

Modelación de la Favorabilidad Climática para *Phytophthora* spp. en Ecuador: Implicaciones para el Control Biológico en el Cultivo de Cacao Modeling Climate Favorability for *Phytophthora* spp. in Ecuador: Implications for Biological Control in Cocoa Cultivation

Yarelys Ferrer-Sánchez^{1†}, Narcisa Estefanía Puente-Monar^{1,2} y
Kerly Xiomara Manrique-Piedra¹

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (Y.F.S.), (N.E.P.M.), (K.X.M.P.).

[†] Autor para correspondencia: yferrer@uteq.edu.ec

² Grupo Manobanda. km 1 Vía a Valencia, Sector La Esperanza. 120150 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (N.E.P.M.).

RESUMEN

El cacao es un cultivo de gran importancia económica a nivel mundial, aunque enfrenta serios riesgos debido a factores climáticos, plagas y enfermedades. El presente estudio evalúa las variaciones en la favorabilidad climática para la proliferación de *Phytophthora* spp., en Ecuador, bajo diferentes escenarios de cambio climático. Para ello, se utilizaron modelos de nicho ecológico basados en MaxEnt, integrando datos climáticos y geográficos, junto con las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) con los escenarios SSP2-4,5 y SSP5-8,5 en 2041-2060 y 2081-2100. Los resultados demostraron que la distribución actual de *Phytophthora* spp. coincide significativamente con las principales zonas productoras de cacao, especialmente en la región Costa. Sin embargo, bajo escenarios climáticos futuros, el área favorable para el patógeno se expande hacia zonas de mayor altitud, afectando potencialmente regiones de la Amazonía. Los resultados revelan que más del 50% del área cacaotera nacional coincide con la distribución potencial del patógeno. El estudio enfatiza la urgencia de adoptar medidas preventivas diferenciadas para reducir el riesgo fitosanitario y proteger la sostenibilidad del cacao frente al cambio climático. Por último, mediante el diseño de estrategias de prevención territorializadas, incluyendo prácticas agroecológicas, control biológico y fortalecimiento de capacidades locales, se podría controlar de forma efectiva la proliferación de las enfermedades.

Palabras clave: nicho ecológico, proyecciones climáticas, pudrición negra de la mazorca, zonas de riesgo.

SUMMARY

Cocoa is a crop of great economic importance worldwide; however, it faces serious risks due to climatic factors, pests, and diseases. The present study evaluated variations in climatic favorability for the proliferation of *Phytophthora* spp. in Ecuador under different climate change scenarios. For this purpose, ecological niche models based on MaxEnt were used, integrating climatic and geographic data together with shared socioeconomic pathways (SSPs), including SSP2-4,5 and SSP5-8,5 scenarios for the periods 2041-2060 and 2081-2100. The results showed that the current distribution of *Phytophthora* spp. significantly overlaps with the main cocoa-producing areas, especially in the Coastal region. However, under future climate scenarios, the favorable area for the pathogen expands toward higher-altitude zones, potentially affecting regions of the Amazon. The results also revealed that more than 50% of the national cocoa-growing area coincides with the potential distribution of the pathogen. Finally, the design of territorialized prevention strategies, including agroecological practices, biological control, and local capacity building, could



Cita recomendada:

Ferrer-Sánchez, Y., Puente-Monar, N. E., & Manrique-Piedra, K. X. (2026). Modelación de la Favorabilidad Climática para *Phytophthora* spp. en Ecuador: Implicaciones para el Control Biológico en el Cultivo de Cacao. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-20. e2438. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2438>

Recibido: 23 de octubre de 2025.

Aceptado: 30 de enero de 2026.

Artículo. Volumen 44.

Abril de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

effectively control disease proliferation. The study emphasizes the urgency of adopting differentiated preventive measures to reduce phytosanitary risk and protect cocoa sustainability under climate change conditions.

Index words: *ecological niche, climate projections, black pod rot, risk zones.*

INTRODUCCIÓN

El cacao es un cultivo de gran importancia económica a nivel mundial, cultivado en más de 50 países (Guamán-Villa, Jaramillo y Bernal, 2022). Ecuador ocupa el cuarto lugar en exportaciones de cacao, con 293 487 toneladas al año, producidas en 559 617 hectáreas. Sin embargo, el rendimiento por hectárea es bajo debido principalmente a la presencia de patógenos que afectan la mazorca (Anzules-Toala *et al.*, 2022). Los efectos del cambio climático han incrementado la aparición de brotes de enfermedades causadas por microorganismos fitopatógenos (Singh *et al.*, 2023; Hossain *et al.*, 2024).

