiones, para fortalecer la resiliencia de la cafecultura, anticipar escenarios futuros y asegurar la sostenibilidad del sector en esta región.

Palabras clave: aptitud de la tierra; variables edafoclimáticas; análisis multicriterio; cafecultura; planificación territorial.

INTRODUCCIÓN

El café se produce en 82 países y es un producto que se comercia en 196 naciones (FAOSTAT, 2025). Aunque se han documentado 124 especies silvestres, de las cuales al menos el 60% se encuentra en riesgo de extinción debido al cambio climático acelerado (Davis *et al.*, 2019), en la actualidad, 57.4% del mercado mundial está dominado por la especie *Coffea arabica* y el 42.6% restante por *C. canephora* (International Coffee Organization, 2023). La primera se caracteriza por su alta calidad en taza, aunque presenta menor rendimiento y mayor susceptibilidad a variaciones climáticas y afectaciones fitosanitarias; mientras que la segunda, más productiva y resistente a la roya y nematodos (Cerda-Ocaranza *et al.*, 2023), se destina principalmente a cafés estándar e instantáneos por su bajo costo (Yilmaz, Acar-Tek y Sözlü, 2017).

México cultiva 710,897 ha de café, de las cuales aproximadamente el 94.5% corresponde a *C. arabica* (Procuraduría Federal del Consumidor, 2025). De acuerdo con los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022) esta superficie se concentra en Chiapas (35.7%), Veracruz (20.4%), Oaxaca (18.9%), Puebla (9.9%) y Guerrero (6.4%). De acuerdo con Benítez García (2014) la especie *C. arabica* predomina en el país debido a su alta calidad en taza. A pesar de la relevancia de esta actividad, los productores enfrentan crisis derivadas de la volatilidad de los precios internacionales, la sobreoferta en el mercado y la creciente incidencia de factores climáticos adversos como las sequías, lluvias torrenciales, lluvias retrasadas o heladas, las cuales disminuyen el rendimiento por la pérdida de flor-fruto y alteran los ciclos de producción (Hernández-Castán y Tapia-Hervert, 2023). Avelino *et al.* (2015) mencionan que estas condiciones ponen en riesgo la seguridad alimentaria de los productores que poseen menos de 7 ha, quienes a menudo deben comercializar su producto sin agregarle valor, para solventar los costos de producción.

Las principales regiones cafetaleras de México se ubican en territorios con altos índices de marginación y pobreza (Pérez-Portilla *et al.*, 2011) y problemas migratorios (Oliva y López, 2019). Según Medina-Meléndez *et al.* (2016), muchas de estas zonas, como la región Frailesca en Chiapas, México, carecen de infraestructura, asesoría técnica, apoyo financiero y organización de productores que impulsen la tecnificación del cultivo. Además, reportaron que solo el 14% de los productores obtuvo más de 20 qq ha⁻¹; quienes tendrían posibilidades de competir en el mercado internacional. Bajo este escenario, Pérez-Portilla *et al.* (2011) señalan que la producción de café de alta calidad destinada a los mercados diferenciados constituye una estrategia viable para enfrentar la crisis en el mediano plazo, debido a la mayor estabilidad de los precios. Esto representa una oportunidad para los productores localizados en zonas con mayor aptitud, ya que la calidad del café depende principalmente de las condiciones agroecológicas en que se desarrolla la planta (Läderach *et al.*, 2011). En consecuencia, resulta fundamental identificar estas áreas para fortalecer la competitividad en estos mercados especializados.

Según Reyes *et al.* (2022), los sistemas tradicionales de producción de *C. arabica* se desarrollan bajo sombra, en los cuales las plantaciones de más edad presentan mayor diversidad, estructura arbórea y riqueza de especies en comparación con las más jóvenes. Estos sistemas desempeñan un papel clave en la provisión de servicios ecosistémicos (Ruiz-García *et al.*, 2020) y, por ello, se consideran estrategias de producción climáticamente inteligentes, con capacidad de resiliencia frente al cambio climático global (CCG). La vegetación arbórea, además de proporcionar sombra, contribuye al control natural de plagas y enfermedades y a la sostenibilidad del sistema de cultivo (Cerda *et al.*, 2020). Asimismo, favorece la regulación del clima local (Jha *et al.*, 2011), puede capturar hasta cuatro veces más carbono que un cultivo a pleno sol (Van Rikxoort *et al.*, 2014), provee

servicios hidrológicos (Van Noordwijk, 2019), propicia la conservación de suelos (Muchane *et al.*, 2020) y la conservación de la agrobiodiversidad y de especies polinizadoras (Cerda *et al.*, 2020; Lamichhane, 2020).

No obstante, debido a su amplia adaptabilidad, el café suele cultivarse en zonas donde no alcanza su máximo rendimiento, mientras que áreas con alto potencial permanecen subutilizadas (Soto *et al.*, 2001b). La tendencia actual es incorporar técnicas de agricultura de precisión para sostener o incrementar los rendimientos frente a los posibles efectos del CCG (Avelino *et al.*, 2015). En este sentido, resulta necesario considerar la variabilidad espacial en campo para delimitar unidades edafoclimáticas homogéneas (Läderach *et al.*, 2011). De esta manera, es posible implementar prácticas de manejo diferenciadas y más eficientes, tanto en el cultivo como en el manejo edáfico y de la sombra, lo que reduciría la ineficiencia en el uso del territorio cafetalero.

En ese sentido, estudios como los de Grüter *et al.* (2022) y Bunn *et al.* (2015) han evaluado el potencial actual y futuro de las tierras para la producción de *C. arabica* a escala global. En México, los análisis sobre la aptitud territorial del cultivo de *C. arabica* se han realizado a escala municipal (Bautista *et al.*, 2018) y regional (López-Carmona *et al.*, 2021; Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006). Sin embargo, dichos estudios se han desarrollado a escalas heterogéneas, lo que evidencia la necesidad de generar información a nivel estatal que permita orientar programas de apoyo y acciones específicas en las zonas productoras de alta vulnerabilidad o elevado potencial productivo.

En años recientes, programas federales como Producción para el Bienestar y Sembrando Vida han canalizado recursos del Gobierno de México para fortalecer la cafecultura mexicana mediante apoyos directos y asesoría técnica a pequeños productores. No obstante, la efectividad de estas iniciativas requiere complementarse con información espacial robusta sobre la aptitud de las tierras, que permita focalizar los esfuerzos en territorios estratégicos y maximizar su impacto (Azamar, 2025; Gastélum, 2024). Por ello, el presente estudio tiene como objetivo identificar los niveles de aptitud de las tierras para la producción de *C. arabica* en Chiapas, México, así como evaluar bajo qué condiciones de aptitud se produce café en el estado, con la finalidad de proporcionar una herramienta útil para la planificación agrícola, la formulación de políticas públicas y la resiliencia de la cafecultura frente al cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Chiapas se localiza en el extremo sureste de México, limitando al norte con Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el océano Pacífico y al este con Guatemala. Según la división política estatal de 2020, disponible en el portal de geoinformación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2023), el estado cuenta con una superficie de 72,991.1 km² y una población de 5,543,828 habitantes. El clima predominante es Af (cálido húmedo con lluvias todo el año) en la región norte y Am (cálido húmedo con lluvias en verano) en el resto del territorio (Suárez *et al.*, 2021). Las precipitaciones alcanzan hasta 4,000 mm anuales, con temperaturas medias de 18 °C en Los Altos y 28 °C en la Llanura Costera. La altitud varía desde el nivel del mar hasta más de 4,000 m en la cumbre del volcán Tacaná. Según datos del SIAP (2022), en ese año se reportó una superficie cosechada de 239,265 ha, con un rendimiento promedio de 1.6 Mg ha⁻¹ de café cereza, equivalente a 6.4 quintales de café pergamino por hectárea. En la Figura 1 se presenta el área de estudio y la distribución de la superficie cosechada por municipio.

Variables utilizadas

Los requerimientos agroecológicos de *C. arabica* y la selección de variables para generar el mapa de aptitud se definieron a partir de la revisión de literatura (González y Hernández, 2016; López-Carmona *et al.*, 2021). Consideramos cuatro variables: precipitación, temperatura media anual, textura del suelo y altitud. La temperatura y la precipitación se obtuvieron en formato ráster con una resolución de 900 m, generadas a partir de registros climáticos de estaciones meteorológicas del periodo 1970–2000 (Fick y Hijmans, 2017). Para la altitud se empleó el Modelo Digital de Elevación (MDE) de Chiapas, México, con resolución de 30 m, descargado de la plataforma del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022).

La información de textura del suelo (en formato *shapefile*) se obtuvo del acervo edafológico de la plataforma Geoweb Chiapas (2022). De donde, se obtuvieron los polígonos (formato *shapefile*) de las parcelas productoras de café del estado con un total de 325,322 parcelas. Se depuraron 54 registros que carecían de superficie reportada y superficie medida, y en 1,970 casos se utilizó la superficie reportada debido a la ausencia del dato medido y a que, en las parcelas que contaban con ambos datos, la diferencia fue mínima. Tras la depuración, se obtuvieron 325,268 registros válidos, con una superficie total de 246,911.4

ha. Asimismo, obtuvimos información en formato *shapefile* sobre zonas de exclusión (áreas urbanas, localidades rurales, distritos de riego y cuerpos de agua) a partir de los usos de suelo y vegetación de la serie VII (INEGI, 2021).

