



DINÁMICA DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Coffea arabica* y *C. canephora* ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN TRES REGIONES DE MÉXICO †

[DYNAMIC DISTRIBUTION OF *Coffea arabica* And *C. canephora* IN RESPONSE TO CLIMATE CHANGE IN THREE REGIONS OF MEXICO]

Jesús Guerrero-Carrera^{1*}, José Alvaro Hernández-Flores¹
and José Luis Jaramillo-Villanueva²

¹Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. El Colegio de México A.C. C.P. 14110. Carretera Picacho Ajusco 20, Col. Ampliación Fuentes del Pedregal. Tlalpan, Ciudad de México, México. Email: jguerrero@colmex.mx

²Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. C.P. 72760. Boulevard Forjadores de Puebla no. 205. Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, Puebla, México.

*Corresponding author

SUMMARY

Background: The coffee sector is fundamental in the economic, social, and environmental aspects of coffee-producing regions in Mexico. However, climate change is altering the optimal agroclimatic conditions for the cultivation of *Coffea arabica* and *C. canephora*, threatening future production. Given the regional variability of these impacts, it is necessary to identify how climate change will affect the suitability for production in specific regions. Studies focused on species distribution provide key tools to gauge these impacts and issue recommendations aimed at adapting to climate change. **Objective:** To assess the potential impact of climate change on the production of *Coffea arabica* and *C. canephora*, using a species distribution approach in the northeastern region of Puebla, the mountains of Veracruz, and the Mazatec region of Oaxaca. **Materials and Methods:** This study was conducted using a species distribution approach, with modeling carried out through MaxEnt software to project the potential distribution of the species. Future climate scenarios SSP126 and SSP585 for the period 2041–2060 were evaluated. **Results and Discussion:** The results suggest significant changes in the distribution of both species. For *C. arabica*, there is a general trend of reduction in optimal areas, with notable regional variations. *C. canephora*, on the other hand, shows a different response, with some areas showing an increase in the distribution of this species. The most influential variables in the distribution of both species were precipitation, elevation, and wind speed. **Implications:** If future agroclimatic conditions favor the expansion of *C. canephora*, as projections suggest for some regions, a partial transition to this species could be considered as an adaptation strategy. **Conclusions:** The study concluded that climate change will significantly reduce the distribution of *C. arabica* and moderately favor *C. canephora*, with differentiated regional impacts. It is crucial to adjust management strategies according to each region to ensure the sustainability of coffee production.

Key words: adaptation; scenarios; species; suitability; MaxEnt.

RESUMEN

Antecedentes: El sector cafetalero es fundamental en los ámbitos económico, social y ambiental de las regiones productoras de café en México. Sin embargo, el cambio climático está alterando las condiciones agroclimáticas idóneas para el cultivo de *Coffea arabica* y *C. canephora*, amenazando la producción futura. Dada la variabilidad regional de estos impactos, es necesario identificar cómo el cambio climático afectará la idoneidad productiva en regiones específicas. Estudios enfocados en la distribución de especies aportan herramientas clave para dimensionar los impactos y emitir recomendaciones orientadas en la adaptación al cambio climático. **Objetivo:** Evaluar el impacto potencial del cambio climático en la producción de *Coffea arabica* y *C. canephora*, bajo el enfoque de distribución de especies en la región nororiental de Puebla, las montañas en Veracruz y la región mazateca de Oaxaca. **Materiales y Métodos:** Este estudio se realizó bajo el enfoque de distribución de especies, la modelación se desarrolló mediante el software MaxEnt para proyectar la distribución potencial de las especies. Se evaluaron escenarios climáticos futuros SSP126 y SSP585 para el periodo 2041-2060. **Resultados y discusión:** Los resultados sugieren cambios significativos en la distribución para ambas especies. Para la especie *C. arabica*, se observa una tendencia general de reducción en

† Submitted August 28, 2024 – Accepted February 27, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5822>



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

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J. Guerrero-Carrera: <http://orcid.org/0000-0003-3747-0105>; J.A. Hernández-Flores: <http://orcid.org/0000-0002-8349-0505>; J.L. Jaramillo-Villanueva: <http://orcid.org/0000-0001-8179-6351>

áreas óptimas, con variaciones regionales notables. Para *C. canephora* se observa una respuesta diferente, con algunas áreas con tendencia al aumento de la distribución de esta especie. Las variables más influyentes en la distribución de ambas especies fueron la precipitación, la elevación y la velocidad del viento. **Implicaciones:** Si las condiciones agroclimáticas futuras favorecen la expansión de *C. canephora* como sugieren las proyecciones para algunas regiones, podría plantearse una transición parcial hacia esta especie como estrategia de adaptación. **Conclusiones:** El estudio concluyó que el cambio climático reducirá significativamente la distribución de *C. arabica* y favorecerá moderadamente a *C. canephora*, con impactos regionales diferenciados. Es crucial ajustar estrategias de manejo según cada región para asegurar la sostenibilidad de la producción cafetalera.

Palabras clave: adaptación; escenarios; especies; idoneidad; MaxEnt.

INTRODUCCIÓN

La producción de café es uno de los productos agrícolas más importantes a nivel mundial, con implicaciones económicas, sociales y ambientales para los países productores (Bracken *et al.*, 2023). En 2023, la producción global de café alcanzó 168 millones de sacos de 60 kg, con un valor de exportación que superó los 20 mil millones de dólares (ICO, 2023). Este cultivo proporciona medios de subsistencia a más de 25 millones de familias, principalmente pequeños productores en países en desarrollo (Cassamo *et al.*, 2023).

En México, el sector cafetalero tiene una función crucial en la economía nacional y el desarrollo rural de los estados productores (Calvillo y Sotelo, 2024). El país se posiciona como el undécimo productor mundial de café y es uno de los principales productores de café orgánico certificado (Gasperín *et al.*, 2023). La industria cafetalera mexicana involucra a más de 500,000 productores distribuidos en 14 estados, con una superficie cultivada de aproximadamente 698,360 hectáreas (SIAP, 2023). Los estados de Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla son los más importantes por volumen producido y valor de la producción. Veracruz es el segundo productor más importante a nivel nacional, contribuyendo con el 29.1% de la producción total, Puebla con 29.0% y Oaxaca con 9.7 % (SIAP, 2023).

Además, la caficultura en México trasciende la importancia económica, ya que esta actividad involucra un pilar fundamental del tejido social y biocultural en las regiones productoras (Gabriel y Barradas, 2024). Los agroecosistemas cafetaleros proporcionan valiosos servicios ecosistémicos, especialmente bajo sombra (Navidad *et al.*, 2023). Estos servicios incluyen la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y el control de la erosión, comparables en algunos casos a la de bosques nativos (Moguel y Toledo, 1999).

En México se cultivan principalmente el café arábica (*Coffea arabica*) y robusta (*Coffea canephora*), cuya producción ha ido ganando relevancia en los últimos

años (Cerdeña *et al.*, 2023). Estas especies presentan diferencias significativas en términos de requerimientos ambientales, calidad del producto y valor de mercado (Campuzano and Wohlgenuth, 2022). *C. arabica* representa aproximadamente el 80% de la producción en México (Cerdeña *et al.*, 2023). Las variedades de esta especie se cultivan principalmente entre los 600 y 1800 msnm en México, mientras que en otras regiones de Mesoamérica pueden encontrarse hasta los 1900 msnm (Ovalle *et al.*, 2015). El rango óptimo de temperaturas para su cultivo se encuentra entre 15°C y 24°C, con una precipitación anual de 1500-2000 mm bien distribuida a lo largo del año (Guerrero *et al.*, 2020). En contraste, *C. canephora* es tolerante a temperaturas más altas (entre 22 a 30°C) y puede cultivarse a altitudes más bajas, de (0 a 800 m), con una precipitación anual de 2000-3000 mm (Bracken *et al.*, 2023; Guerrero *et al.*, 2020). Sin embargo, el cambio climático está afectando los requerimientos ambientales óptimos para la producción de café, modificando las zonas aptas para su cultivo, que obliga a los productores a modificar sus estrategias de manejo o a buscar otras alternativas agrícolas (Rahn *et al.*, 2024).

Los enfoques para evaluar el impacto del cambio climático en el sector agrícola y la producción de café incluyen modelos de simulación de cultivos, análisis econométricos, evaluaciones de vulnerabilidad y modelado de nichos ecológicos o idoneidad de hábitat (Bilen *et al.*, 2023). Este último es uno de los enfoques más utilizados, debido a la robustez y eficacia demostrada en estudios previos que analizan el impacto potencial del cambio climático en las zonas cafetaleras (Guerrero *et al.*, 2020). El enfoque de distribución de especies se basa en la teoría del nicho ecológico de Hutchinson (1957), el cual identifica las áreas climáticamente aptas para el cultivo del café, basándose en las condiciones ambientales actuales y proyectándolas ante escenarios climáticos futuros (Ovalle *et al.*, 2015, Imbach *et al.*, 2017). Este enfoque integra variables climáticas, edáficas y topográficas, y es aplicable en regiones con datos agronómicos limitados (Jiménez *et al.*, 2023).

La idoneidad se refiere a la medida en que un área geográfica proporciona las condiciones ambientales

óptimas para el crecimiento y desarrollo de una especie o cultivo (Elith *et al.*, 2011). En el contexto del café, la idoneidad climática se evalúa considerando factores como temperatura, precipitación y altitud, que influyen directamente en la productividad y calidad del cultivo (Bunn *et al.*, 2015). Este concepto permite identificar áreas potenciales para el cultivo y proyectar cambios en su distribución ante escenarios climáticos futuros, facilitando la planificación y adaptación del sector cafetalero (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015).