El cambio climático afecta las zonas de cultivo de cacao alterando los regímenes hídricos e influyendo en la proliferación de plagas y enfermedades (Cilas y Bastide, 2020). Una de las mayores amenazas es la mazorca negra, causada por hongos del género *Phytophthora* spp., que genera pérdidas anuales superiores al 40% en las plantaciones a nivel mundial (Simamora, Hahuly y Henuk, 2021), afectando principalmente a los pequeños agricultores en países tropicales (Attah, Asare y Bukari, 2021). El cambio climático tiene el potencial de modificar las áreas donde el patógeno encuentra condiciones óptimas para su desarrollo (Bevacqua, Vanalli, Casagrandi y Gatto, 2023).

En Ecuador, *Phytophthora* spp. afecta particularmente a las plantaciones de cacao CCN-51, una variedad ampliamente cultivada en el país (Moreira *et al.*, 2020). Durante la temporada de lluvias, el patógeno se propaga rápidamente, lo que puede provocar pérdidas de entre el 70% y el 80% de la producción anual (Ndoungue *et al.*, 2018). Además, puede dañar hasta el 30% de las vainas y matar el 10% de los árboles de cacao (Merga, 2022). En las regiones tropicales, se ha predicho que la productividad del cacao puede disminuir debido al cambio en las áreas de cultivo y al aumento de plagas y patógenos por condiciones climáticas desfavorables (Adejuwon, Tewogbade, Oguntoke y Ufoegbune, 2023). Para estudiar la propagación futura de *Phytophthora* spp. en el contexto del cambio climático, una de las herramientas más empleadas son las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) del Sexto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Las trayectorias incluyen escenarios de altas emisiones de gases de efecto invernadero que prevén un incremento significativo en las emisiones de CO₂. Así como escenarios de emisiones intermedias, donde los niveles de CO₂ se estabilizan (Meinshausen *et al.*, 2020).

El estudio de la favorabilidad climática para *Phytophthora* spp. en escenarios de cambio climático es crucial para comprender y mitigar los riesgos que enfrenta el cultivo de cacao, un recurso clave para la economía y seguridad alimentaria en regiones tropicales. Además, los cambios climáticos proyectados, como el incremento de la temperatura y la alteración de los patrones de lluvia, aumentan la vulnerabilidad de las plantaciones al facilitar condiciones óptimas para la propagación de *Phytophthora* spp. (Mateus-Rodríguez, Lahive, Hadley y Daymond, 2023).

A pesar de estas necesidades de información, en Ecuador la investigación sobre los efectos del cambio climático en la distribución y proliferación de *Phytophthora* spp. son muy limitadas. Esto se debe a varios factores: insuficiencia de financiamiento dedicado a la investigación científica, la falta de infraestructura especializada y de laboratorios bien equipados. Además, la escasez de modelos predictivos enfocados específicamente en la fitopatología y cambio climático dificulta el desarrollo de estrategias efectivas para su control.

Se espera que el cambio climático genere una variación en la favorabilidad climática para *Phytophthora* spp. en Ecuador continental, modificando su distribución geográfica potencial e incrementando la incidencia de la mazorca negra en las plantaciones de cacao. Para ello, se evaluaron las variaciones en la favorabilidad climática para *Phytophthora* spp. en Ecuador continental ante escenarios de cambio climático y su incidencia sobre las plantaciones de cacao. Además, se examinó cómo los escenarios climáticos futuros SSP2-4,5 y SSP5-8,5 en los periodos 2041-2060 y 2081-2100 pueden influir en la distribución de *Phytophthora* spp. lo que repercute en la viabilidad y productividad de las plantaciones de cacao en Ecuador.