Estandarización de variables

Debido a que las variables no presentaron la misma unidad, fue necesario realizar un proceso de estandarización mediante la *reclasificación por tabla* utilizando el software QGIS 3.16. Para ello, asignamos

valores únicos a cada variable en función del rango de aptitud para el cultivo, estableciendo cuatro niveles: alto, medio, bajo y no apto (Tabla 1). Este número de niveles coincide con el empleado en estudios previos que evalúan la aptitud de las tierras para la producción de *C. arabica* (González y Hernández, 2016; Monterroso-Rivas *et al.*, 2007). No obstante, algunos autores han utilizado un número diferente de clases; por ejemplo, López-Carmona *et al.* (2021) aplicaron cinco categorías de altitud y pendiente para determinar la aptitud.

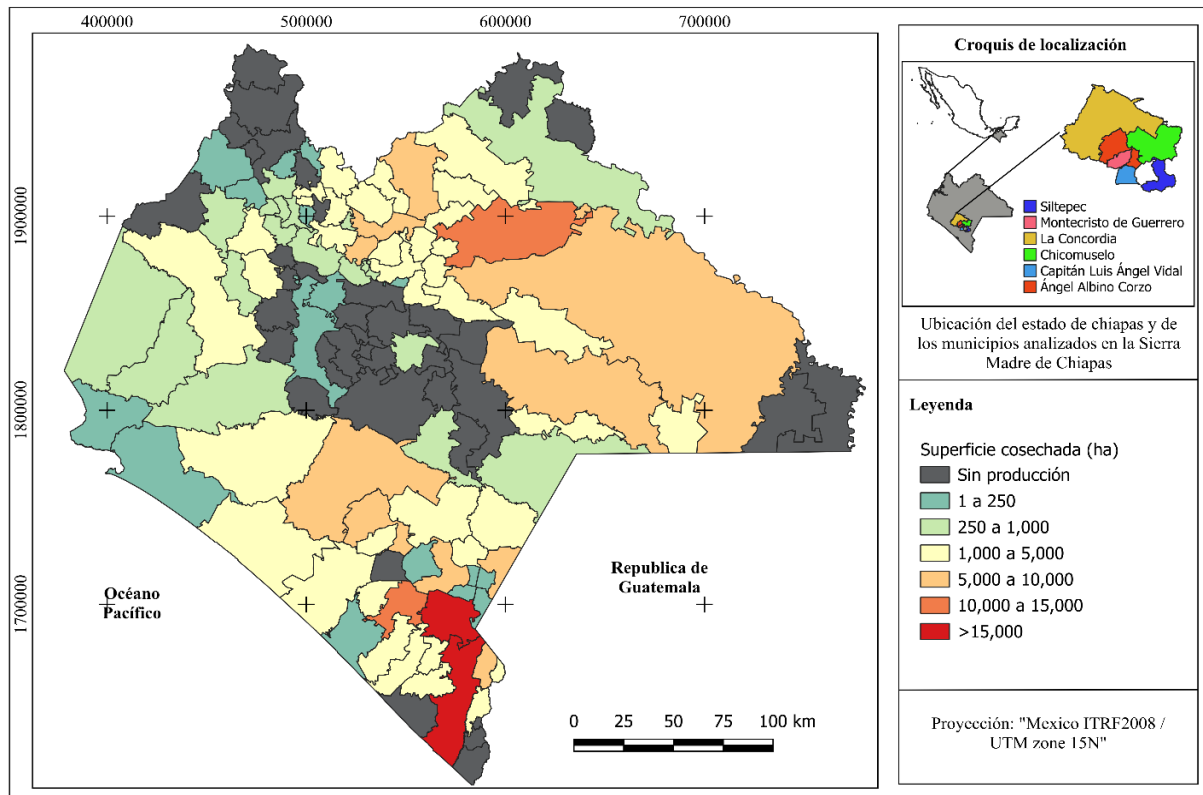


Figura 1. Distribución de la superficie cosechada con café en el estado de Chiapas, México y ubicación de los municipios seleccionados para su análisis detallado. Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2022).

Tabla 1. Requerimientos edafoclimáticos de *Coffea arabica*.

Variables	Unidades	Nivel de aptitud				Fuente
		Alto	Medio	Bajo	No apto	
Temperatura promedio	°C	18-22	14-18 y 22-24	12-14 y 24-26	<12 y >26	González y Hernández (2016)
Precipitación	mm año ⁻¹	1,500-2,000	1,200-1,500	1,000-1,200 y 2,000-2,500	<1,000 y >2,500	González y Hernández (2016)
Altitud	m	900-1,600	600-900 y 1,600-2,000	400-600 y 2,000-2,200	<400 y >2,200	(López-Carmona <i>et al.</i> , 2021)
Textura del suelo		Media	Fina	No definida	Gruesa	(López-Carmona <i>et al.</i> , 2021)

Nota: Para la textura del suelo no se definió una categoría de aptitud baja, ya que la literatura distingue principalmente entre condiciones favorables (texturas medias) y restrictivas (texturas gruesas), mientras que las texturas finas pueden presentar limitaciones manejables y se consideran de aptitud media.

Generación del mapa de aptitud

Para generar el mapa de aptitud, se aplicó la metodología de análisis multicriterio, que integra múltiples variables espaciales asociadas a un fenómeno mediante operaciones de superposición y ponderación. Dentro de este enfoque, se utilizó la técnica de suma lineal ponderada, ampliamente reconocida por su sencillez y aplicabilidad en estudios de evaluación territorial, en la que a cada variable se le asigna un peso relativo y, posteriormente, se integran las capas para obtener un resultado final (Manzano-Solís, Pineda-Jaimes y Gómez Albores, 2019). En el presente estudio se empleó la forma más simple de esta técnica, asignando el mismo peso a todas las variables consideradas mediante el software QGIS, versión 3.16.

Se generaron mapas de aptitud individuales para cada variable, con el propósito de estimar la superficie correspondiente a cada nivel de aptitud utilizando QGIS, versión 3.16. Según Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006), estos mapas son útiles para identificar los factores que limitan el cultivo en zonas que no presentan condiciones óptimas. Posteriormente, integramos dichos mapas en una sola capa con valores de 4 a 16 y la reclasificamos de la siguiente manera: valores iguales a 4 correspondieron al nivel de aptitud alto; 5 a 7 al nivel medio; 8 a 9 al nivel bajo y valores mayores a 9 al nivel no apto. El amplio intervalo definido para la categoría no apta buscó incrementar la confiabilidad en la delimitación de zonas no aptas para el cultivo de café. Las capas ráster se transformaron en polígonos (*shapefile*) y se eliminaron las áreas de exclusión previamente definidas, lo que permitió identificar el número de parcelas y la superficie cultivada en cada nivel de aptitud.

Finalmente, se realizó un análisis complementario en los municipios de Ángel Albino Corzo, Capitán Luis Ángel Vidal, Chicomuselo, La Concordia, Montecristo de Guerrero y Siltepec, seleccionados por su relevancia productiva y socioecológica, ya que concentran alta diversidad agroecológica, fuerte dependencia económica del café y elevados índices de marginación. Este análisis a escala municipal complementa la visión estatal e integra la dimensión de incidencia del proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas (ProNacEs-CONAHCYT)”, orientado a

fortalecer a los pequeños productores mediante el reconocimiento de los servicios ecosistémicos de los sistemas agroforestales en la mitigación y adaptación al cambio climático (Bolaños-González *et al.*, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura

Encontramos temperaturas medias mínimas de 7.8 °C en zonas montañosas y temperaturas medias máximas de 28.4 °C en la planicie costera y en los límites con Veracruz y Tabasco. Debido a estas condiciones, dichas regiones se clasificaron como no aptas para la producción de café (Figura 2). De los 72,947.8 km² de extensión, el 19.6% presentó un nivel de aptitud alto, el 25.8% medio, el 33.2% bajo y el 16.0% no apto; el 5.4% restante correspondió a zonas de exclusión.

El número y la cantidad de parcelas en los distintos grados de aptitud de las variables individuales, se reportan en la Tabla 2. Dicha tabla muestra que, en el caso de la temperatura media, el 51.9% de las parcelas se localizó en el nivel de aptitud alto de esta variable. Mientras que, no se encontraron plantaciones en áreas con temperaturas inferiores a 12 °C, situación que se justifica por los severos límites fisiológicos que impone el frío a la planta de *C. arabica*.

Sin embargo, se identificaron 4,872 parcelas (8,811.6 ha) en áreas costeras con temperaturas promedio superiores a 26 °C, lo que representa una restricción para la producción de *C. arabica*. Estas parcelas podrían corresponder a *C. canephora*, especie con alta tolerancia al estrés por sequía (Quintana-Escobar *et al.*, 2017) cuyo cultivo se ha documentado en Chiapas, México en altitudes inferiores a 500 msnm (Schroth *et al.*, 2009). Al respecto, Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006) documentaron que en Veracruz las altas temperaturas y el déficit hídrico limitan la viabilidad de sistemas agroforestales de *C. arabica* y palma camedor (*Chamaedorea elegans*). Este comportamiento es consistente con los resultados del presente estudio, donde las condiciones térmicas observadas se aproximan o superan los umbrales óptimos del cultivo, reduciendo así su aptitud agroclimática.