El software MaxEnt (Maximum Entropy) es ampliamente utilizado para modelar la distribución potencial de especies ante condiciones ambientales cambiantes. MaxEnt fue desarrollado por Phillips *et al.* (2006), este software estima la distribución geográfica más probable de una especie, utilizando datos de presencia y variables ambientales (Magrath y Ghazoul, 2015). Sus ventajas incluyen la capacidad de trabajar con datos de solo presencia, la incorporación de variables continuas y categóricas y buen rendimiento con muestras pequeñas (Imbach *et al.*, 2017).

Estudios globales como los de Schroth *et al.* (2009, 2015), Laderach *et al.* (2011, 2017), Davis *et al.* (2012), Magrath y Ghazoul (2015), Bunn *et al.* (2014, 2015), e Imbach *et al.* (2017) han sentado las bases para comprender la vulnerabilidad del sector cafetero ante las variaciones del clima. Estos trabajos sugieren pérdidas significativas en rendimiento y calidad podrían afectar entre el 30% y el 90% de las áreas de cultivo actuales.

En México, investigaciones de Schroth *et al.* (2009), Laderach *et al.*, 2011 y recientemente Jiménez *et al.* (2023), han abordado esta problemática en Chiapas y Nayarit. Sin embargo, la diversidad geográfica y climática del país, junto con la variabilidad de las prácticas agrícolas regionales, evidencia la necesidad de estudios más detallados y localizados (LaFevor, 2022). Estas investigaciones son cruciales para desarrollar estrategias de adaptación efectivas y tipificadas para las distintas regiones cafetaleras de México, considerando la importancia económica y social que tiene este cultivo en muchas comunidades rurales del país (LaFevor, 2022). Con base a lo anterior,

este trabajo propone como objetivo analizar cómo el cambio climático afecta la distribución potencial de *Coffea arabica* y *C. robusta* en tres regiones clave de México: la zona mazateca de Oaxaca, la región Nororiental de Puebla y las Montañas de Veracruz.

A partir del análisis de idoneidad será posible determinar áreas vulnerables y potencialmente aptas para el cultivo de café ante el cambio climático, lo que permitirá establecer un marco para la implementación de estrategias de manejo del sector cafetalero e identificar áreas prioritarias para la inversión en investigación y desarrollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

El estudio abarca tres regiones mexicanas (Tabla 1, Figura 1), donde la cafecultura predomina como actividad económica y posee un profundo arraigo social (Moguel y Toledo, 1999, Jaramillo *et al.*, 2022, Guerrero y Hernández, 2024). Estas regiones tienen la influencia climática de la vertiente Golfo de México, y se caracterizan por su alta vulnerabilidad ante el fenómeno del cambio climático (Monterroso *et al.*, 2014).

Metodología

Para la evaluación de la modelación de la distribución del cultivo de café se utilizó el software MaxEnt, el cual permite predecir la distribución potencial de las especies al generar modelos que identifican las áreas con condiciones óptimas para su cultivo bajo diferentes escenarios climáticos. La etapa de preparación de datos incluyó la georreferenciación de la información relacionada con la presencia de las especies de café, la recopilación de variables bioclimáticas del periodo actual, así como de los escenarios climáticos futuros (Figura 2). Finalmente, la etapa de análisis de distribución implicó el procesamiento de los resultados obtenidos en MaxEnt y el tratamiento de las capas de idoneidad, con el objetivo de cuantificar los cambios en la distribución de las especies de café.

Tabla 1. Características ambientales de las regiones de estudio (Alvarado *et al.*, 2006, Lorea y Munn 2005García *et al.*, 2018, Ballinas *et al.*, 2015).

Parámetro	Región Nororiental	Región Mazateca	Región de las Montañas
Ubicación	Región Nororiental, Puebla	Región Cañada, Oaxaca	Centro-Sur, Veracruz
Altitud	100 a 2100 msnm	25 a 2700 msnm.	100 a 5600 msnm.
Clima	Semicálido y templado húmedo,	Clima templado	Templado húmedo y frío
Precipitaciones	1200 a 2800 mm	1000 a 3000 mm	600 y 3000 mm
Temperatura	16 y 18 °C	12 y 23 °C	10 y 29 °C

*Los datos abarcan regiones completas, incluyendo áreas donde no se cultiva café.

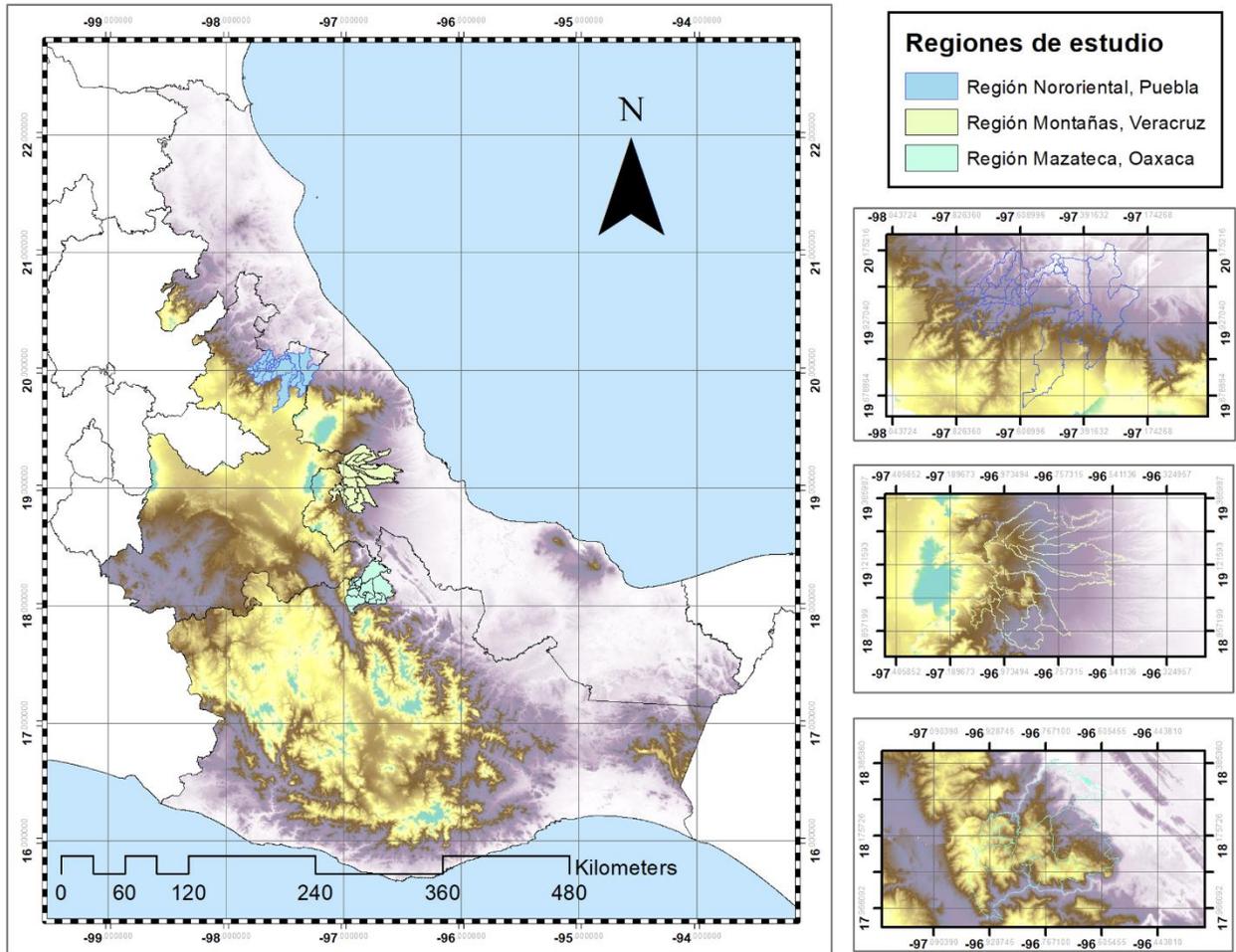


Figura 1. Ubicación y delimitación de las regiones de estudio. Fuente: Elaboración propia.

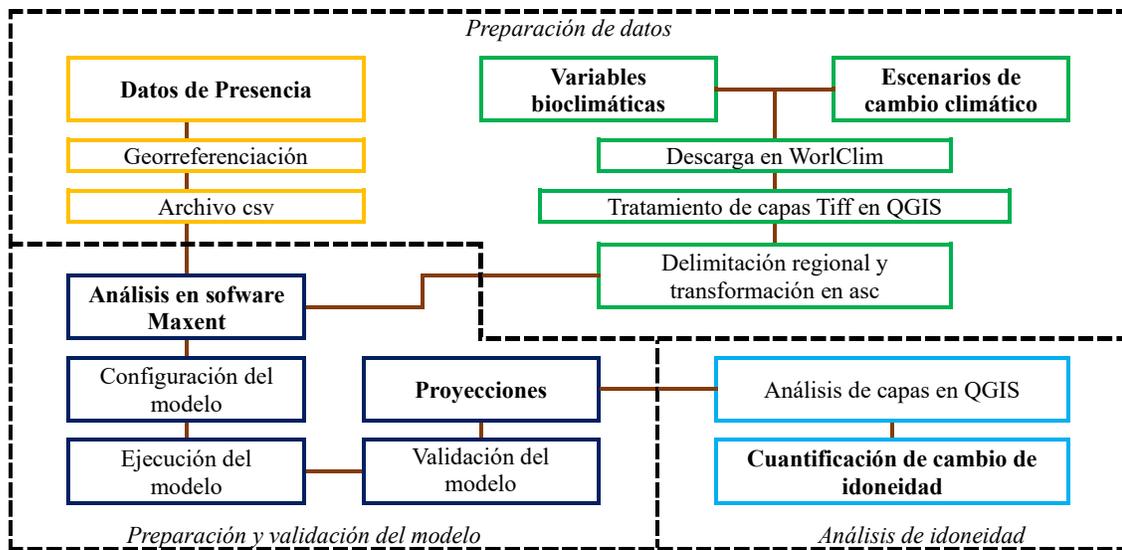


Figura 2. Proceso metodológico para la modelación de distribución potencial de *Coffea arabica* y *C. canephora* ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Preparación de datos