En función de los antecedentes y del objetivo de la investigación, se espera que el modelado del nicho climático de *Phytophthora* spp. revele áreas con mayor favorabilidad climática futura, en especial en regiones que actualmente no presentan alta incidencia de la enfermedad, debido a los cambios proyectados en temperatura y precipitación. Además, los escenarios de cambio climático podrían mostrar una expansión de la distribución potencial de *Phytophthora* spp. hacia zonas de altitud media y alta en Ecuador continental, que actualmente son menos afectadas por la mazorca negra. Por último, se predice una mayor coincidencia entre las áreas de distribución potencial de *Phytophthora* spp. y las zonas de cultivo de cacao en los escenarios de cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El presente estudio se desarrolló en la región continental de Ecuador, país ubicado sobre la línea ecuatorial en América del Sur. Ecuador se sitúa estratégicamente en ambos hemisferios terrestres, limitando al norte con Colombia, al sur y este con Perú, y al oeste con el Océano Pacífico. Las coordenadas geográficas del país abarcan desde 1° 27' 06" N hasta 5° 0' 56" S en latitud, y desde 75°11' 49" O hasta 81° 0' 40" O, cubriendo una superficie total de 256 370 km². Ecuador presenta una división geográfica natural en cuatro regiones bien diferenciadas. Tres de las regiones son continentales y se distinguen entre sí por su topografía, clima, vegetación y características poblacionales: la región Pacífica o Costa, la región Andina o Sierra, y la Amazonía u Oriente. La cuarta región corresponde a la región Insular, conformada por el archipiélago de las islas Galápagos.

Recopilación y Procesamiento de Registros de Presencia

Fuentes de Información

La obtención de registros de presencia de *Phytophthora* spp. se realizó mediante una estrategia múltiple y exhaustiva de recopilación de datos. El género incluye varias especies que afectan al cacao (p. ej.: *P. palmivora*, *P. capsici*) pero se siguió un enfoque a nivel de género ya que la identificación a nivel de especie en los registros de presencia es inconsistente o incierta, lo cual es una estrategia válida y común.

La fuente principal de información para la obtención de registros de presencia de la especie fue Agrocalidad, encargada de la regulación y control de la sanidad del sector agropecuario y la inocuidad de los alimentos en la producción primaria. La plataforma GBIF (Global Biodiversity Information Facility), que constituye la base de datos de biodiversidad más completa a nivel mundial y proporciona registros georreferenciados de alta calidad para especies de diversos grupos taxonómicos, también se usó como fuente de datos.

La información se complementó con una búsqueda sistemática en diversas fuentes académicas especializadas, incluyendo artículos científicos publicados en revistas indexadas, libros especializados en fitopatología y micología, tesis de grado y posgrado. La aproximación metodológica integral garantizó la obtención de un conjunto de datos robusto y representativo de la presencia de *Phytophthora* spp., en el territorio ecuatoriano lo cual es necesario para desarrollar modelos de distribución confiables y precisos.

Filtrado y Limpieza de Datos

El proceso inicial de recopilación resultó en la identificación de 2.171 registros de presencia del complejo de especies de *Phytophthora* asociadas al cacao en Ecuador (*P. palmivora*, *P. capsici*). Sin embargo, los datos requirieron un proceso riguroso de filtrado y limpieza para garantizar la calidad y confiabilidad de la información utilizada en el modelado. Los criterios de filtrado aplicados incluyeron la eliminación de registros con errores de georreferenciación, identificados mediante la verificación de la coherencia entre las coordenadas geográficas y las localidades reportadas, además de la eliminación de registros > 1500 m de altitud para la consistencia con la plaga en cacao.

Se eliminaron los registros duplicados y aquellos considerados demasiado cercanos espacialmente (distancia menor a 1 km), con el objetivo de evitar la redundancia de información ambiental y prevenir sesgos de agregación espacial que podrían afectar negativamente el rendimiento del modelo. La distancia de 1 km se seleccionó para que coincidiera con la resolución espacial de las variables ambientales utilizadas (~30 segundos de arco), asegurando que cada píxel contenga como máximo un punto de presencia.

Adicionalmente, se verificó la taxonomía de los registros para asegurar la correcta identificación de las especies del género *Phytophthora*, eliminando aquellos registros con identificación taxonómica dudosa o incompleta. Tras el proceso de depuración, se obtuvo un conjunto final de 1710 registros de presencia de alta calidad, distribuidos espacialmente de manera representativa a lo largo del territorio continental ecuatoriano (Figura 1). La distribución temporal de los registros tuvo una concentración de datos en los años recientes (2019-2024), lo que garantiza la relevancia temporal de la información utilizada y su coherencia con las condiciones climáticas actuales empleadas en el modelado.