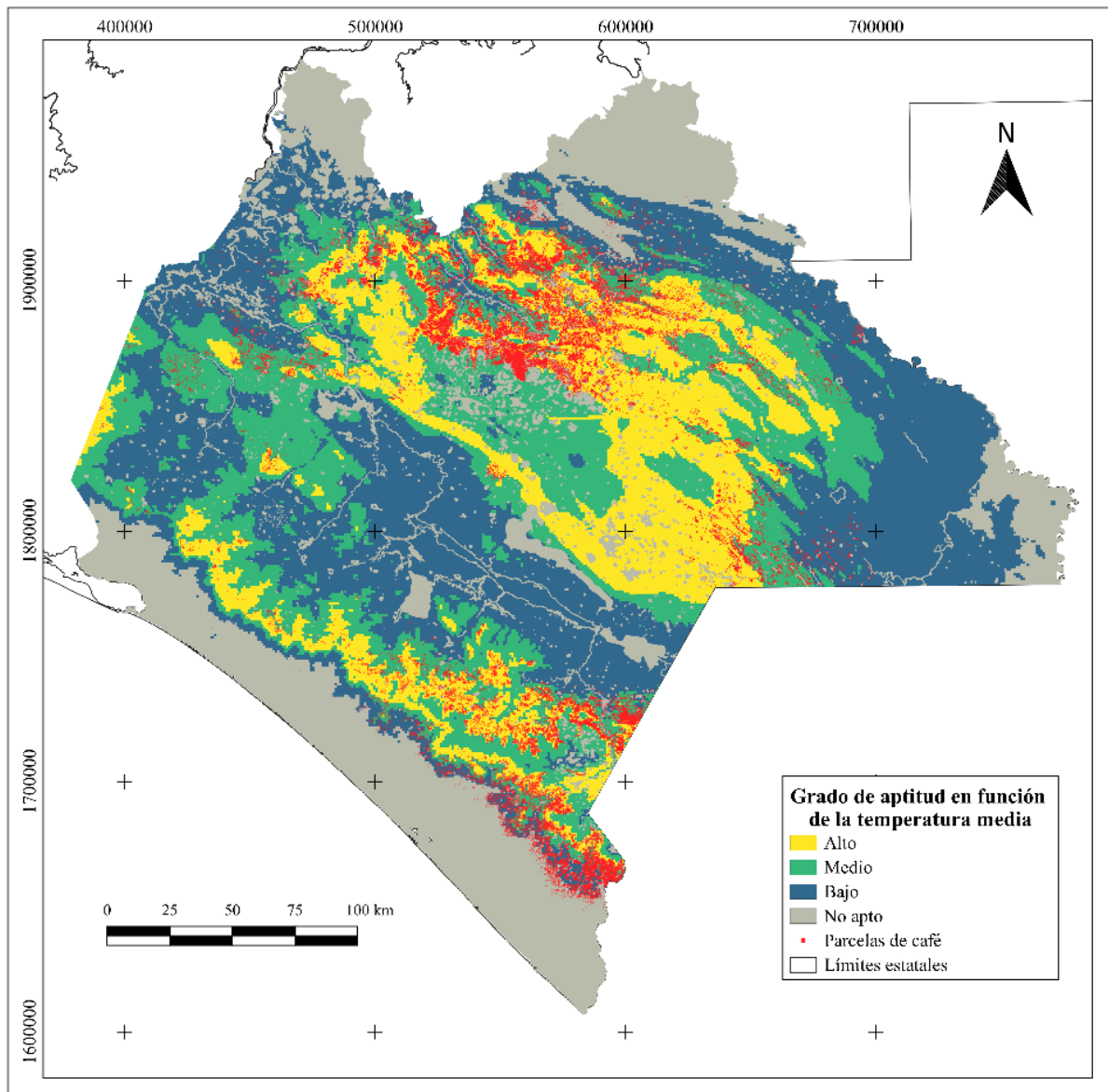


Figura 2. Mapa de aptitud para *Coffea arabica* en función de la temperatura media. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Número de parcelas y superficie ocupada por nivel de aptitud de las variables individuales.

Variable		Nivel de aptitud			
		Alto	Medio	Bajo	No apto
Temperatura media	Parcelas	168,723.0	84,224.0	29,258.0	43,063.0
	Superficie (ha)	109,629.4	71,651.1	41,753.0	23,877.9
Precipitación	Parcelas	98,986.0	22,099.0	105,208.0	98,975.0
	Superficie (ha)	55,398.0	12,493.1	88,295.7	90,724.6
Textura	Parcelas	185,889.0	99,875.0	*	39,504.0
	Superficie (ha)	152,364.9	75,878.8	*	18,667.8
Altitud	Parcelas	179,375.0	74,097.0	19,017.0	52,779.0
	Superficie (ha)	131,422.3	60,259.5	22,837.7	32,392.0

*Esta categoría no se consideró en el análisis.

En este contexto, el uso de sombra se plantea como una estrategia fundamental para mantener la producción de café bajo escenarios de incremento térmico asociados al CCG. Al respecto, Parada-Molina *et al.* (2022) reportaron que, bajo la sombra de cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*), las temperaturas máximas se redujeron en 1.9 °C respecto a parcelas a pleno sol. Lo que confirma el potencial de esta práctica para mitigar el estrés térmico en zonas cafetaleras.

Precipitación

La precipitación es uno de los factores más determinantes para la idoneidad del café (Soto *et al.*, 2001b). En este sentido, Schroth *et al.* (2009) señalan que la floración se activa con lluvias iniciales de al menos 7 a 10 mm; si estas no son constantes, la floración y la maduración pueden volverse erráticas, mientras que lluvias excesivas provocan la caída de flores y frutos. Según Soto *et al.* (2001a), para alcanzar rendimientos cercanos a 2 Mg ha⁻¹ de café verde se requiere una precipitación anual superior a 1,800 mm, no obstante, es fundamental que la precipitación se distribuya uniformemente entre mayo y octubre (López-Carmona *et al.*, 2021).

En Chiapas, México la precipitación mostró valores mínimos de 591 mm y máximos de 4,615 mm año⁻¹. Según esta variable 13,254.9 km² presentaron aptitud alta, 29,421.7 km² aptitud media, 16,463.1 km² aptitud baja y 9,840.5 km² fueron no aptos (Figura 3). Por otro lado, el 30.4% de las parcelas (22.4% de la superficie cultivada) se ubicó en áreas con nivel de aptitud alto. Mientras que, en los límites con Tabasco, algunas zonas fueron clasificadas como no aptas debido a la elevada precipitación (>2,500 mm).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Aceves-Navarro *et al.* (2020), quienes documentaron restricciones para el cultivo de *C. arabica* debido al exceso de lluvias en los municipios de Teapa, Tacotalpa, Jalapa, Macuspana y Huimanguillo, en el estado de Tabasco. Asimismo, los mapas de temperatura (Figura 2) y precipitación (Figura 3) mostraron patrones similares a los generados por Suárez *et al.* (2021), utilizando datos de estaciones meteorológicas.

Textura del suelo

La textura del suelo mostró que 38,390.5 km² tuvieron aptitud alta (suelos de textura media), 26,929.1 km²

aptitud media (suelos de textura fina) y 2,651.3 km² fueron no aptos (suelos de textura gruesa), los 5,020.2 km² restantes correspondió a zonas de exclusión (Figura 4).

De acuerdo con Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006), los suelos arenosos presentan baja fertilidad y capacidad reducida de retención de humedad, lo que limita el desarrollo del café. En estas condiciones se identificaron 558 parcelas en el área de estudio. Por el contrario, Rosas, Escamilla y Ruiz (2008) destacan que en suelos de textura media o franca se concentra la mayor parte de las unidades de producción orgánica, dado que estas condiciones favorecen el crecimiento y productividad del cafeto. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que la mayor cantidad de parcelas se encontró en suelos con este tipo de textura.

Altitud

La altitud en el estado de Chiapas, México varía entre -23 a 4,083 m. De acuerdo con esta variable, se identificaron 16,816.4 km² con aptitud alta, 19,555.2 km² en aptitud media, 9,651.9 km² en aptitud baja y 23,277.2 km² no aptos (Figura 5). Con respecto a las parcelas, el 55.2% de estas (53.2% de la superficie) se localizaron en el nivel de aptitud alto, mientras que 4.3% de las parcelas (5.8% de la superficie) se ubicaron en zonas no aptas (Tabla 2).

En la zona de estudio también se produce *C. canephora*, por lo que, de acuerdo con Schroth *et al.* (2009) parte de los predios registrados en zonas bajas (<500 m) podrían corresponder a esta especie, ya que reemplaza a *C. arabica* en esas altitudes. Sin embargo, Soto *et al.* (2001b) señalan que *C. arabica* puede cultivarse desde 200 msnm en regiones a 25° de latitud, mientras que en áreas cercanas al ecuador debe establecerse a mayores altitudes para compensar las temperaturas elevadas. Al respecto, Gómez-Tosca *et al.* (2021) estimaron que el intervalo de altitud potencial para *C. arabica* en Decozalapa, Veracruz, va de 589 a 2,262 m. A nivel nacional, el 21.5% de las plantaciones se ubican por debajo de 600 msnm, el 43.5% entre 600 y 900 msnm, y el 35% restante por encima de 900 msnm, incluso en zonas cercanas al nivel del mar en Nayarit y San Luis Potosí (SAGARPA, 2005). Debido a la latitud de Chiapas, México se ha documentado la existencia de *C. arabica* por debajo de los 500 msnm (GBIF, 2025).