Datos de presencia

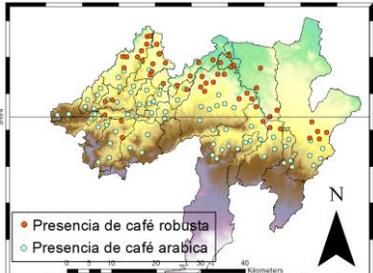
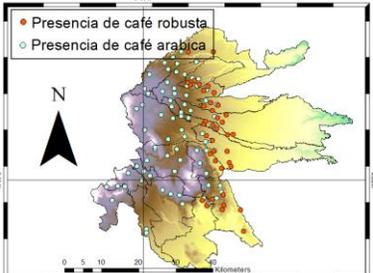
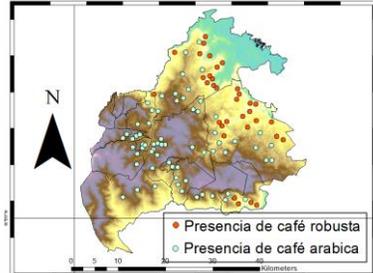
La confirmación de las especies de *Coffea arabica* y *C. canephora* fueron verificados mediante visitas a las regiones de estudio, además de la información recopilada con los informantes clave (extensionistas y directores de desarrollo agrícola municipales). Se georreferenciaron 221 sitios donde se encontraban variedades de *C. arabica* y 126 de *C. canephora* (Tabla 2). Estos datos fueron registrados con las coordenadas de latitud y longitud. La información se respaldó en un archivo con formato CSV.

Datos ambientales

Los datos ambientales fueron obtenidos de los metadatos con alta resolución espacial (30 s) de

CONABIO correspondientes al periodo 1980 a 2009 (Cuervo et al., 2020). Se seleccionaron 23 variables bioclimáticas (Tabla 3) cuya relevancia ecofisiológica ha sido ampliamente empleada (Schroth et al., 2015; Bunn et al., 2015; Laderach et al., 2017) en la modelación del impacto del cambio climático en la producción cafetera global y regional. Se incluyeron variables de estacionalidad y extremos climáticos por su influencia en la fenología y productividad del café (Craparo et al., 2015), además de la altura sobre el nivel del mar (msnm) y la radiación solar, las cuales pueden estar relacionadas con la calidad del grano (Ovalle et al., 2015). Este conjunto de variables permite una caracterización completa del nicho ecológico del café, esencial para modelar su distribución potencial y productividad bajo diferentes escenarios ambientales.

Tabla 2. Registro de puntos georreferenciados y caracterización cafetalera por región. P = Parámetro, M = Municipios, SP= Sitios de presencia, NP= Número de puntos georreferenciados, AL= Año de levantamiento, V = Variedades de café

P	Región nororiental	Región Montañas	Región Mazateca
M	Atlequizayan, Camocuautla, Caxhuacan, Coatepec, Cuetzalan del Progreso, Huehuetla, Hueyapan, Hueytamalco, Hueytlalpan, Huitzilán de Serdán, Ixtepec, Jonotla, Olintla, Tepango de Rodríguez, Teziutlán, Tlatlauquitepec, Tuzamapan de Galeana, Xochitlán de Vicente Suarez, Yaonáhuac, Zapotitlán de Méndez, Zongozotla, Zoquiapan	Amatlán de los Reyes, Atoyac, Atzacan, Chocamán, Comapa, Córdoba, Fortín, Huatusco, Ixhuatlán del Café, Sochiapa, Tenampa, Tepatlaxco, Tlacotepec de Mejía, Tlaltetela, Tomatlán, Totutla, Zentla.	Acatepec, Ateixtlahuaca, Ayautla, Chilchotla, Coatzacoapam, Cuanetecuitla, Eloxochitlán, Huautepic, Huautla, Mazatlán, Huehuetlán, Tecoaht, Tenango, Zoquiápam, Ocopetatillo, La Asunción, Texcalcingo, Yoloxochitlan.
SP			
NP	75 de <i>C. arabica</i> y 53 de <i>C. canephora</i>	78 de <i>C. arabica</i> y 39 de <i>C. canephora</i>	68 de <i>C. arabica</i> y 34 de <i>C. canephora</i>
AL	2017-2024	2022-2024	2015-2024
V	<i>C. arabica</i> : Típica, Costa Rica 95, Oro Azteca, Marsellesa. <i>C. canephora</i> : denominación común, robusta tradicional.	<i>C. arabica</i> : Típica, Costa Rica 95, Oro Azteca, Marsellesa, Colombia, Bourbon, Mundo Novo, Garnica. <i>C. canephora</i> : denominación común, robusta tradicional.	<i>C. arabica</i> : Típica, Geisha, Costa Rica 95, Bourbon, Colombia. <i>C. canephora</i> : denominación común, robusta tradicional.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Tabla 3. Descripción de variables bioclimáticas utilizadas en el análisis.

Componente	Variable	Significado	Unidad
Temperatura	Bio 01	Temperatura media anual	°C
	Bio 02	Rango de temperaturas diurna	°C
	Bio 03	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)	-
	Bio 04	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar * 100)	-
	Bio 05	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
	Bio 06	Temperatura mínima del mes más frío	°C
	Bio 07	Rango anual de la temperatura (bio5-bio6)	°C
	Bio 08	Temperatura media del trimestre más lluvioso (verano)	°C
	Bio 09	Temperatura media del trimestre más seco	°C
	Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido	°C
	Bio 11	Temperatura media del trimestre más frío (invierno)	°C
Precipitación	Bio 12	Precipitación anual	mm
	Bio 13	Precipitación del mes más lluvioso	mm
	Bio 14	Precipitación del mes más seco	mm
	Bio 15	Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación)	-
	Bio 16	Precipitación del trimestre más lluvioso (verano)	mm
	Bio 17	Precipitación del trimestre más seco	mm
	Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido	mm
	Bio 19	Precipitación del trimestre más frío (invierno)	mm
Otras variables	Bio 20	Radiación solar	kJ/m ² /d
	Bio 21	Vapor de agua	kPa
	Bio 22	Velocidad del viento	m/s
	Bio 23	Elevación	msnm

Nota: El símbolo "-" indica variables adimensionales, derivadas de proporciones entre otras variables con unidades, por lo que no requieren unidades de medida.

Escenarios climáticos utilizados para modelar los impactos futuros

Los escenarios de cambio climático utilizados en este análisis se obtuvieron de la página de Global Climate Data (WorldClim) con alta resolución espacial (30 s) (Fick y Hijmans, 2017). Se seleccionaron dos proyecciones futuras basadas en diferentes modelos climáticos y trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas; SSP126 y SSP585). De acuerdo con Meinshausen *et al.* (2020), el escenario SSP126 proyecta un aumento de temperatura global de ~1.6°C respecto a la era preindustrial, con emisiones de gases de efecto invernadero en declive. Implica políticas climáticas efectivas y transición energética acelerada. SSP585 estima un aumento de ~2.4°C, con emisiones aún crecientes. Supone uso continuado de combustibles fósiles y menor cooperación internacional. Ambos escenarios prevén cambios en patrones de precipitación y eventos climáticos extremos, pero con intensidades diferentes. La utilización de estos escenarios permite evaluar cómo las variaciones climáticas esperadas podrían influir en las variables bioclimáticas.

Tratamiento de capas TIFF en QGIS

Se obtuvieron 23 variables bioclimáticas en formato TIFF y se procesaron en el software QGIS (3.28.3). La herramienta de calculadora ráster se utilizó para realizar operaciones y transformaciones necesarias de los datos. Posteriormente, se aplicó un recorte por lotes en cada una de las capas utilizando una máscara vectorial que delimita la región de estudio. Finalmente, los archivos resultantes fueron convertidos del formato TIFF al formato ASCII Grid (ASC), para procesarlas en el software MaxEnt para el modelado de nichos ecológicos.

Preparación y validación del modelo

El modelo de distribución potencial de las especies se configuró utilizando MaxEnt versión 3.4.4 (Phillips *et al.*, 2006). Se seleccionaron características lineales, cuadráticas, de producto y de bisagra, además de las características automáticas, para permitir una representación flexible de las relaciones entre las variables ambientales y la idoneidad del hábitat (Elith *et al.*, 2011). Esta configuración permitió al modelo capturar relaciones complejas y no lineales entre las variables predictoras y la distribución de las especies. El multiplicador de regularización se mantuvo en 1, para equilibrar el ajuste del modelo con la prevención del sobreajuste (Radosavljevic y Anderson, 2013). Se

configuró un máximo de 10,000 puntos de fondo, proporcionando un conjunto robusto de datos de pseudo-ausencia para contrastar con las presencias, mejorando así la capacidad discriminatoria del modelo (Barbet-Massin *et al.*, 2012).

La ejecución del modelo implicó la carga de datos de presencia de las especies desde un archivo CSV y de las 23 variables bioclimáticas como capas ambientales. Se activaron opciones para generar curvas de respuesta, imágenes de predicciones y realizar análisis Jackknife, lo que permitió una evaluación exhaustiva de la contribución de cada variable al modelo y facilitó la interpretación ecológica de los resultados (Elith *et al.*, 2006). El formato de salida se estableció como logístico, para producir mapas de idoneidad de hábitat de fácil interpretación. Se activó la opción para realizar análisis MESS (Multivariate Environmental Similarity Surfaces) al proyectar, lo que permite identificar áreas donde el modelo extrapola más allá de las condiciones ambientales del conjunto de entrenamiento (Elith *et al.*, 2010).