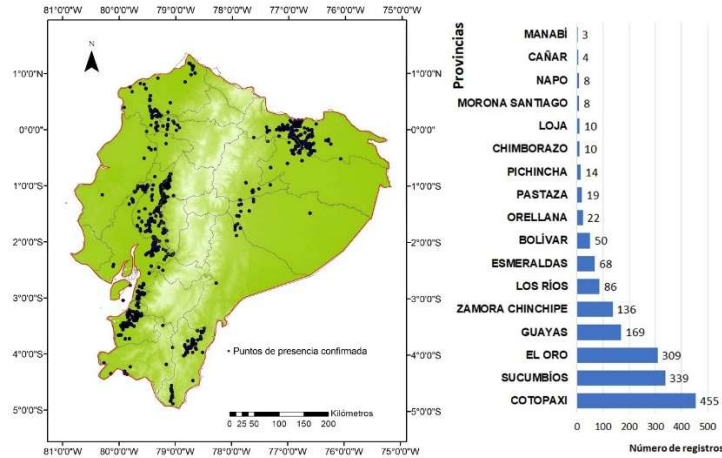


Figura 1. Distribución espacial de los registros de presencia de *Phytophthora* spp. en Ecuador continental.
Figure 1. Spatial distribution of records of the presence of *Phytophthora* spp. presence in mainland Ecuador.

Variables Bioclimáticas

Para caracterizar las condiciones climáticas del área de estudio, se utilizaron las variables bioclimáticas de la base de datos WorldClim versión 2.1 (Fick y Hijmans, 2017). La base de datos constituye el estándar internacional para estudios de modelado de distribución de especies, proporcionando información climática de alta resolución derivada de interpolaciones espaciales de datos meteorológicos observados. WorldClim incluye un total de 19 variables bioclimáticas: 11 variables relacionadas con temperatura (BIO1-BIO11) y 8 variables de precipitación (BIO12-BIO19) (Figura 2) (Neira, 2016).

Las variables bioclimáticas utilizadas poseen una resolución espacial de 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km²), lo que proporciona un nivel de detalle adecuado para análisis a escala nacional. Las variables se derivaron de la interpolación espacial de datos de precipitación y temperatura mensual promedio obtenidos de estaciones meteorológicas durante el período 1970-2000, garantizando una representación robusta y estable de las condiciones climáticas de referencia (Fick y Hijmans, 2017).

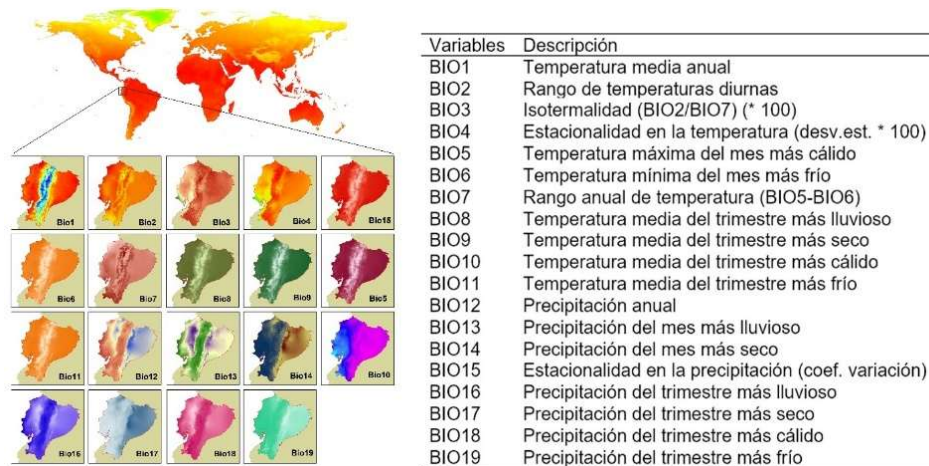


Figura 2. Representaciones, acrónimos y nombres completos de las variables bioclimáticas descritas por Busby (1991) y recogidas en la base WordClim 2.1.
Figure 2. Representations, acronyms and full names of the bioclimatic variables described by Busby (1991) and collected in the WordClim 2.1 database.

Extracción de Información Climática

La extracción de información climática se realizó utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcGIS versión 10.5 (Esri, 2011). Mediante la herramienta *Spatial Analyst Tool*, se implementó el proceso de extracción de valores múltiples a puntos, utilizando los registros de presencia de *Phytophthora* spp., como puntos de referencia y las 19 variables bioclimáticas como capas de información ambiental.