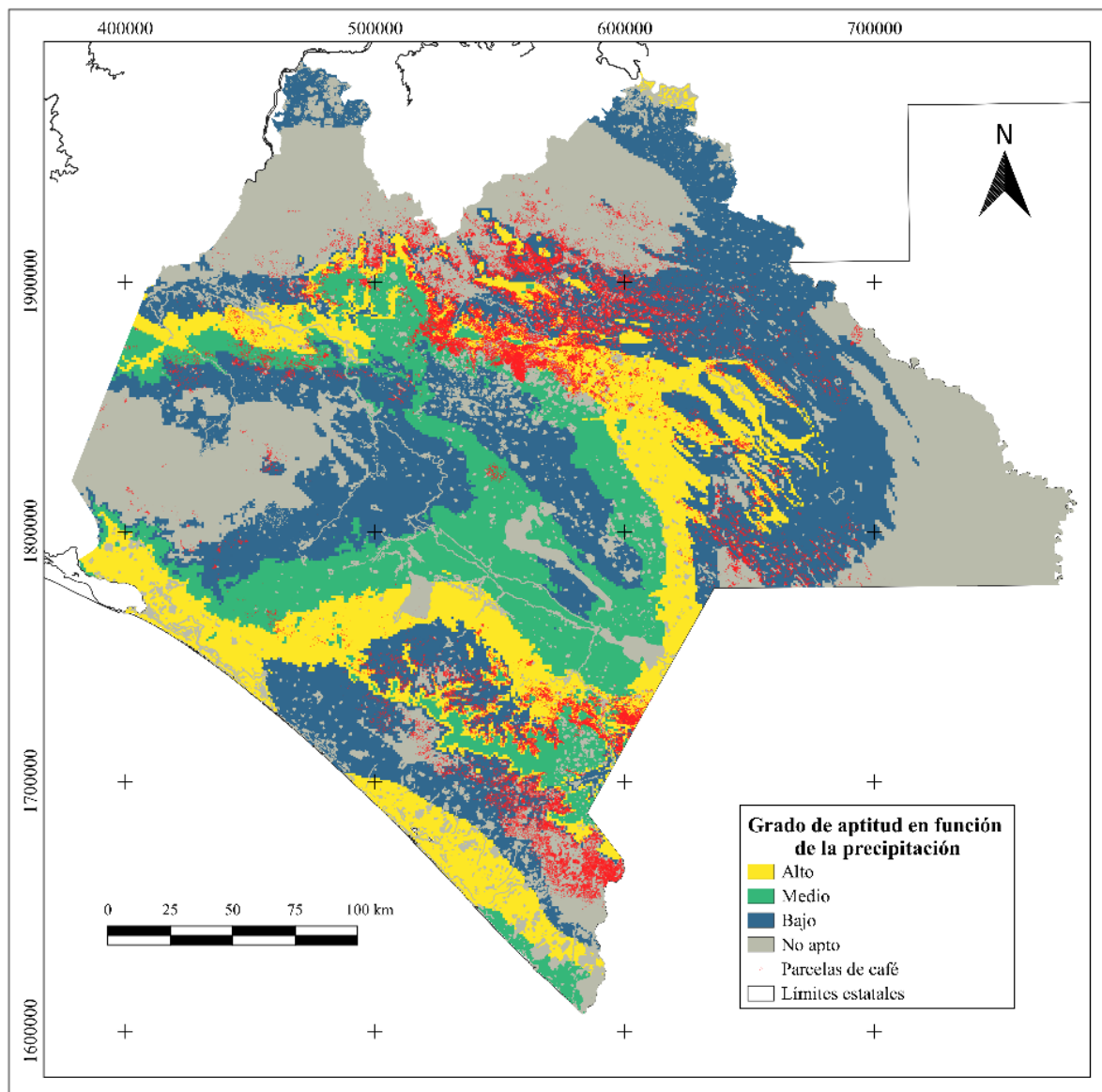


Figura 3. Mapa de aptitud para *Coffea arabica* en función de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

La altitud también influye en la incidencia de plagas y enfermedades. En Oaxaca, López-Carmona *et al.* (2021) reportaron mayor presencia de roya (*Hemileia vastatrix*) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en parcelas ubicadas por debajo de los 1,600 msnm. Asimismo, Jonsson *et al.* (2015) encontraron que, en Uganda, las parcelas con sombra alta (123 árboles ha⁻¹) ubicadas entre 1,511 y 1,605 m, el barrenador blanco (*Monochamus leuconotus*) afectó al 56% de los cafetos, mientras que en predios con sombra baja (0–50 árboles ha⁻¹) entre 1,717 y 1,840 msnm, solo el 27% de los arbustos presentó daño. En este contexto, la broca del café (*Hypothenemus hampei*), también ha mostrado una estrecha relación con las condiciones climáticas. Avelino *et al.* (2015) documentaron en Colombia, Guatemala y Nicaragua que las variaciones en la precipitación, junto con el aumento de las

temperaturas mínimas y la disminución de las máximas, pueden reducir el intervalo térmico, incrementando la incidencia de *H. hampei* en zonas que antes eran poco afectadas.

Estos resultados sugieren que el incremento de sombra, propuesto como medida de adaptación al aumento de temperaturas en zonas bajas, podría también favorecer la mayor incidencia de plagas. Sin embargo, esta interpretación debe matizarse, ya que la presencia de distintos estratos arbóreos genera hábitats para enemigos naturales como avispas parasitoides, arañas, aves e insectos depredadores, los cuales pueden limitar las poblaciones de la broca y otras plagas (Perfecto, Vandermeer y Philpott, 2014). Por lo tanto, estas cuestiones deberán discutirse científicamente, así como sus implicaciones prácticas.

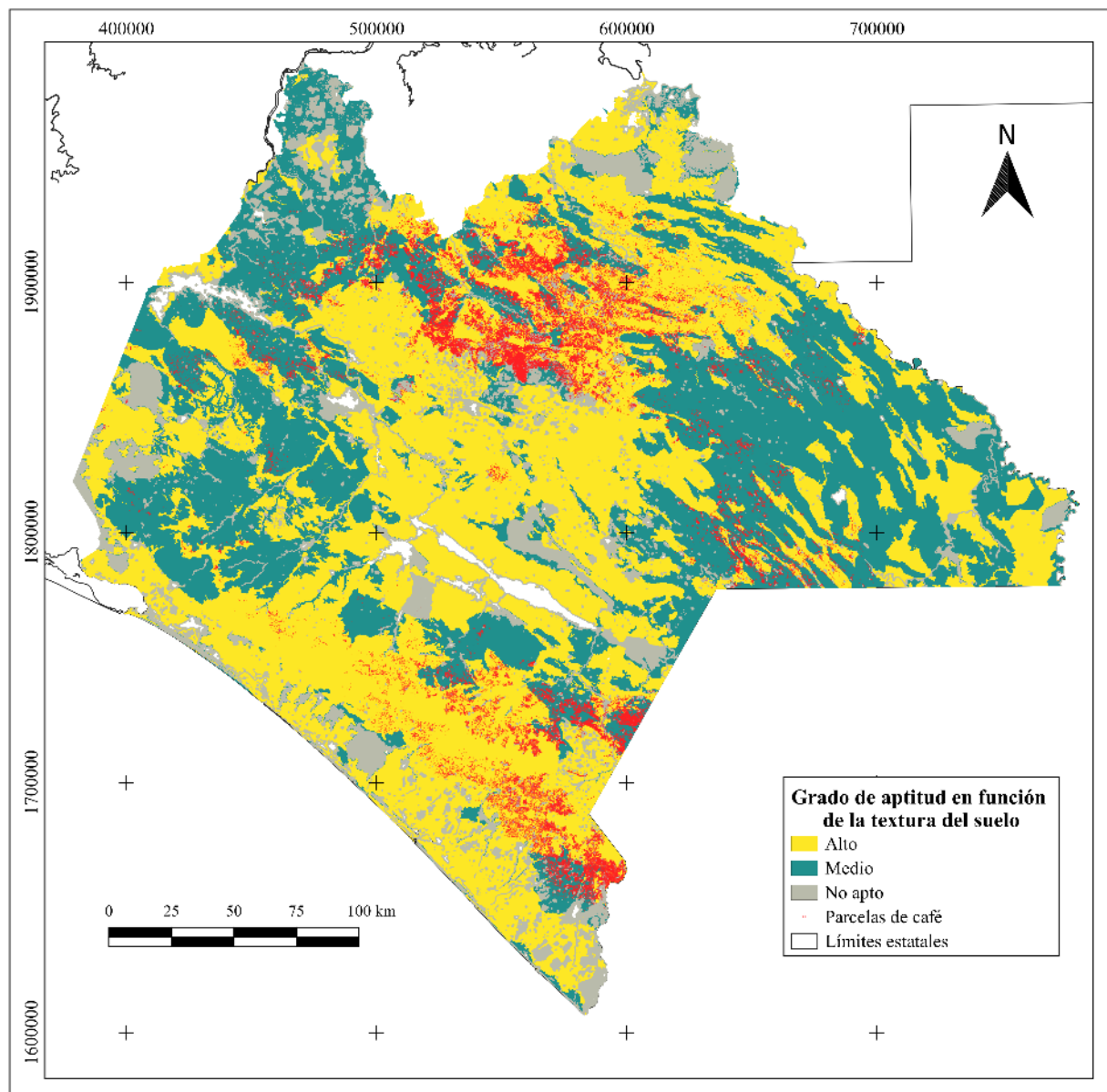


Figura 4. Mapa de aptitud para *Coffea arabica* en función de la textura del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones del CCG pueden redistribuir las áreas aptas hacia mayores altitudes, pero con la consecuencia de una reducción en la superficie cultivable debido al relieve (Parada-Molina *et al.*, 2022). Por encima de 2,200 m existe un alto riesgo de heladas, lo que convierte a estas áreas en no aptas (López-Carmona *et al.*, 2021). Según Schroth *et al.* (2009), el aumento en la aptitud solo se observaría en altitudes donde actualmente el café presenta limitaciones debido a bajas temperaturas. No obstante, estas zonas suelen coincidir con áreas de conservación de bosques primarios y ecosistemas estratégicos (como el bosque mesófilo de montaña), por lo que la expansión del cultivo acarrearía conflictos de conservación y gestión de reservas naturales debido a

cambios de uso de suelo o a la degradación de la cubierta forestal (Bunn *et al.*, 2015).