Validación del modelo

Para la validación se implementó una estrategia de partición de datos, reservando el 20% de los registros para pruebas, mientras que el 80% se utilizó para el entrenamiento del modelo. Esta proporción es comúnmente utilizada en estudios de modelado de nichos ecológicos y proporciona un equilibrio entre la robustez del entrenamiento y la fiabilidad de la evaluación (Schroth *et al.*, 2015). El análisis Jackknife se utilizó para evaluar la importancia relativa de cada variable ambiental, para identificar los factores de mayor importancia para la distribución de las especies de café (Phillips *et al.*, 2006). Además, la generación de curvas de respuesta facilita la interpretación del efecto de cada variable en predicción del modelo y proporciona perspectivas ecológicas valiosas sobre los requerimientos de hábitat de las especies (Elith *et al.*, 2011).

Proyecciones

Se configuraron proyecciones futuras utilizando escenarios climáticos SSP126 y SSP585 para el período 2041-2060. Se activó la opción "Write clamp grid when projecting" y el análisis MESS para identificar áreas de extrapolación y evaluar la similitud ambiental entre condiciones de entrenamiento y proyectadas (Elith *et al.*, 2010). Estas proyecciones permiten evaluar la distribución potencial futura de las especies de café bajo escenarios de cambio climático moderado y más severo, que proporciona información crucial para estrategias de conservación y manejo agrícola a largo plazo.

Análisis de idoneidad

Bajo los principios de clasificación ecológica (Baca *et al.*, 2014), se establecieron cinco niveles de idoneidad: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. Esta categorización jerárquica facilita una interpretación más precisa de los resultados y permite una comparación más robusta entre los diferentes escenarios, de acuerdo con la metodología empleada por Davis *et al.* (2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño del modelo y variables ambientales clave

El desempeño de los modelos generados en MaxEnt para predecir la distribución potencial de *Coffea arabica* y *C. canephora* en las regiones de estudio indicó una alta precisión, con valores de AUC (área bajo la curva) superiores a 0.98 para ambas especies. Mientras que la omisión en muestras de entrenamiento predicha sigue de cerca la diagonal, la tasa de omisión disminuye rápidamente y se mantiene baja (Figura 3). Estos resultados son consistentes con estudios previos que han utilizado MaxEnt para modelar la distribución del café, como Schroth *et al.* (2015) y Jiménez *et al.* (2023), quienes reportaron valores de AUC similares.

Variables ambientales en la producción de café

Los resultados sugieren que las variables bioclimáticas que influyen en la idoneidad del hábitat *C. arabica*, es la precipitación del mes más seco (Bio14) la variable más influyente, con una contribución del 38.1%, seguida por la elevación (Bio23) con 31.1% y la velocidad del viento (Bio22) con 12% (Tabla 4). Estos patrones destacan la importancia de la disponibilidad de agua durante los períodos secos para *C. arabica*, un hallazgo que concuerda con los estudios de Bunn *et al.* (2015) y Parada *et al.* (2020), quienes proyectaron cambios significativos en las áreas de establecimiento adecuadas para el café debido a alteraciones en los patrones de precipitación bajo escenarios de cambio climático.

La alta contribución de la elevación para *C. arabica* refleja su adaptación a rangos altitudinales específicos, generalmente entre 800 y 1900 msnm (Guerrero *et al.*, 2020). Esta preferencia altitudinal tiene implicaciones importantes para la planificación de la producción cafetalera frente al calentamiento global, ya que podría implicar el desplazamiento de los cultivos a mayores altitudes en el futuro (Imbach *et al.*, 2017). Respecto a la velocidad del viento, que también fue relevante, Camargo (2010), sugiere que el viento excesivo puede dañar las hojas y flores del café, afectando su productividad, lo que podría explicar su importancia en este modelo.

En el caso de *C. canephora* la precipitación del mes más seco (Bio14), es la variable más influyente con una contribución del 32.1%, seguida por la velocidad del viento (Bio22) con 17.5% y la elevación (Bio23) con 18.2% (Tabla 4). Por lo que *C. canephora* sugiere menor dependencia a la elevación relacionada con capacidad para crecer a altitudes más bajas y su mayor tolerancia a temperaturas elevadas (Ferrao *et al.*, 2024). Variables como la temperatura media anual (Bio01) y la precipitación anual (Bio12) tuvieron contribuciones mínimas en los modelos de *C. arabica* y *C. canephora*, contrario a lo observado en estudios

previos (DaMatta y Ramalho, 2007; Bunn *et al.*, 2015), que sugiere que las variables previamente mencionadas relacionadas con la precipitación, la velocidad del viento y la elevación, pueden ser más influyentes en la distribución del café de ambas especies. Esto coincide con lo señalado por Ovalle *et al.* (2015), quienes han enfatizado la importancia de considerar las variables climáticas específicas en la modelación de la distribución potencial de *C. arabica* y *C. canephora*, más allá de los promedios anuales de temperatura y precipitación comúnmente utilizados.

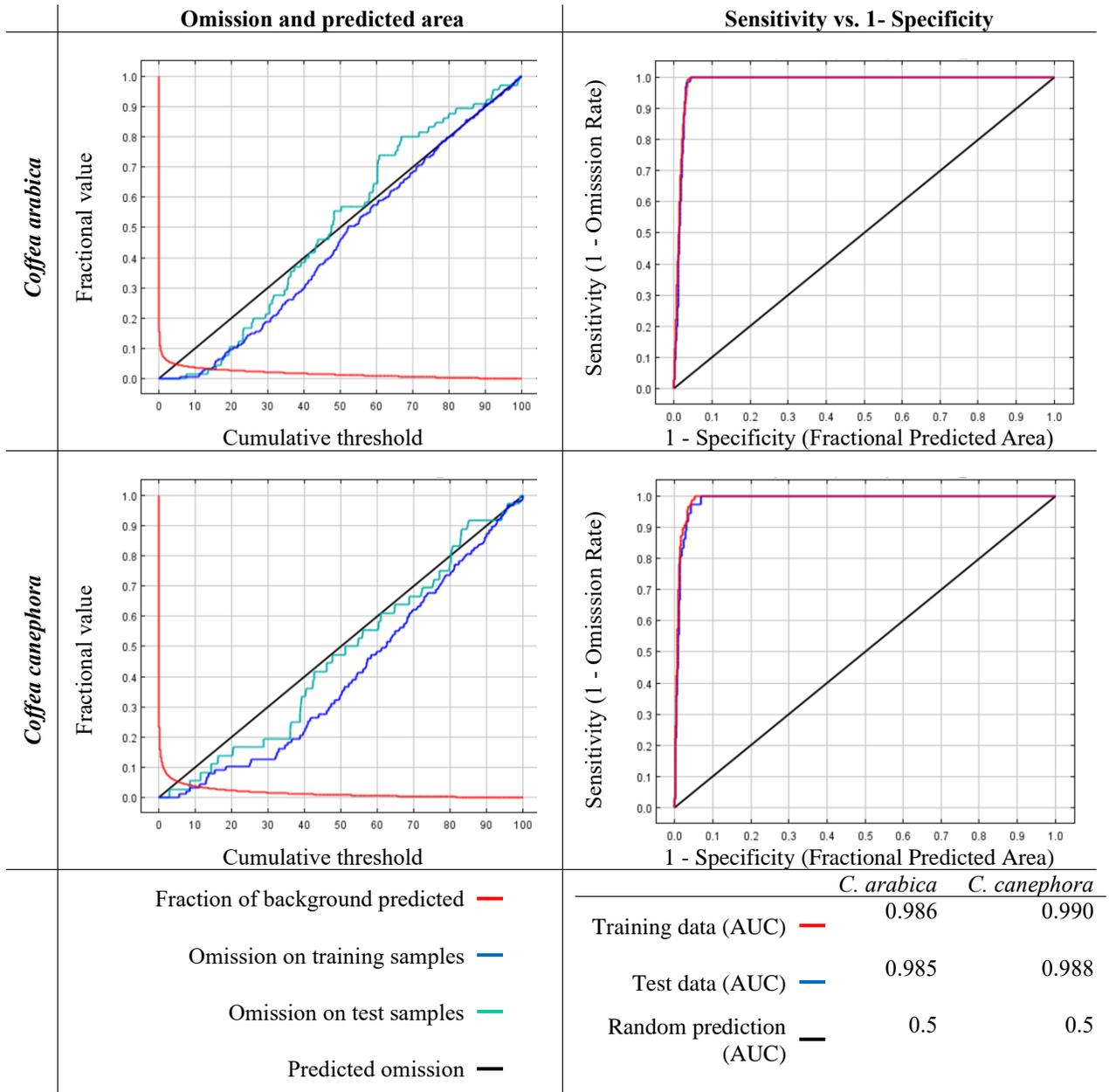


Figura 3. Evaluación del desempeño de los modelos mediante Omisión-Predicción y Sensibilidad-Especificidad para *Coffea arabica* y *C. canephora*.

Tabla 4. Contribución y permutación de las variables bioclimáticas para *Coffea arabica* y *C. canephora*.