Con el objetivo de identificar las variables ambientales que más contribuyen a la variabilidad del nicho climático de *Phytophthora* spp., se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) utilizando la información ambiental extraída tanto de los registros de presencia como de los puntos aleatorios. El análisis permitió reducir la dimensionalidad del espacio ambiental, identificar patrones de correlación entre variables y determinar las combinaciones de variables que mejor explican la variabilidad climática en el área de estudio.

Modelación de Nicho Ecológico

Para el modelado del nicho climático del complejo de especies de *Phytophthora* asociadas al cacao en Ecuador (*P. palmivora*, *P. capsici*), se empleó el algoritmo de máxima entropía MaxEnt, implementado en el programa homónimo versión 3.4.0 (Phillips, Anderson y Schapire, 2017). MaxEnt es un método correlativo de modelado de distribución de especies que utiliza exclusivamente información de presencia y variables ambientales para generar modelos predictivos de las condiciones que favorecen la presencia de una especie particular (Geoinnova, 2020).

El principio fundamental de MaxEnt se basa en encontrar la distribución de máxima entropía (más uniforme) sujeta a las restricciones impuestas por los datos de presencia observados y las variables ambientales. El enfoque permite generar estimaciones de la distribución de probabilidad de ocurrencia de la especie a lo largo del espacio geográfico, identificando las áreas con mayor idoneidad ambiental para su presencia (Phillips *et al.*, 2017).

El modelo matemático resultante se proyecta nuevamente sobre el espacio geográfico para generar mapas continuos de idoneidad que representan la distribución potencial de las condiciones favorables para una especie, en este caso las del género *Phytophthora*. Los mapas indican la probabilidad relativa de presencia de las especies en cada píxel del área de estudio, basándose en las asociaciones estadísticas entre los registros de presencia y las variables ambientales (Phillips, Anderson, Dudík, Schapire y Blair, 2006). Si se normaliza su resultado numérico se puede interpretar el valor resultante en términos de favorabilidad, idoneidad o adecuación climática.

Se mantuvieron los parámetros por defecto del programa MaxEnt, los cuales han demostrado ser conservativos y permiten al algoritmo alcanzar valores cercanos a la convergencia en la mayoría de las aplicaciones (Phillips *et al.*, 2017). La configuración estándar ha demostrado ser robusta en una amplia gama de aplicaciones, proporcionando un buen equilibrio entre el ajuste y la complejidad del modelo, e incluye el uso de todas las características disponibles (lineal, cuadrática, producto, umbral y bisagra) y la selección automática de regularización. Se consideró que otros ajustes finos de los parámetros no eran indispensables para los objetivos del estudio, que se centra en patrones de cambio a gran escala de un grupo multiespecífico.

Los registros se depuraron eliminando coordenadas duplicadas, incompletas, erróneas y registros que se encontraban fuera de Ecuador continental. Con ayuda del paquete EcoNicheS (Sunny *et al.*, 2025) de R, se aplicó un filtro espacial de 1 km entre cada punto de presencia que coincide con la resolución de datos ráster que se usaron a lo largo del estudio (~1 km), además de un *spatial thinning* para reducir sesgos asociados al muestreo. Esta limpieza de los datos evitó sesgos de muestreo y aglomeración de registros en zonas concretas que hayan sido tomados múltiples veces. Para la calibración y validación del modelo, se implementó una estrategia de validación cruzada mediante la partición aleatoria de los datos de presencia sin reemplazo. El 60% de los registros de presencia (1026 registros) se utilizaron para calibrar el modelo, mientras que el 40% restante (684 registros) se reservaron para la validación independiente del modelo resultante. Se ingresaron las variables bioclimáticas BIO1, BIO4, BIO5, BIO6, BIO8, BIO10, BIO11, BIO13, BIO14, BIO15, BIO17 en el modelo, luego de eliminar las altamente correlacionadas (Correlación Spearman $r > 0.7$).

Los mapas continuos de idoneidad se transformaron a mapas binarios de presencia (1)/ausencia (0) utilizando como umbral de corte el criterio de "máxima sensibilidad más especificidad" calculado sobre el conjunto de datos de validación. El umbral busca maximizar la suma de la sensibilidad (proporción de verdaderos positivos correctamente identificados) y la especificidad (proporción de verdaderos negativos correctamente identificados). La selección del umbral proporciona un equilibrio óptimo entre la detección correcta de las presencias y la minimización de falsos positivos, lo que resulta en mapas binarios que no están sesgados hacia favorecer únicamente la detección o únicamente la precisión. El criterio es particularmente robusto y funciona adecuadamente en diversos contextos prácticos, especialmente cuando se requiere un rendimiento equilibrado del modelo.