Pese a la estrecha relación entre altitud y temperatura, en la que la temperatura media anual disminuye sistemáticamente con el incremento de la elevación (Pérez Rendón, Ramírez Builes y Peña Quiñones, 2016; Murga-Orrillo *et al.*, 2021), la altitud se justifica como variable independiente, ya que restringe la superficie apta que podría sobreestimarse al considerar únicamente la precipitación y la textura del suelo. En este trabajo, la inclusión de la altitud redujo el efecto favorable de la precipitación (Figura 3) y de la textura (Figura 4) en zonas costeras, lo que evitó sobreestimar áreas óptimas bajo condiciones térmicas subóptimas para *C. arabica*. Este contraste se aprecia en Quiroz *et*

al. (2022), quienes, pese a incluir la altitud en su análisis, reportaron aptitud marginal en la zona costera del Soconusco bajo escenarios de cambio climático, situación que no se presentó en este estudio, lo que se atribuye a la asignación de pesos iguales a todas las variables consideradas.

En lo referente a los mapas de aptitud individuales, la precipitación mostró que únicamente el 30.4% de los predios (22.4% de la superficie) se encontraba en el nivel alto, mientras que en los niveles bajo y no apto se

registraron el 32.3% y 30.4% de las parcelas, respectivamente. En contraste, más del 50% de las parcelas se localizaron en el nivel alto en las tres variables restantes (temperatura, textura y altitud). Por lo tanto, la precipitación se identificó como la variable que limitó en mayor medida la aptitud de las tierras cafetaleras en Chiapas, México, al presentar la menor superficie con grado de aptitud alto y al concentrar un mayor porcentaje de parcelas en categorías de aptitud baja o no apta (Tabla 2).

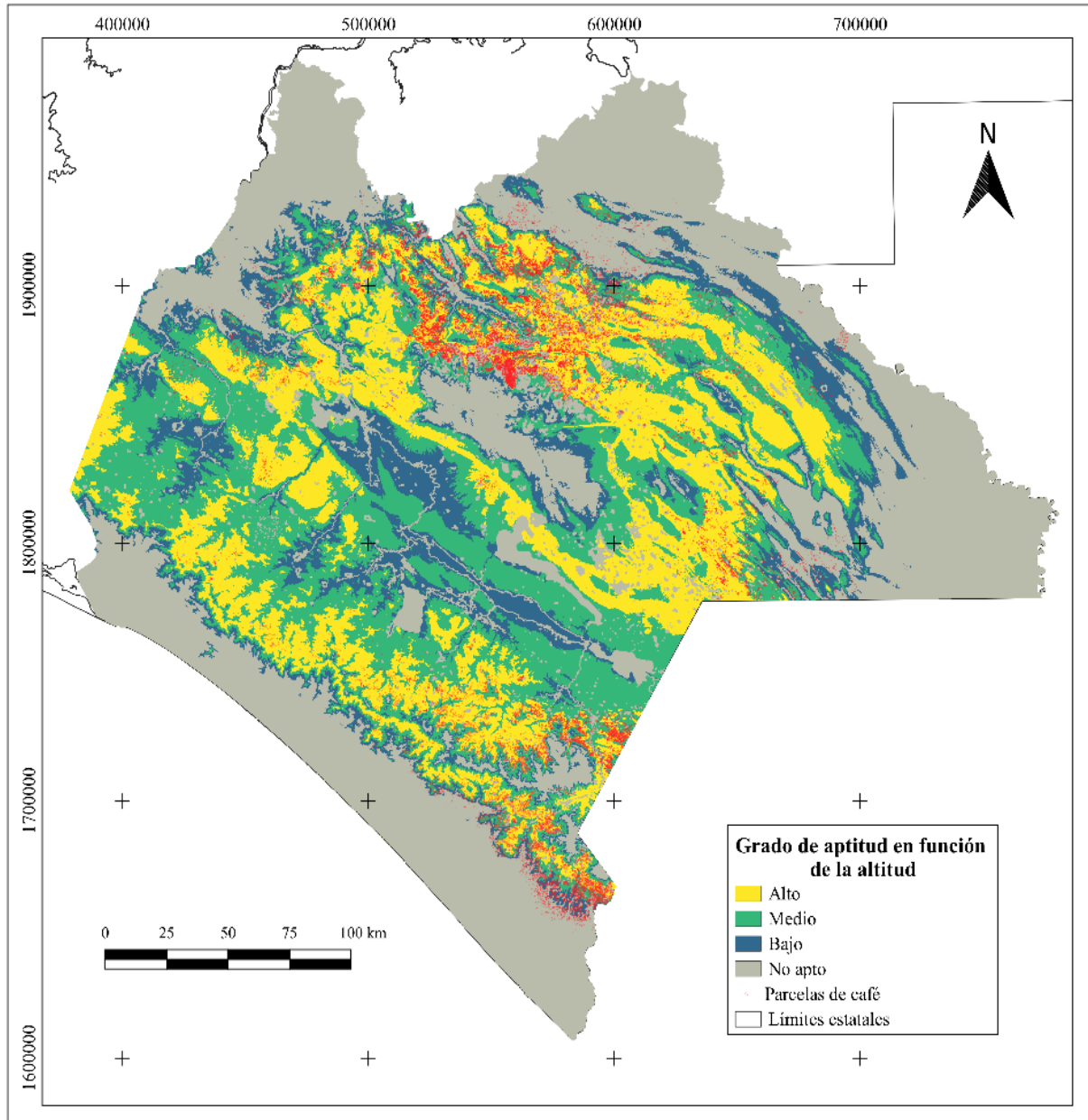


Figura 5. Mapa de aptitud para *Coffea arabica* en función de la altitud. Fuente: Elaboración propia.

Mapa de aptitud

Con base en el mapa de aptitud (Figura 6) se determinó que Chiapas, México cuenta con 2,143.0 km² (214,300 ha) de aptitud alta, 20,477.1 km² de aptitud media, 15,244.9 km² de aptitud baja y 35,082.9 km² no aptos para cultivar *C. arabica* (Figura 6). En cuanto a las parcelas, se identificaron 50,209 (25,045.6 ha) en zonas de alta aptitud, 164,909 (126,659.4 ha) en aptitud media, 39,454 (40,118.9 ha) en aptitud baja, 31,734 (36,899.9 ha) en zonas no aptas y 38,797 (18,091.9 ha) en áreas de exclusión. Estas últimas correspondieron a superficies muy pequeñas que, al encontrarse dentro del polígono de las comunidades, es

posible que representen huertos familiares o prácticas de agricultura de traspatio.

De esta forma, solo el 15.4% de las unidades de producción (10.1% de la superficie cultivada) se localizan en áreas con alta aptitud. En estas zonas, la relación entre superficie cultivada y número de unidades de producción es inferior a 0.6 ha, lo que evidencia que estas parcelas son pequeñas y se localizan en sitios de difícil acceso. Estas condiciones, sumadas al rezago agrario y a los bajos ingresos de los productores, limitan la consolidación de plantaciones a gran escala y refuerzan la prevalencia de sistemas productivos de subsistencia (Medina-Meléndez *et al.*, 2016).