Clave	Variable	<i>Coffea arabica</i>		<i>Coffea canephora</i>	
		PC	IC	PC	IC
Bio01	Temperatura media anual	0.0	0.0	0.0	0.0
Bio02	Rango de temperaturas diurna	1.0	1.1	1.0	1.0
Bio03	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)	0.5	0.4	1.3	0.1
Bio04	Estacionalidad en la temperatura	2.4	5.1	0.5	3.3
Bio05	Temperatura máxima del mes más cálido	0.0	0.0	0.0	0.0
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío	5.0	0.4	3.9	6.3
Bio07	Rango anual de la temperatura (Bio05-Bio06)	0.6	3.2	2.9	5.3
Bio08	Temperatura media del trimestre más lluvioso	0.1	0.9	0.5	0.0
Bio09	Temperatura media del trimestre más seco	0.1	0.7	2.0	0.4
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	0.4	0.0	0.0	0.0
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío	0.0	0.0	0.0	0.0
Bio12	Precipitación anual	0.2	0.0	0.1	0.0
Bio13	Precipitación del mes más lluvioso	0.4	3.8	0.4	7.9
Bio14	Precipitación del mes más seco	38.1	3.2	32.1	3.4
Bio15	Estacionalidad en la precipitación	1.4	0.1	1.1	0.5
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso	0.5	1.6	0.7	0.8
Bio17	Precipitación del trimestre más seco	1.1	2.9	0.0	0.0
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	0.4	0.5	0.2	0.7
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	0.0	0.0	0.0	0.0
Bio20	Radiación solar	4.7	5.5	9.7	14.6
Bio21	Vapor de agua	0.0	0.0	7.8	5.8
Bio22	Velocidad del viento	12.0	39.7	17.5	38.1
Bio23	Elevación	31.1	30.9	18.2	11.5

PC = Porcentaje de contribución. IC = Importancia de permutación. Fuente: Elaboración propia con base a los resultados de MaxEnt.

El análisis Jackknife del AUC (Figura 4), revela aspectos adicionales sobre la importancia de las variables ambientales para ambos modelos. Para *C. arabica*, además de confirmar la relevancia de la elevación (Bio23) y la velocidad del viento (Bio22), el análisis destaca la importancia de la temperatura mínima del mes más frío (Bio06). Estos resultados sugieren que los eventos de frío extremo podrían ser un factor limitante para la distribución de *C. arabica*, lo cual ha sido explorado por Bunn *et al.* (2015) y Chalchissa *et al.* (2022) sobre la respuesta del café a las temperaturas bajas. Esto indica que las áreas con mayor riesgo de eventos de frío extremo podrían volverse menos aptas para el cultivo, reduciendo las zonas de distribución potenciales en el futuro.

En el caso de *C. canephora*, el análisis Jackknife refuerza la importancia crítica de la precipitación del mes más seco (Bio14) y resalta la relevancia de la isotermalidad (Bio03) y el vapor de agua (Bio21). Estos factores, que no presentaron relevancia significativa en el análisis de contribución porcentual, sugieren que la estabilidad térmica y la humedad atmosférica son determinantes en la distribución de *C. canephora* (Carteri *et al.*, 2014).

En conjunto, estos resultados indican la complejidad de los requerimientos ambientales de ambas especies

de café y resaltan la importancia de considerar múltiples factores climáticos y topográficos en la planificación de la producción cafetalera. Las estrategias de adaptación deberían enfocarse no solo en los cambios de temperatura y precipitación promedio, sino también en la gestión de eventos extremos y en la selección cuidadosa de sitios de cultivo basada en múltiples variables ambientales. Como lo han señalado Läderach *et al.* (2017), este enfoque multifactorial es crucial para desarrollar estrategias de adaptación efectivas y sostenibles para la industria cafetalera en un clima cambiante.

Cambio en la distribución de *C. arabica* por regiones

Se generaron tres mapas de distribución de *C. arabica*, los cuales sugieren cambios significativos en la idoneidad de las áreas de distribución potencial bajo diferentes escenarios climáticos (Figura 5). El escenario actual sugiere extensas áreas de alta idoneidad en las zonas de estudio. Sin embargo, en el escenario SSP126 de cambio climático moderado, se observa una reducción general de las áreas óptimas, aunque se mantiene una importante área idónea. El escenario SSP585, que representa un cambio climático severo, muestra una drástica reducción de las áreas idóneas para *C. arabica*. Las zonas de alta idoneidad

quedan limitadas principalmente a pequeñas áreas en las regiones más altas de las regiones de estudio.

Las áreas de muy baja idoneidad en la región Nororiental de Puebla, aumentan del 47% al 78% en el escenario SSP585, mientras que las áreas de alta idoneidad se reducen del 18% al 2%, y las de muy alta idoneidad desaparecen por completo (Figura 6). La región de las Montañas de Veracruz, presenta los cambios más drásticos, con un incremento de áreas de muy baja idoneidad del 40% al 84% en el escenario SSP585 y la pérdida total de zonas de alta y muy alta idoneidad. La región Mazateca de Oaxaca, aunque también resulta afectada de forma importante con un aumento de áreas de muy baja idoneidad del 46% al 74%, mantiene un 2% de áreas de muy alta idoneidad en el escenario más extremo, sugiriendo una mayor superficie donde podrá cultivarse *C. arabica*.

La tendencia general de reducción en áreas óptimas para *C. arabica*, especialmente en el escenario SSP585, concuerda con las proyecciones de Schroth *et al.* (2009), y Läderach *et al.* (2017), quienes anticipan disminuciones sustanciales en la idoneidad de *C. arabica* en América Central y México. Sin embargo, la magnitud de estos cambios varía entre las regiones estudiadas, lo que indica la importancia de considerar las características locales en la evaluación del impacto climático (Ovalle *et al.*, 2015).

La región de las Montañas muestra la distribución más drástica para la *C. arabica*, con una pérdida general de áreas de alta idoneidad en el escenario SSP585. Este resultado es más severo que las proyecciones generales para Mesoamérica de acuerdo con Laderach *et al.* (2017), sugiriendo que esta región podría ser particularmente vulnerable. En contraste, la región Mazateca exhibe un mejor potencial de distribución para *C. arabica*, manteniendo algunas áreas de alta idoneidad incluso en el escenario más extremo. Esta variabilidad regional es similar a lo reportado por de Schroth *et al.* (2015), quienes encontraron que las respuestas al cambio climático en sistemas cafetaleros pueden ser altamente localizadas.

Para enfrentar estos desafíos, Siles *et al.* (2022) proponen optimizar los sistemas de sombra mediante la introducción de especies arbóreas con mayor capacidad de regulación térmica y provisión de servicios ecosistémicos. Esta estrategia debe complementarse con la transición hacia variedades de café más resilientes (Bertrand *et al.*, 2020) y la implementación de prácticas agronómicas adaptativas como el manejo de densidades de siembra, la orientación de surcos y el uso de coberturas vegetales, especialmente en zonas identificadas como altamente vulnerables.

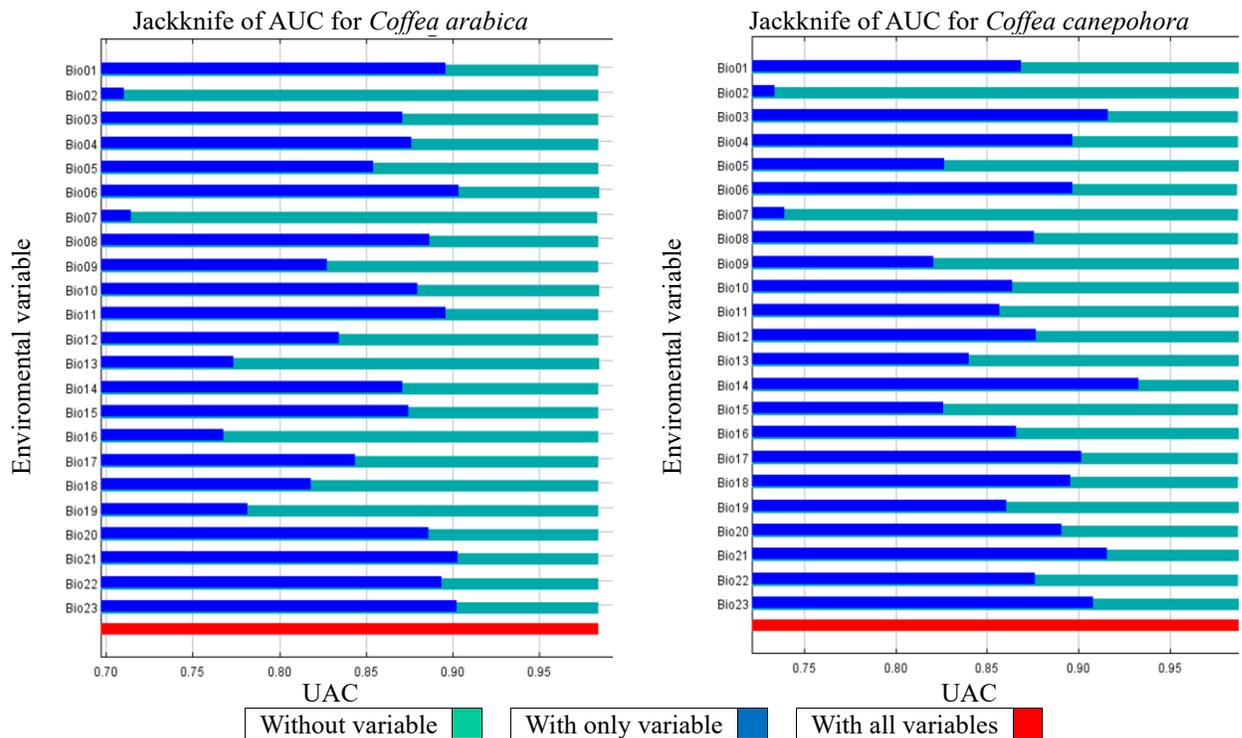


Figura 4. Análisis Jackknife de la AUC para variables bioclimáticas en la distribución potencial de *Coffea arabica* y *C. canephora*.