Proyecciones Bajo Escenarios de Cambio Climático

Para evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución potencial de *Phytophthora* spp., se utilizaron las proyecciones climáticas del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AR6) (IPCC, 2021). Específicamente, se emplearon los resultados del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6), que representan el estado del arte en modelado climático global.

Las proyecciones climáticas utilizadas poseen una resolución espacial de 1 km², obtenida mediante técnicas de reducción de escala estadística aplicadas a las salidas de los Modelos de Circulación General (Carril, Flombaum y Menéndez, 2023). Se empleó específicamente el modelo MIROC6 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate* versión 6), seleccionado por su buen rendimiento en la representación del clima regional sudamericano (Ruiz-García *et al.*, 2022).

Se evaluaron dos escenarios que resultan de la combinación de los escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP, por sus siglas en inglés), con las Trayectorias de Concentración Representativas (*Representative Concentration Pathways*, RCP) que representan diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero. El primer número representa la trayectoria socioeconómica y el segundo el forzamiento radiativo en el año 2100 en W m⁻², de esta forma se trabajó con dos escenarios:

SSP2-4,5 (Escenario de emisiones intermedias). El escenario representa una trayectoria intermedia donde las emisiones de CO₂ se estabilizan alrededor de 2080 y posteriormente declinan. Corresponde a un forzamiento radiativo de 4.5 W/m² para el año 2100, representando políticas climáticas moderadas y cambios graduales en los patrones de desarrollo socioeconómico.

SSP5-8,5 (Escenario de emisiones muy altas). Representa una trayectoria de altas emisiones con crecimiento económico rápido impulsado por combustibles fósiles. Las emisiones continúan aumentando durante todo el siglo XXI, alcanzando un forzamiento radiativo de 8.5 W m⁻² para 2100, representando un escenario de desarrollo con limitadas políticas de mitigación climática.

Las proyecciones se realizaron para dos períodos futuros específicos: Período medio (2041-2060): Representa las condiciones climáticas esperadas hacia mediados del siglo XXI; Período tardío (2081-2100): Representa las condiciones climáticas esperadas hacia finales del siglo XXI. La selección temporal permite evaluar tanto los impactos a mediano plazo como los cambios más pronunciados esperados en el largo plazo, proporcionando información valiosa para la planificación de estrategias de adaptación en diferentes horizontes temporales.

Análisis de Coincidencia Espacial con Plantaciones de Cacao

Para determinar las áreas correspondientes al cultivo de cacao en Ecuador continental, se utilizó el mapa oficial de cobertura de uso de suelo agrícola desarrollado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). La información se encuentra disponible públicamente a través del Geoportal del Agro Ecuatoriano MAG (2022).

Según los metadatos oficiales, el producto cartográfico fue creado en octubre de 2021 y actualizado en marzo de 2022, garantizando la actualidad y precisión de la información utilizada. El mapa presenta una resolución espacial adecuada para análisis a escala nacional y ha sido desarrollado mediante metodologías estandarizadas de clasificación de imágenes satelitales y verificación de campo.

El análisis de coincidencia espacial entre las plantaciones de cacao y la distribución potencial de *Phytophthora* spp., se realizó mediante técnicas de superposición de capas en ambiente SIG. Se utilizaron los mapas binarios de distribución del fitopatógeno (presencia/ausencia) y la capa de uso del suelo correspondiente al cultivo de cacao para identificar las áreas de coincidencia espacial (Ferrer-Sánchez, Mafaldo, Plasencia y Urdánigo, 2022).

El análisis permitió identificar las zonas de mayor riesgo fitosanitario, donde las condiciones climáticas son favorables tanto para el cultivo de cacao como para el desarrollo del patógeno. Además, se analizó la existencia de puntos de equilibrio y su estabilidad, simulando el modelo utilizando datos sobre casos de mazorca negra reportados en Ecuador continental (Oduro, Apenteng y Nkansah, 2020). Los resultados de la superposición proporcionan información crucial para la implementación de estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades en el cultivo cacaotero.