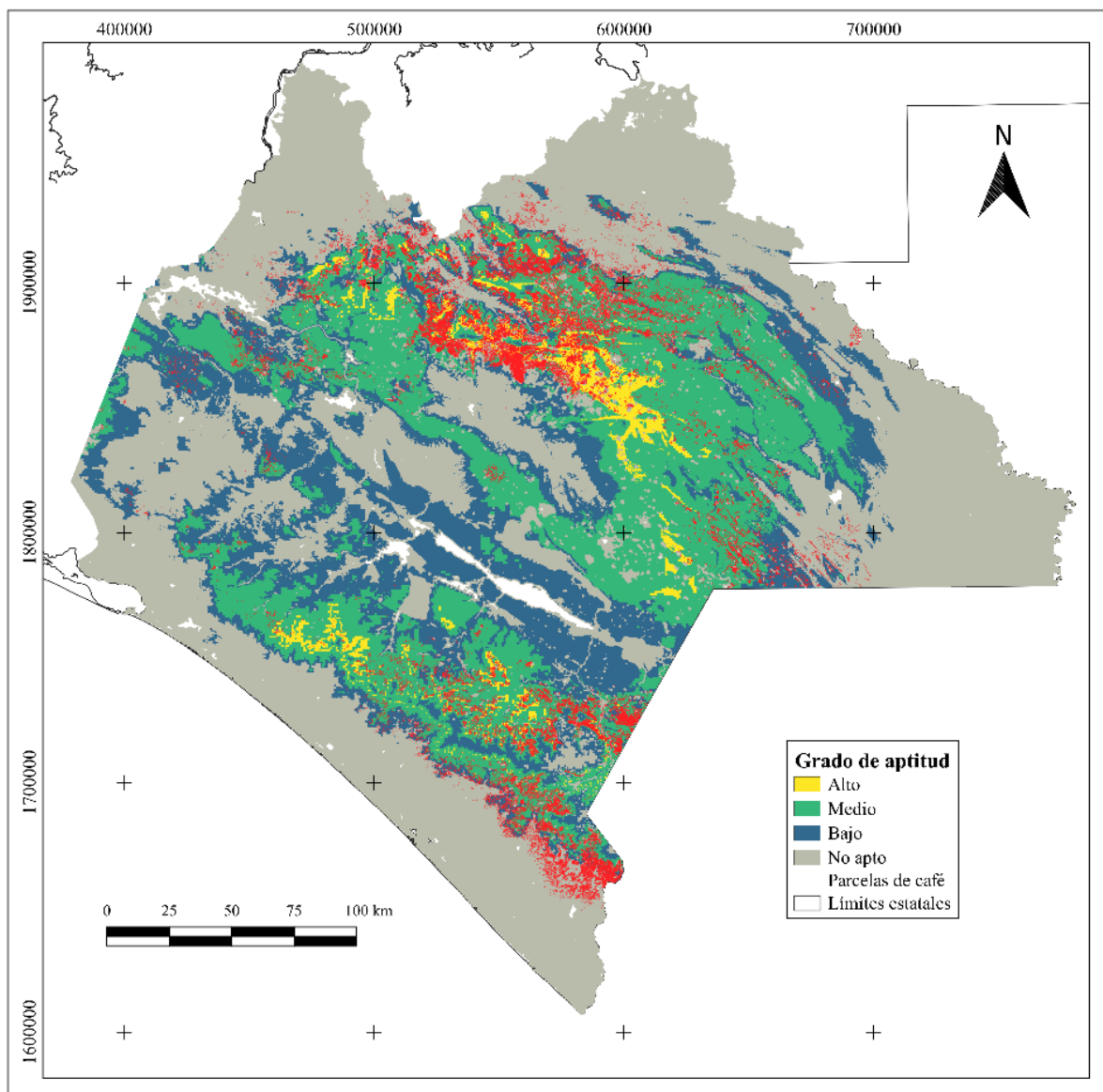


Figura 6. Mapa de aptitud de las tierras para la producción de *Coffea arabica*. Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, más del 80% de las unidades de producción y el 85% de la superficie cafetalera se encuentran en zonas con limitaciones para que este cultivo alcance los rendimientos máximos. Por ello, este mapa de aptitud representa una herramienta estratégica para el reordenamiento de las áreas productoras y la identificación de las variables que restringen el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo (Pineda y Suárez, 2014, Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006). Asimismo, puede emplearse para respaldar la demanda de precios diferenciados en café proveniente de zonas de alta aptitud y para formular políticas de fomento productivo que impulsen prácticas de manejo compatibles con la conservación, como el café bajo sombra. Este aspecto adquiere mayor relevancia considerando que la tendencia de la aptitud es migrar hacia zonas de mayor altitud, que coincide con áreas prioritarias para la provisión de servicios ecosistémicos (Bunn *et al.*, 2015). Por lo que esta información permitirá anticipar escenarios futuros y diseñar medidas de adaptación que aseguren la sostenibilidad del sector cafetalero en Chiapas, México.

No obstante, González y Hernández (2016) y Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006) señalan que la escala de análisis es determinante para definir la utilidad de la cartografía generada. Sus estudios emplearon una escala 1:250,000, considerada pequeña en comparación con la utilizada en este trabajo (1:4,200,000). No obstante, la información disponible permitiría elaborar cartografía más detallada, acorde a las necesidades de planeación.

Análisis en municipios de la Sierra Madre de Chiapas, México

El proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la caficultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas” se desarrolla en los municipios Ángel Albino Corzo, Capitán Luis Ángel Vidal, Chicomuselo, La Concordia, Montecristo de Guerrero y Siltepec. Por ello, se analizó el nivel de aptitud de las tierras en dichos municipios (Tabla 3). Asimismo, se identificó la cantidad de parcelas y superficie de café cultivada en cada nivel de aptitud (Tabla 4) y se generó un mapa de aptitud de las tierras de esta zona (Figura 7).

Tabla 3. Superficie apta en los municipios estudiados.

Municipio	Nivel de aptitud				Exclusiones	Total
	Alto	Medio	Bajo	No apto (ha)		
Ángel Albino Corzo	4,196.7	34,200.0	17,098.1	1,218.7	1,375.6	58,089.0
Capitán Luis Ángel Vidal	1,781.6	13,598.3	7,012.4	0.0	148.9	22,541.1
Chicomuselo	6,455.9	45,691.4	42,037.0	3,920.7	1,499.9	99,604.9
La Concordia	11,155.3	105,254.7	104,144.2	10,518.4	26,109.6	257,182.1
Montecristo de Guerrero	1,901.1	16,226.3	1,160.3	159.2	343.0	19,790.0
Siltepec	2,585.4	18,274.2	11,493.2	5,100.4	1,000.8	38,454.0
Total	28,075.9	233,244.9	182,945.1	20,917.4	30,477.8	495,661.1

Tabla 4. Nivel de aptitud de las parcelas cultivadas en los municipios considerados.

Municipio			Nivel de aptitud				Exclusiones	Total
			Alto	Medio	Bajo	No apto		
Ángel Albino Corzo	Parcelas		495.0	2,191.0	765.0	14.0	119.0	3,584.0
	Superficie (ha)		1,218.0	5,561.0	1,888.4	16.9	230.6	8,914.9
Capitán Luis Ángel Vidal	Parcelas		255.0	1,024.0	0.0	0.0	23.0	1,302.0
	Superficie (ha)		435.0	1,848.0	0.0	0.0	43.3	2,326.2
Chicomuselo	Parcelas		1,203.0	2,321.0	155.0	2.0	55.0	3,736.0
	Superficie (ha)		1,839.7	2,559.3	87.1	3.0	30.2	4,519.1
La Concordia	Parcelas		329.0	2,190.0	117.0	2.0	43.0	2,681.0
	Superficie (ha)		1,328.2	7,119.7	196.1	3.7	44.3	8,692.0
Montecristo de Guerrero	Parcelas		365.0	1,394.0	10.0	5.0	62.0	1,836.0
	Superficie (ha)		679.6	3,022.6	30.0	12.0	76.0	3,820.2
Siltepec	Parcelas		631.0	3,378.0	147.0	0.0	380	4,536.0
	Superficie (ha)		561.7	3,009.1	110.4	0.0	291.4	3,972.5
Total	Parcelas		3,278.0	12,498.0	1,194.0	23.0	682	17,675.0
	Superficie (ha)		6,062.1	23,119.7	2,311.9	35.5	715.7	32,244.9

Los seis municipios abarcan una superficie de 495,661.1 ha (Tabla 3), de las cuales el 5.7% corresponde a zonas con aptitud alta, 47.1% a aptitud media, 36.9% a aptitud baja, 4.2% no apta y 6.1% a áreas excluidas. En total, los municipios analizados registraron 17,675 predios cafetaleros (32,244.9 ha). Respecto al nivel de aptitud, Chicomuselo concentra el mayor número de parcelas en aptitud alta (6.8%), Siltepec en la aptitud media (19.1%) y Ángel Albino Corzo en la aptitud baja (4.3%). En términos de superficie, los municipios antes mencionados destacan en las categorías alta y baja, pero La Concordia presenta la mayor superficie en el nivel medio (22.1%).

De acuerdo con la Tabla 4 y la Figura 7, una fracción de las parcelas se localizó en zonas de exclusión, situación atribuida a su proximidad a las localidades rurales. Por otro lado, la comparación entre las Tablas 3 y 4 evidencia una subutilización de las zonas con

aptitud alta para el cultivo de *C. arabica*, lo que sugiere que, bajo condiciones agroclimáticas favorables, aún existe margen para ampliar la producción en dichas áreas. No obstante, estas zonas corresponden en su mayoría a coberturas forestales, principalmente bosques de pino, muchos de ellos ubicados dentro de áreas naturales protegidas. En este contexto, una eventual expansión cafetalera implicaría la conversión de usos forestales a sistemas agrícolas perennes, lo que podría generar externalidades ambientales significativas, como la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos, así como conflictos entre los objetivos de conservación y de producción (Schroth *et al.*, 2009). Como alternativa, el establecimiento de sistemas agroforestales bajo esquemas de manejo sustentable podría mitigar parte de estos impactos, aunque su implementación requeriría una planificación territorial cuidadosa y un marco normativo adecuado.