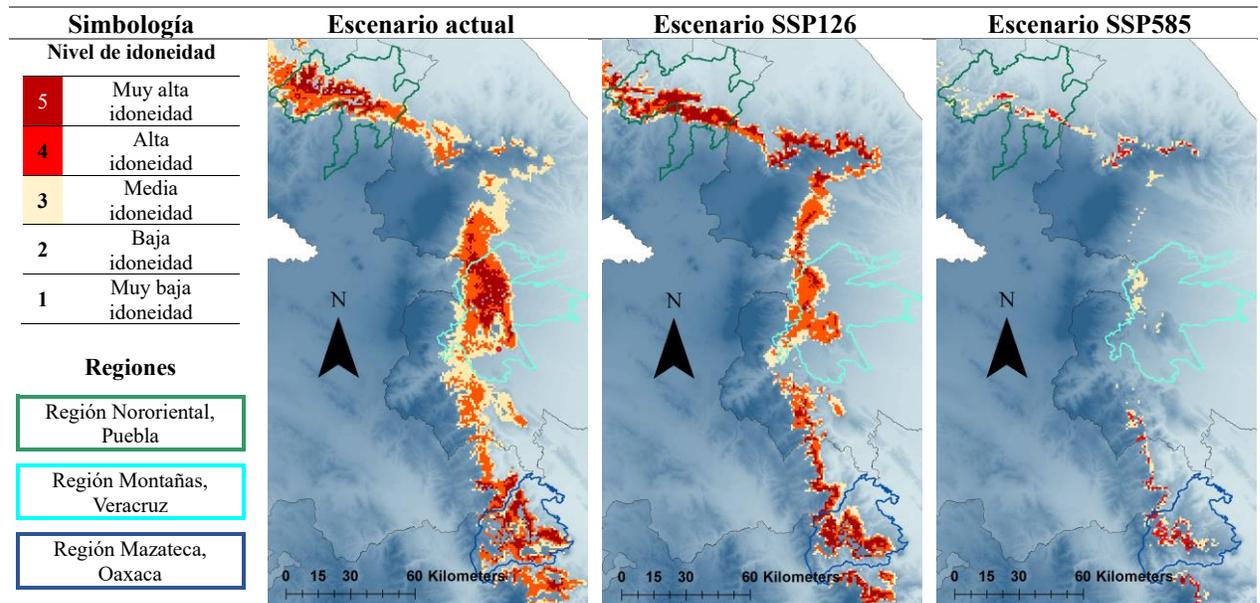


Figura 5. Cambio en la distribución potencial de *Coffea arabica*, según nivel de idoneidad ante escenarios climáticos. Fuente: Elaboración propia.

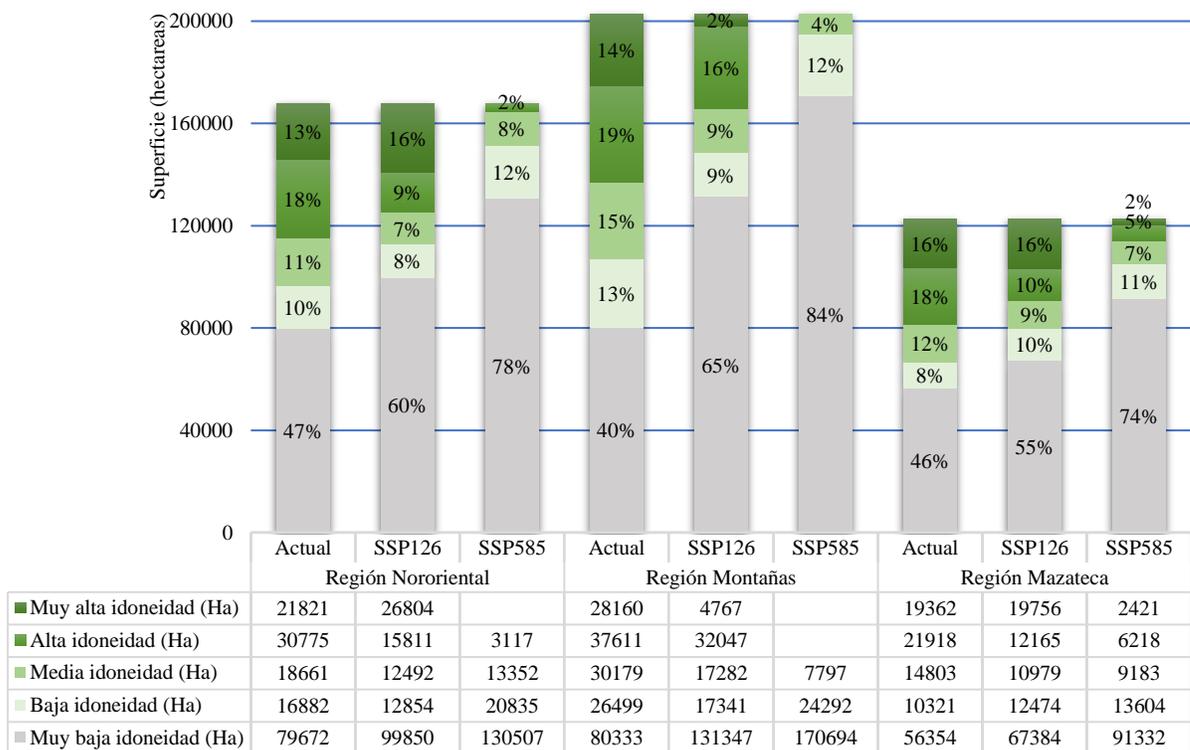


Figura 6. Cambio en la distribución potencial del *Coffea arabica* (hectáreas y porcentajes), según nivel de idoneidad ante escenarios climáticos. Fuente: Elaboración propia.

Cambio en la distribución de *C. canephora* por regiones

Se obtuvieron tres mapas de distribución de *C. canephora*, los cuales indican cambios importantes en

la idoneidad del hábitat bajo diferentes escenarios climáticos (Figura 7). El escenario de distribución actual presenta áreas de alta idoneidad en las zonas bajas. En el escenario SSP126 de cambio climático

moderado, se observa una expansión de las áreas óptimas. El escenario severo SSP585, indica una disminución significativa de las zonas idóneas de *C. canephora*, especialmente en la región Mazateca de Oaxaca. Los resultados sugieren que *C. canephora* podría beneficiarse de condiciones más cálidas, aunque los impactos varían según la ubicación específica.

En la región Nororiental, actualmente predomina el área con muy baja idoneidad con 55% para *C. canephora*, sin embargo, ante los escenarios SSP126 y SSP585, estas disminuyen a 48% y las áreas de alta y muy alta idoneidad tienden a aumentar (Figura 8). En la región de las Montañas las áreas de baja idoneidad aumentan de manera drástica en ambos escenarios, y las áreas de alta y muy alta idoneidad tienden a disminuir

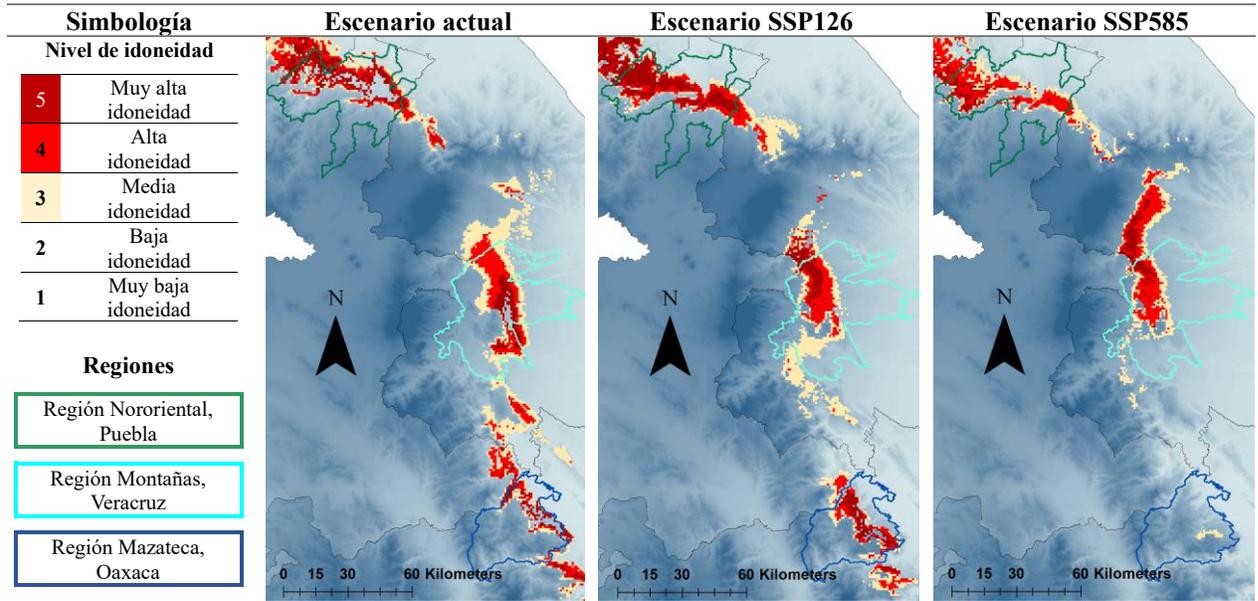


Figura 7. Cambio en la distribución potencial de *C. canephora*, según nivel de idoneidad ante escenarios climáticos. Fuente: Elaboración propia.