Para evaluar los cambios en la distribución potencial de *Phytophthora* spp., bajo diferentes escenarios climáticos, se realizó una comparación sistemática entre los mapas de distribución actual y futura. Se identificaron y cuantificaron tres categorías de cambio: *Rango de ampliación*: Áreas que actualmente no presentan condiciones favorables pero que las desarrollarán bajo los escenarios futuros; *Rango de estabilidad*: Áreas que mantienen condiciones favorables tanto en el presente como en los escenarios futuros; *Rango de contracción*: Áreas que actualmente presentan condiciones favorables pero que las perderán bajo los escenarios futuros.

Para cada escenario temporal y socioeconómico, se calculó la extensión superficial (km²) de cada categoría de cambio, permitiendo cuantificar la magnitud y dirección de los cambios esperados en la distribución del patógeno. Una vez identificadas las zonas de coincidencia entre el patógeno y las plantaciones se propusieron medidas preventivas para reducir la propagación rápida de *Phytophthora* spp., ya que el manejo efectivo de las enfermedades de las plantas requiere no solo la identificación precisa de los agentes causales, sino la implementación de estrategias sostenibles, como el control biológico y prácticas agrícolas que minimicen la incidencia de enfermedades (Ali, Bachik, Muhadi, Yusof y Gomes, 2019).

Manejo de Datos

Las variables fueron descritas con los estadísticos básicos de tendencia central y dispersión. El rendimiento del modelo se evaluó mediante el índice AUC (Area Under the Curve) de la curva ROC (Receiver Operating Characteristic). El AUC proporciona una medida integral del rendimiento del modelo que es independiente del umbral de corte seleccionado. Además, la evaluación se complementó con el cálculo de ROC_{parcial} y tasa de omisión (E=5%). Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) de las variables bioclimáticas para evaluar sus aportes a la variabilidad global de los datos y como método de reducción de dimensiones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de distribución potencial de *Phytophthora* spp., desarrollado mediante el algoritmo MaxEnt mostró un rendimiento excepcional. El valor del AUC obtenido fue de 0.958 para los datos de calibración del modelo y 0.955 para los datos de validación. Asimismo, la prueba $ROC_{\text{parcial}} = 1.8 \pm 0.03$ confirmó la precisión predictiva del modelo, que fue significativamente diferente de un modelo aleatorio ($p < 0.00001$). Los valores indican que las variables bioclimáticas seleccionadas capturan adecuadamente los requerimientos ambientales de *Phytophthora* spp.

El análisis de contribución de las variables bioclimáticas reveló que tres variables principales determinan la distribución potencial de *Phytophthora* spp. en Ecuador continental (Figura 3). La temperatura media del trimestre más lluvioso (Bio8) fue la variable que más contribuyó al modelo con un 43.3% del aporte total, lo que

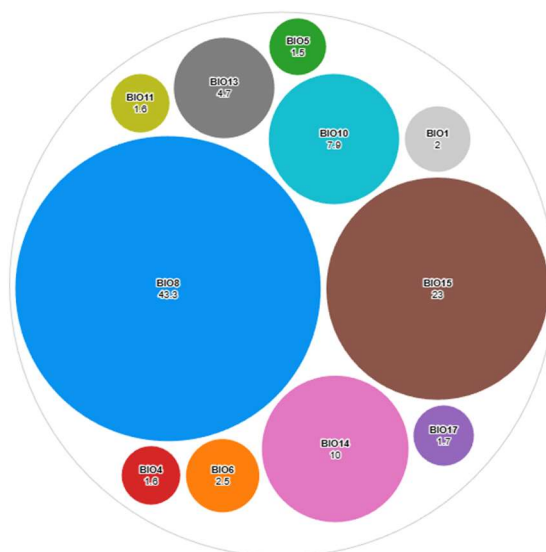


Figura 3. Distribución de aportes de las variables bioclimáticas del Wordclim al modelo de distribución potencial actual de *Phytophthora* spp.

Figure 3. Distribution of contributions of the Wordclim bioclimatic variables to the current potential distribution model of *Phytophthora* spp.

refleja la importancia de las condiciones térmicas durante los períodos de mayor precipitación para el desarrollo del patógeno. La variable es particularmente relevante ya que *Phytophthora* spp., requiere condiciones de humedad elevada combinadas con temperaturas óptimas para su crecimiento y reproducción (PerrineWalker, 2020). A pesar de ello, las variables bioclimáticas trimestrales (p. ej.: Bio8) son útiles, pero pueden presentar discontinuidades espaciales cuando cambia el trimestre "más lluvioso" entre celdas adyacentes, especialmente en zonas ecuatoriales con estacionalidad débil o precipitación bimodal (Booth, 2022). Se recomienda inspección visual y pruebas numéricas previas para detectar artefactos estadísticos, y si se requiere sustituir esta variable por alternativas derivadas coherentes.