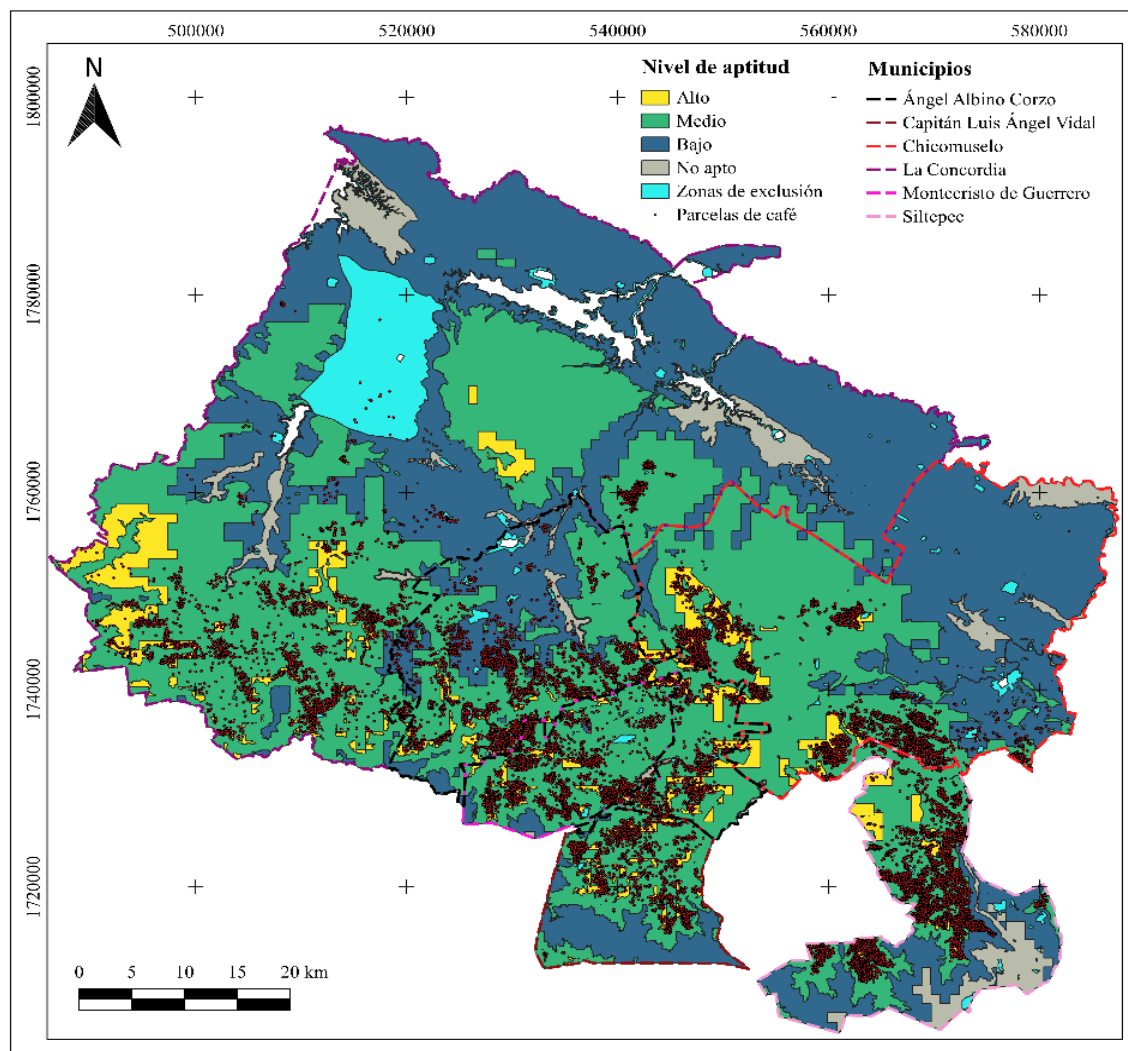


Figura 7. Mapa de aptitud para *Coffea arabica* en los municipios donde se desarrolla el proyecto “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”. Fuente: Elaboración propia.

Recomendaciones

En este estudio se consideraron los requerimientos edafoclimáticos generales de *C. arabica*; sin embargo, es ampliamente reconocido que existen variedades con demandas agroecológicas más específicas, particularmente en términos de tolerancia térmica, requerimientos hídricos y respuesta al manejo bajo sombra. Para superar esta limitación, futuros trabajos podrían desarrollar mapas de aptitud diferenciados por variedad, lo que permitiría generar información más precisa para la planificación territorial, el manejo agronómico y el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático. Asimismo, otras aproximaciones metodológicas podrían complementar el enfoque aquí empleado. Entre ellas destaca el modelado de nicho ecológico, el cual ha sido utilizado para estimar la distribución potencial actual del cultivo de *C. arabica* en estados como Nayarit (Jiménez *et al.*, 2023), así como la distribución actual y futura de dicha especie bajo escenarios de cambio climático en tres regiones de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México (Guerrero-Carrera, Hernández-Flores y Jaramillo-Villanueva, 2025). De igual forma, los modelos basados en la productividad y la rentabilidad, como los desarrollados por Espinosa-García *et al.* (2016), permiten evaluar el potencial productivo y financiero del café mediante simulaciones de rendimiento y análisis de beneficio–costo, identificando regiones con alta rentabilidad y capacidad de expansión.

No obstante, estos enfoques dependen fuertemente de supuestos tecnológicos y económicos, y su aplicación espacial suele ser más agregada, lo que limita su capacidad para identificar restricciones biofísicas locales. En contraste, el análisis multicriterio utilizado en este estudio integra explícitamente variables climáticas, edáficas y topográficas, junto con la distribución real de las parcelas cafetaleras, lo que ofrece una evaluación integral, transparente y replicable de la aptitud agroclimática del territorio. Aunque este método no estima rendimientos ni probabilidades de presencia, su principal fortaleza radica en su aplicabilidad directa a la planificación territorial. Este enfoque permitió identificar una desconexión entre la aptitud de la tierra y la localización actual del cultivo, así como reconocer a la precipitación como el principal factor limitante, información clave para orientar estrategias de adaptación y manejo sustentable de la cafecultura ante el cambio climático.

Finalmente, se recomienda fortalecer y promover las cooperativas cafetaleras en zonas con alta aptitud agroclimática, orientadas a la certificación de sostenibilidad y a la adopción de prácticas productivas resilientes. Estas organizaciones pueden desempeñar un papel estratégico al facilitar el acceso a la asistencia técnica, al financiamiento, a mercados diferenciados y

a precios justos, en especial para pequeños productores. Asimismo, se sugiere implementar un sistema de monitoreo continuo basado en datos satelitales y sensores remotos, que permita actualizar los mapas de aptitud, ofrecer retroalimentación oportuna a productores y autoridades, y fortalecer la gestión territorial y la sostenibilidad de la cafecultura mexicana.

CONCLUSIONES

La reclasificación de las variables agroecológicas permitió identificar los diferentes grados de aptitud de las tierras de Chiapas, México, para *C. arabica*. Aunque existen 214,300 ha con aptitud alta, solo se cultivan bajo estas condiciones 25,045.6 ha, lo que refleja una clara subutilización del potencial productivo, mientras que cerca del 90% de la cafecultura se desarrolla en zonas con limitaciones. Entre las variables analizadas, la precipitación resultó ser la más restrictiva, al definir la menor superficie con condiciones óptimas para el cultivo, lo que resalta la vulnerabilidad de la cafecultura ante escenarios de cambio climático.

Estos resultados ponen de relieve la necesidad de reorientar la planificación territorial y aprovechar de manera estratégica las áreas con mayor aptitud, mediante políticas públicas que impulsen prácticas sostenibles, como la cafecultura bajo sombra. Asimismo, el mapa de aptitud generado constituye una herramienta clave para anticipar escenarios asociados al cambio climático, promover el reordenamiento productivo y fortalecer la resiliencia socioecológica del sector cafetalero en Chiapas, México.

La adopción de tecnologías emergentes, como sensores de humedad y temperatura, drones con cámaras multispectrales e infrarrojo térmico e imágenes satelitales de alta resolución, puede mejorar el manejo de parcelas con limitaciones edafoclimáticas. Asimismo, considerando que la mayor parte de la producción estatal proviene de pequeños caficultores, las políticas públicas deben priorizar su capacitación, el acceso a tecnología y certificaciones que promuevan la sostenibilidad y la equidad en el sector.

Reconocimientos

Al Colegio de Postgraduados y al CONAHCYT, por su apoyo institucional y el financiamiento que hicieron posible esta investigación, desarrollada en el marco del proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”.

Declaration of conflicts of interest. The authors declare that there are no conflicts of interest in relation to this study.

Compliance with ethical standards. A meeting was convened and informed consent was obtained from all persons who participated in the research.

Author contribution statement (CRediT). **J. M. Salvador-Castillo** – Writing – original draft; Data curation; Formal analysis. **M. A. Bolaños-González** – Methodology; Writing – original draft, Supervision. **C. Ramírez-Ayala** – Writing – review & editing; Data analysis. **A. Libert-Amico** – Validation; Writing – review & editing. **A. E. Rico-Sánchez** – Formal analysis; Writing – review & editing.

REFERENCES

- Aceves-Navarro, L.A., Rivera-Hernández, B., Santillán-Fernández, A., Arrieta-Rivera, A., Juárez-López, J.F. and Gutiérrez-Burón, R., 2020. Impacto del cambio climático en la adaptación del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en Tabasco, México. *AgroProductividad*, 13(4), pp. 53-58. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1618>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J. and Morales, C., 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), pp. 303–321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Azamar Alonso, A., 2025. Sembrando Vida, ¿ilusión colectiva o proyecto real? *Perfiles latinoamericanos*, 33(66), pp.97–125. <https://doi.org/10.18504/pl3366-006-2025>
- Bautista Calderon, E.A., Gutiérrez Castorena, E.V., Ordaz Chaparro, V.M., Gutiérrez Castorena, M. del C. and Cajuste Bontemps, L., 2018. Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana*, 36(3), pp. 261–273. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>
- Benítez García, E., 2014. Transmisión de los precios internacionales del café y su relación con los precios que reciben los productores de la Sierra Norte de Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Estado de México, 139 p.
- Bolaños-González, M.A., Libert-Amico, A., Paz-Pellat, F., Salas-Agular, V., Villalobos-Sánchez, G., Escamilla-Prado, E., Velázquez-Rodríguez, A.S. and Morales-Reyes, E.I., 2021. Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas. En: J. M. Hernández, M. Manzano, M. Bolaños and P. Ibarra, eds. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: síntesis a 2021. Texcoco, Estado de México, México, pp. 633–638.
- Bunn, C., Läderach, P., Jimenez, J.G.P., Montagnon, C. and 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), pp. e0140490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140490>
- Cerda, R., Avelino, J., Harvey, C.A., Gary, C., Tixier, P. and Allinne, C., 2020. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 134, pp. 105149. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>
- Cerda-Ocaranza, M., Salgado-Mora, M., Aguirre-Cadena, J. and Pérez, N., 2023. Respuesta del café robusta (*Coffea canephora*) Pierre ex A. Froehner a diferentes manejos de sombra y fertilización, en el sur de Chiapas, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7, pp.5547–5565. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4870
- CONABIO, 2023. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Accessed octubre 2022].
- Davis, A.P., Chadburn, H., Moat, J., O’Sullivan, R., Hargreaves, S. and Nic Lughadha, E., 2019. High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. *Science Advances*, 5(1), pp. eaav3473. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3473>
- Espinosa-García, J.A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Uresti-Durán, D., Góngora-González, S.F., and Inurreta-Aguirre, H.D., 2016. Productividad y

- rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), pp. 2011–2024.
- FAOSTAT, 2025. Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Available at: <https://www.fao.org/faostat/es/#data> [Accessed 20 December 2025].
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), pp. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Gastélum, R.G., 2024. Perspectiva del programa sembrando vida. Un enfoque de política pública y marco lógico. *Brazilian Journal of Business*, 6(2), pp. e70066–e70066. <https://doi.org/10.34140/bjbv6n2-023>
- GBIF, 2025. Global Biodiversity Information Facility. GBIF Occurrence Download Available at: <https://doi.org/10.15468/dl.e4bkv2> [Accessed 20 December 2025].
- Geoweb Chiapas 3.0, 2022. Consulta de información geográfica y estadística de Chiapas. Disponible en: <https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/> [Accessed octubre 2022].
- Gómez-Tosca, E.G., Alvarado-Castillo, G., Benítez, G., Cerdán-Cabrera, C.R. and Estrada-Contreras, I., 2021. Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 27(2), pp. e2722070. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722070>
- González González, H.A. and Hernández Santana, J.R., 2016. Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, 90, pp. 105–118. <https://doi.org/10.14350/rig.49329>
- Grüter, R., Trachsel, T., Laube, P. and Jaisli, I., 2022. Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change. *PLOS ONE*, 17(1), pp. e0261976. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261976>
- Guerrero-Carrera, J., Hernández-Flores, J.A. and Jaramillo-Villanueva, J.L., 2025. Dinámica de la distribución potencial de *Coffea arabica* y *C. canephora* ante el cambio climático en tres regiones de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.5822>
- Hernández-Castán, J. and Tapia-Hervert, C. G., 2023. Percepción de los efectos del cambio climático y prácticas de adaptación de los caficultores del Estado de Puebla, México. *Revista Bio Ciencias*, 10, pp. e1419. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1419>
- INEGI. 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/> [Accessed octubre 2022]
- INEGI. 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional)*. Available at: <https://www.inegi.org.mx/programas/usyv/> [Accessed octubre 2022].
- International Coffee Organization, 2023. Public Market Information. Available at: <https://ico.org/resources/public-market-information/> [Accessed December 2025].
- Jha, S., Bacon, C.M., Philpott, S.M., Rice, R.A., Méndez, V.E. and Läderach, P., 2011. A review of ecosystem services, farmer livelihoods, and value chains in shade coffee agroecosystems. In: W.B. Campbell and S. Lopez Ortiz, eds. *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field*. Dordrecht: Springer Netherlands. pp. 141–208. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1309-3_4
- Jiménez, A.A., Marcelino Flores, S.M.L., González, O.N. and Vilchez, F.F., 2023. Potential Coffee Distribution in a Central-Western Region of Mexico. *Ecologies*, 4(2), pp. 269–287. <https://doi.org/10.3390/ecologies4020018>.
- Jonsson, M., Raphael, I.A., Ekbom, B., Kyamanywa, S. and Karungi, J., 2015. Contrasting effects of shade level and altitude on two important coffee pests. *Journal of Pest Science*, 88(2), pp. 281–287. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0615-1>

- Läderach, P., Oberthür, T., Cook, S., Estrada Iza, M., Pohlen, J.A., Fisher, M. and Rosales Lechuga, R., 2011. Systematic agronomic farm management for improved coffee quality. *Field Crops Research*, 120(3), pp. 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.006>
- Lamichhane, J.R., 2020. Editorial - Crop health in agroforestry systems: An introduction to the special issue. *Crop Protection*, 134, pp. 105187. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105187>
- López-Carmona, D., Gallegos, Á., Palma, D.J., Martín-Morales, G., Barragán-Maravilla, M., Hernández-Vallecillo, G. and Bautista, F., 2021. Selección de tierras para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio y conocimiento local. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1), pp. e2419. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2419>
- Manzano-Solís, L., Pineda-Jaimes, N. and Gómez Albores, M., 2019. Método de evaluación multicriterio, en G. D. Buzai and M. V. Santana Juárez, eds. *Métodos cuantitativos en Geografía Humana*. 1ª ed. Buenos Aires: Impresiones Buenos Aires Editorial, pp. 351.
- Medina-Meléndez, J.A., Ruiz-Nájera, R.E., Gómez-Castañeda, J.C., Sánchez-Yáñez, J.M., Gómez-Alfaro, G. and Pinto-Molina, O., 2016. Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10(2), pp. 33–43.
- Monterroso-Rivas, A.I., Conde-Álvarez, A.C., Gómez-Díaz, J.D. and 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), pp. 47–60.
- Muchane, M.N., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L. and Barrios, E., 2020. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, pp. 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Murga-Orrillo, H., Coronado Jorge, M.F., Abanto-Rodríguez, C., Almeida Lobo, F.D., 2021. Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera y bosques*, 27(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732271>
- Oliva Velas, A. and López Arévalo, J., 2019. Crisis estructural: pobreza y migración en Chiapas. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, VIII(20), pp. 84–100. <https://doi.org/10.31644/IMASD.20.2019.a05>
- Parada-Molina, P.C., Barradas-Miranda, V.L., Ortiz Ceballos, G., Cervantes-Pérez, J. and Cerdán Cabrera, C.R., 2022. Climatic suitability for *Coffea arabica* L. front to climate events extreme: Tree cover importance. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), pp. 53–62. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.005>
- Pérez Rendón, E.P., Ramírez Builes, V.H. and Peña Quiñones, A.J., 2016. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 89, pp.23–40. <https://doi.org/10.14350/rig.38707>
- Pérez-Portilla, E., Bonilla-Cruz, S., Hernández-Solábac, J.A.M. and Partida Sedas, J.G., 2011. Estrategia de mejoramiento de la producción cafetalera de la organización Campesinos Ecológicos de la Sierra Madre de Chiapas: caracterización de la bebida de café. *Revista de Geografía Agrícola*, (46–47), pp. 7–18.
- Pérez-Portilla, E. and Geissert-Kientz, D., 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) - palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia*, 31(8), pp. 556–562.
- Perfecto, I., Vandermeer, J. and Philpott, S.M., 2014. Complex ecological interactions in the coffee agroecosystem. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45(1), pp.137–158. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091923>
- Pineda Santos, L.D. and Suárez Hernández, J. E., 2014. Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(3), pp. 28–32.
- Procuraduría Federal del Consumidor, 2025. *Café y cafeteras*. Available at:

- <https://www.gob.mx/profeco/documentos/cafe-y-cafeteras?state=published> [Accessed October 2025].
- Quintana-Escobar, A.O., Iracheta-Donjuan, L., Méndez-López, I. and Alonso-Báez, M., 2017. Caracterización de genotipos élite de *Coffea canephora* por su tolerancia a sequía. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), pp. 183–198. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.23874>
- Quiroz Antúnez, U.G., Monterroso Rivas, A.I., Calderón Vega, M.F. and Ramírez García, A.G., 2022. Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja*, 36(2), pp. 60–74. <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>
- Reyes Reyes, J., Rodríguez Morales, J.A., Pimienta de la Torre, D.D.J., Fuentes Pérez, M.A., Marroquín Morales, P., Merino García, A. and Aguirre Medina, J.F., 2022. Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), pp. 4–27. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1191>
- Rosas Arellano, J., Escamilla Prado, E. and Ruiz Rosado, O., 2008. Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana*, 26(4), pp. 375–384.
- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J.D., Valdes-Velarde, E. and Monterroso-Rivas, A.I., 2020. Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16(4), pp. 137–158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>
- SAGARPA, 2005. *Plan rector del sistema producto café en México*. Available at: <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2022/08/Plan-Rector-Nacional-del-Sistema-Producto-Cafe-2005.pdf> [Accessed September 2022].
- Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., Castillejos, T., García Moreno, J., Soto Pinto, L., Hernandez, R., Eitzinger, A. and 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, pp. 605–625. <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>
- SIAP, 2022. Anuario estadístico de la producción agrícola. Cierre de la producción agrícola por estado. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México. Available at: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> [Accessed September 2022].
- Soto, F., Tejeda, T., Hernández, A. and Florido, R., 2001a. Metodología para la zonificación agroecológica del *Coffea arabica* L. en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 22(4), pp. 51–53.
- Soto, F., Vantour, A., Hernández, A., Planas, A., Figueroa, A., Fuentes, P.O., Tejeda, T., Morales, M., Vázquez, R., Zamora, E., Alfonso, H.M., Vázquez, L. and Caro, P., 2001b. La zonificación agroecológica del *Coffea arabica* L. en Cuba. Macizo Montañoso Sagua-Nipe-Baracoa. *Cultivos Tropicales*, 22(3), pp. 27–51.
- Suárez Venero, G.M., Avendaño Arrazate, C.H., Hernández Ramos, M.A., Rodríguez Larramendi, L.A., Estrada de los Santos, P. and Salas Marina, M.Á., 2021. Zonificación edafoclimática del cultivo de cacao en el estado Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), pp. 629–641. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2518>
- Van Noordwijk, M., 2019. Sustainable Development Through Trees on Farms: Agroforestry in its Fifth Decade. *World Agroforestry (ICRAF)*, Bogor, Indonesia, 444 p. Disponible en: <http://www.worldagroforestry.org/download/Publications/PDFS/B19029.pdf>
- Van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P. and Rodríguez-Sánchez, B., 2014. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), pp. 887–897. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8>
- Yılmaz, B., Acar-Tek, N. and Sözlü, S., 2017. Turkish cultural heritage: a cup of coffee. *Journal of Ethnic Foods*, 4(4), pp. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2017.11.003>