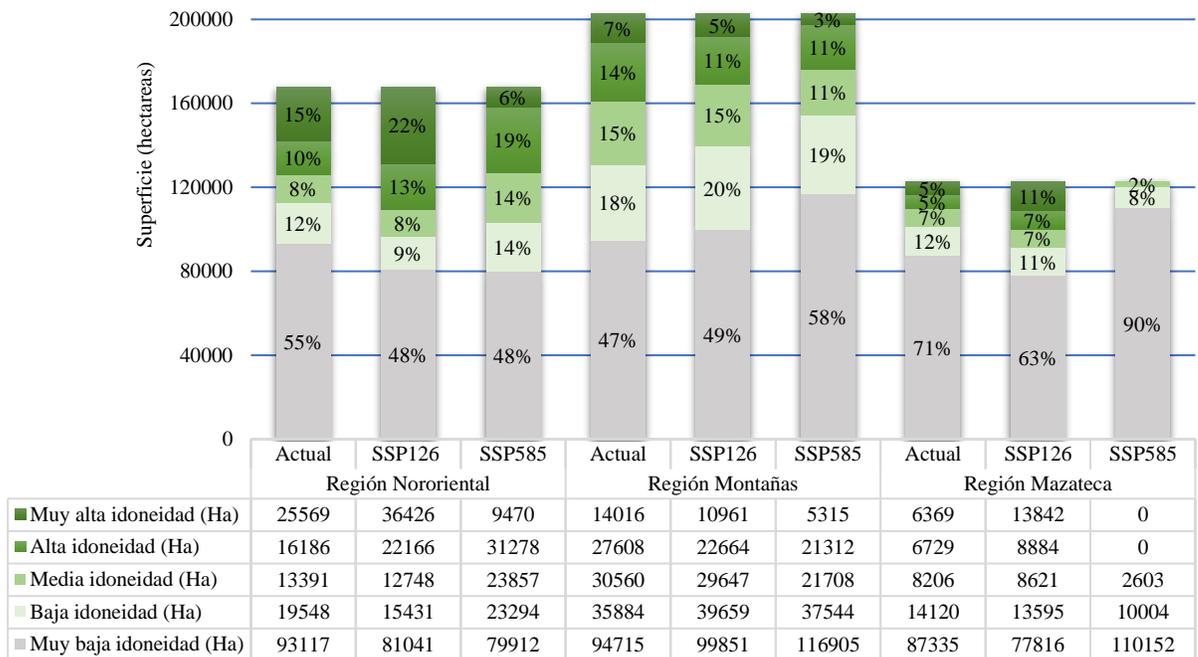


Figura 8. Cambio en la distribución potencial del *Coffea canephora* (hectáreas y porcentajes), según nivel de idoneidad ante escenarios climáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de idoneidad (MaxEnt).

de manera discreta. La región Mazateca, presenta muy baja idoneidad (71%), muestra una ligera mejora en el escenario SSP126, pero una disminución drástica en SSP585, donde el 90% del área se vuelve de muy baja idoneidad y desaparecen las zonas de alta y muy alta idoneidad.

El contraste en la respuesta entre *Coffea arabica* y *C. canephora* ante los escenarios de cambio climático es notable. Mientras *C. arabica* muestra una disminución generalizada en su área potencial de distribución en las regiones de estudio, *C. canephora* presenta respuestas heterogéneas, con ligeros beneficios y afectaciones en su distribución potencial, dependiendo de la región.

El aumento potencial de la distribución de *C. canephora* para la región nororiental, es similar a las proyecciones de Bunn *et al.* (2015), respecto al aumento de la distribución de esta especie. Martins *et al.* (2016), sugieren que esta tendencia se debe a una mejor tolerancia de *C. canephora* a las condiciones ambientales cálidas.

La mayor sensibilidad del *C. arabica* puede atribuirse a requerimientos más específicos de temperatura y precipitación, como lo han documentado DaMatta *et al.* (2019). En contraste, la relativa estabilidad o mejora en la idoneidad para *C. canephora* sugiere mayor tolerancia a temperaturas elevadas y variabilidad en precipitaciones, características mencionadas por Bracken *et al.* (2023). Sin embargo, la drástica reducción de idoneidad para *C. canephora* en la región Mazateca bajo el escenario SSP585 indica que podría enfrentar límites de tolerancia bajo condiciones climáticas extremas.

Las diferencias en la distribución entre regiones y entre especies sugieren la complejidad de los impactos del cambio climático en la producción de café. Como señalan Bilen *et al.* (2023), los efectos del cambio climático en los agroecosistemas de café son multifacéticos y pueden ser significativos según las condiciones locales y las prácticas de manejo.

Las diferencias entre las regiones analizadas se atribuyen a la interacción de los factores climáticos y de altitud. La elevación, identificada como una variable crítica en este estudio, es fundamental en la modulación de los impactos climáticos, como lo señalan Bunn *et al.* (2015). Los hallazgos sugieren que las regiones con mayor variabilidad altitudinal podrían ofrecer más opciones para la aclimatación, permitiendo el desplazamiento vertical de las zonas de cultivo, un fenómeno observado por Läderach *et al.* (2017) en otras regiones cafetaleras.

La expansión potencial de áreas aptas para *C. canephora* en algunas regiones, como se presenta para

el escenario SSP126 para la región Nororiental, sugiere una posible transición parcial hacia esta especie para mejorar el manejo de cultivos. No obstante, Campuzano y Wohlgemuth (2022) advierten que esta transición debe evaluarse cuidadosamente, considerando las implicaciones socioeconómicas y la calidad del producto.

La sustitución de *C. arabica* por *C. canephora* requiere incluir un análisis de los servicios ecosistémicos. Una alternativa podrían ser los sistemas híbridos de *C. canephora* bajo sombra moderada, los cuales conservan de 41 a 65% de los servicios ambientales que brinda los sistemas tradicionales bajo sombra con *C. arabica* (Piato *et al.*, 2020). Sin embargo, persisten otros desafíos importantes como la aceptación del mercado y el impacto en las comunidades productoras, incluidos la pérdida de conocimientos tradicionales y cambios en las prácticas culturales (Hagggar *et al.*, 2017).

Es importante señalar que, aunque los modelos de distribución de especies como MaxEnt son herramientas valiosas para proyectar cambios potenciales en la idoneidad del hábitat, tienen limitaciones. Como argumentan Schroth *et al.* (2015), estos modelos no capturan completamente la complejidad de los sistemas agrícolas, incluyendo las prácticas de manejo y las interacciones bióticas. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse en conjunto con otros tipos de evidencia y conocimiento local.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de distribución de especies mediante MaxEnt (AUC>0.98) confirman impactos diferenciados del cambio climático en la producción de *Coffea arabica* y *C. canephora* en las tres regiones estudiadas. Para *C. arabica*, la región de las Montañas muestra la mayor vulnerabilidad, con un aumento de áreas de muy baja idoneidad del 40% al 84% en el escenario SSP585, perdiendo todas sus zonas de alta y muy alta idoneidad. La región Nororiental experimentará un incremento de áreas de muy baja idoneidad del 47% al 78%, con una reducción significativa de áreas de alta idoneidad del 18% al 2%. En contraste, la región Mazateca, aunque también se verá afectada con un aumento de áreas de muy baja idoneidad del 46% al 74%, muestra mayor resiliencia al mantener un 2% de áreas de muy alta idoneidad incluso en el escenario más extremo.

Por su parte, *C. canephora* muestra respuestas heterogéneas según la región. La región Nororiental se verá beneficiada en la distribución de esta especie, con una reducción de áreas de muy baja idoneidad del 55% al 48% y un aumento en zonas de alta y muy alta idoneidad. Sin embargo, la región Mazateca exhibe la

mayor vulnerabilidad para esta especie, con un aumento dramático de áreas de muy baja idoneidad hasta el 90% en el escenario SSP585, mientras que la región de las Montañas muestra un incremento discreto en áreas de baja idoneidad.

Los hallazgos cuantitativos de esta investigación sugieren estrategias de adaptación diferenciadas por región: la región Nororiental presenta condiciones favorables para una potencial transición parcial hacia *C. canephora*, dada la proyección de aumento en áreas de alta idoneidad para esta especie; la región Mazateca, al mantener áreas de alta idoneidad para *C. arabica*, podría enfocarse en la optimización de las prácticas de cultivo existentes en las zonas resilientes identificadas; mientras que la región de las Montañas, dada su alta vulnerabilidad proyectada para ambas especies, requerirá estrategias más radicales en el manejo de los agroecosistemas cafetaleros o la consideración de alternativas productivas. Estos resultados proporcionan una base sólida para la toma de decisiones diferenciadas por región, considerando que los impactos del cambio climático no serán uniformes y requerirán estrategias específicas según las condiciones locales identificadas en la modelación.

Acknowledgments

We extend our gratitude to the Tosepan Titataniske Cooperative, from the municipality of Cuetzalan del Progreso, for their support and guidance during our visit to the study region. In the Mazatec region, we give special recognition to Professor Jesús Carrera García, from the municipality of Santa María Chilchotla, Oaxaca, for his support and for serving as a liaison with other municipalities during the data collection process. Likewise, in the Montañas region of Veracruz, we appreciate the collaboration and commitment of SEDARPA extension technicians, M.C. Juan Carlos García González and Eng. Mario Alejandro Peralta from the municipality of Tepatlaxco, as well as the agricultural development directors of the studied municipalities.

Funding. This work was funded by a postdoctoral research fellowship project from CONAHCYT.

Conflict of Interest. There are no conflicts of interest.

Ethical Standards Compliance. Due to the nature of the work, ethical approval is not required.

Data Availability. The data are available upon request from the corresponding author.

Author Contribution Statement (CRediT). **J. Guerrero Carrera:** Investigation, Methodology, Software, Formal analysis, Writing – original draft. **J.A. Hernández Flores:** Conceptualization, Project

administration, Supervision, Validation. **J.L. Jaramillo Villanueva:** Data curation, Writing – review & editing.

REFERENCES

- Alvarado, M.A., Lozano, F., Martínez, M.A. and Colmenero, A., 2006. Usos y destinos de los suelos en la región de Cuetzalan, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, 59, pp. 43-58.
- Baca, M., Läderach, P., Haggar, J., Schroth, G. and Ovalle, O., 2014. An Integrated Framework for Assessing Vulnerability to Climate Change and Developing Adaptation Strategies for Coffee Growing Families in Mesoamerica. *PLoS ONE*, 9(2), pp. e88463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088463>
- Ballinas, M., Esperón-Rodríguez, M. and Barradas, V.L., 2015. Estimating evapotranspiration in the central mountain region of Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), pp. 445-455. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300011>
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C.H. and Thuiller, W., 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), pp. 327-338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Bilen, C., El Chami, D., Mereu, V., Trabucco, A., Marras, S. and Spano, D., 2022. A Systematic Review on the Impacts of Climate Change on Coffee Agrosystems. *Plants*, 12(1), pp. 102. <https://doi.org/10.3390/plants12010102>
- Bracken, P., Burgess, P.J. and Girkin, N.T., 2023. Opportunities for enhancing the climate resilience of coffee production through improved crop, soil and water management. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47(8), pp. 1125-1157. <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2225438>
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O. and Kirschke, D., 2015. A bitter cup: Climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1-2), pp. 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>

- Bunn, C., Läderach, P., Pérez Jimenez, J.G., 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>
- Calvillo-Arriola, A.E. and Sotelo-Navarro, P.X., 2024. A step towards sustainability: Life cycle assessment of coffee produced in the indigenous community of Ocotepéc, Chiapas, Mexico. *Discover Sustainability*, 5(1), pp. 17. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00194-6>
- Campuzano-Duque, L.F. and Blair, M.W., 2022. Strategies for Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Improvement as a New Crop in Colombia. *Agriculture*, 12(10), pp. 1576. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101576>
- Cassamo, C.T., Draper, D., Romeiras, M.M., Marques, I., Chiulele, R., Rodrigues, M., Stalmans, M., Partelli, F.L., Ribeiro-Barros, A. and Ramalho, J.C., 2023. Impact of climate changes in the suitable areas for *Coffea arabica* L. production in Mozambique: Agroforestry as an alternative management system to strengthen crop sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 346, pp. 108341. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108341>
- Cerda-Ocaranza, M.G., Salgado-Mora, M.G., Aguirre-Cadena, J.F. and Chilel Pérez, N.D., 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(1), pp. 5547-5565. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4870
- Chalchissa, F.B., Diga, G.M. and Tolossa, A.R., 2022. Modeling the responses of Coffee (*Coffea arabica* L.) distribution to current and future climate change in Jimma Zone, Ethiopia. *SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 19(1), pp. 19. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v19i1.54885>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2024. Cobertura de vegetación y uso de suelo de México 2018: Escala 1:250,000 [Archivo TIFF]. Geportal de CONABIO.
- Craparo, A.C.W., Van Asten, P.J.A., Läderach, P., Jassogne, L.T.P. and Grab, S.W., 2015. *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.005>
- Cuervo-Robayo, A.P., Ureta, C., Gómez-Albores, M.A., Meneses-Mosquera, A.K., Téllez-Valdés, O. and Martínez-Meyer, E., 2020. One hundred years of climate change in Mexico. *PLOS ONE*, 15(7), pp. e0209808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- DaMatta, F.M., Avila, R.T., Cardoso, A.A., Martins, S.C.V. and Ramalho, J.C., 2018. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), pp. 5264-5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M. and Barros, R.S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), pp. 485-510. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>
- Davis, A.P., Gole, T.W., Baena, S. and Moat, J., 2012. The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. *PLoS ONE*, 7(11), pp. e47981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047981>
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists: Statistical explanation of MaxEnt. *Diversity and Distributions*, 17(1), pp. 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Ferrão, M.A.G., Riva-Souza, E.M., Azevedo, C., Volpi, P.S., Fonseca, A.F.A., Ferrão, R.G., Montagnon, C. and Ferrão, L.F.V., 2024. Robust and smart: Inference on phenotypic plasticity of *Coffea canephora* reveals adaptation to alternative environments. *Crop Science*, pp. csc2.21298. <https://doi.org/10.1002/csc2.21298>

- 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>
- Gabriel-Hernández, L. and Barradas, V.L., 2024. Panorama of Coffee Cultivation in the Central Zone of Veracruz State, Mexico: Identification of Main Stressors and Challenges to Face. *Sustainability*, 16(2), pp. 802. <https://doi.org/10.3390/su16020802>
- García-Albarado, C., Gómez-Merino, F., Bruno-Rivera, A., Rosas-López, A., Servín-Juárez, R. and Muñoz-Márquez, R., 2018. Identificación de elementos identitarios en la región de las altas montañas de Veracruz. *Agroproductividad*, 11(8), pp. 95-100.
- Gasparín-García, E.M., Platas-Rosado, D.E., Zetina-Córdoba, P., Vilaboa-Arroniz, J. and Dávila, F.M., 2022. Calidad de vida de los cafecultores en las Altas Montañas de Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana*, pp. 50163. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.50163>
- Guerrero-Carrera, J. and Hernández-Flores, J.A., 2024. Impacto del cambio climático en la producción de café en Veracruz bajo un enfoque Ricardiano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3896>
- Guerrero-Carrera, J., Jaramillo-Villanueva, J.L., Mora-Rivera, J., Bustamante-González, Á., Vargas-López, S. and Chulim-Estrella, N., 2020. Impacto del cambio climático sobre la producción de café. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(71), pp. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3288>
- Haggar, J., Soto, G., Casanoves, F. and Virginio, E.D.M., 2017. Environmental-economic benefits and trade-offs on sustainably certified coffee farms. *Ecological Indicators*, 79, pp. 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.023>
- Imbach, P., Fung, E., Hannah, L., Navarro-Racines, C.E., Roubik, D.W., Ricketts, T.H., Harvey, C.A., Donatti, C.I., Läderach, P., Locatelli, B. and Roehrdanz, P.R., 2017. Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(39), pp. 10438-10442. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617940114>
- Jaramillo-Villanueva, J.L., Guerrero-Carrera, J., Vargas-López, S. and Bustamante-González, Á., 2022. Percepción y adaptación de productores de café al cambio climático en Puebla y Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3170>
- Jiménez, A.A., Marcelño 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>
- Kath, J., Mittahalli Byrareddy, V., Mushtaq, S., Craparo, A. and Porcel, M., 2021. Temperature and rainfall impacts on robusta coffee bean characteristics. *Climate Risk Management*, 32, pp. 100281. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100281>
- Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez-Valle, A. and Jarvis, A., 2017. Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, 141(1), pp. 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- LaFevor, M.C., 2022. Characterizing Agricultural Diversity with Policy-Relevant Farm Typologies in Mexico. *Agriculture*, 12(9), pp. 1315. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091315>
- López-García, F.J., Escamilla-Prado, E., Zamarripa-Colmenero, A. and Cruz-Castillo, J.G., 2016. Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), pp. 297-304. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.297-304>
- Martins, M.Q., Rodrigues, W.P., Fortunato, A.S., Leitão, A.E., Rodrigues, A.P., Pais, I.P., Martins, L.D., Silva, M.J., Reboledo, F.H., Partelli, F.L., Campostrini, E., Tomaz, M.A., Scotti-Campos, P., Ribeiro-Barros, A.I., Lidon, F.J.C., DaMatta, F.M. and Ramalho, J.C., 2016. Protective Response Mechanisms to Heat Stress in Interaction with High [CO₂] Conditions in *Coffea* spp. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00947>

- Meinshausen, M., Nicholls, Z.R.J., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J.G., Daniel, J.S., John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S. and Wang, R.H.J., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), pp. 3571-3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Moguel, P. and Toledo, V.M., 1999. Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología política*, 18, pp. 23-36.
- Navidad-Murrieta, D.L., Marcelaño-Flores, S.M.L., Nájera-González, A., Nájera-González, O. and Ramírez-Silva, J.P., 2023. Effects of Land Cover and Land Use Change on Nature's Contributions to People of the Shade-Grown Coffee Agroecosystem: An Analysis of Cumbres de Huicicila, Nayarit, Mexico. *Conservation*, 3(3), pp. 426-443. <https://doi.org/10.3390/conservation3030029>
- Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. and Schroth, G., 2015. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLOS ONE*, 10(4), pp. e0124155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>
- Parada Molina, P.C., Cervantes Pérez, J., Ruiz Molina, V.E. and Cerdán Cabrera, C.R., 2020. Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: Caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Ingeniería y Región*, 24, pp. 61-71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), pp. 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Piato, K., Lefort, F., Subía, C., Caicedo, C., Calderón, D., Pico, J. and Norgrove, L., 2020. Effects of shade trees on robusta coffee growth, yield and quality. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), pp. 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00642-3>
- Radosavljevic, A. and Anderson, R.P., 2014. Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4), pp. 629-643. <https://doi.org/10.1111/jbi.12227>
- Schroth, G., Läderach, P., Blackburn Cuero, D.S., Neilson, J. and Bunn, C., 2015. Winner or loser of climate change? A modeling study of current and future climatic suitability of Arabica coffee in Indonesia. *Regional Environmental Change*, 15(7), pp. 1473-1482. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0713-x>
- Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., Castillejos, T., Garcia 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(7), pp. 605-625. <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>
- SIAP, 2023. Escenario mensual de productos agroalimentarios: Café cereza. CDMX: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de www.gob.mx/siap
- Siles, P., Cerdán, C.R. and Staver, C., 2022. Smallholder Coffee in the Global Economy—A Framework to Explore Transformation Alternatives of Traditional Agroforestry for Greater Economic, Ecological, and Livelihood Viability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, pp. 808207. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.808207>