La segunda variable en importancia fue la estacionalidad de las precipitaciones (Bio15) con un 23% de contribución, seguida por la precipitación del mes más seco (Bio14) con 10%. En conjunto, las tres variables acumularon el 77% del aporte total al modelo, lo que demuestra que la combinación específica de patrones de temperatura y precipitación es fundamental para determinar las condiciones favorables para el establecimiento y desarrollo de *Phytophthora* spp. La dominancia de variables relacionadas con la precipitación es consistente con la biología del patógeno, que requiere condiciones de alta humedad para la dispersión de zoosporas y el proceso de infección.

Análisis de Componentes Principales de Variables Climáticas

Para corroborar la importancia de las variables de temperatura y precipitación que dominaron el modelo MaxEnt, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) de las variables bioclimáticas (Figura 4). Los resultados confirman que los principales ejes de variación climática en Ecuador están definidos por gradientes térmicos (CP1) y pluviométricos (CP2), validando la estructura del nicho climático identificado por el modelo de distribución. Lo que corroboró la estructura del espacio climático y reveló que los tres primeros componentes explican el 78.59% de la variabilidad total en el espacio climático. El primer componente (38,90% de la varianza) está fuertemente asociado con variables de temperatura, particularmente aquellas relacionadas con los extremos térmicos y la estacionalidad. El segundo componente (22.17% de la varianza) se relaciona principalmente con variables de precipitación, especialmente la estacionalidad y los valores extremos de precipitación mensual.

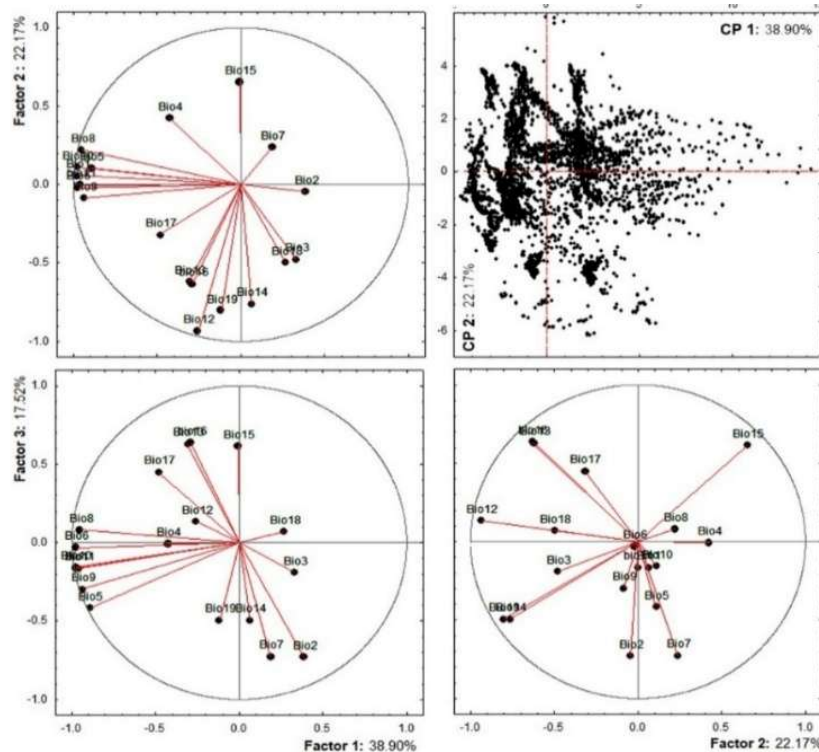


Figura 4. Análisis de componentes principales del aporte de las variables climáticas al espacio ambiental de *Phytophthora* spp., en Ecuador continental.

Figure 4. Principal component analysis of the contribution of climatic variables to the environmental space of *Phytophthora* spp. in continental Ecuador.

La estructura de la variabilidad climática confirma que tanto los patrones térmicos como pluviométricos son determinantes para definir el nicho ecológico de *Phytophthora* spp., validando la importancia de las variables que más contribuyeron al modelo de distribución potencial. Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una base científica sólida para la implementación de estrategias de manejo integrado de *Phytophthora* spp., en las plantaciones cacaoteras de Ecuador, considerando tanto las condiciones actuales como los escenarios futuros de cambio climático.

Distribución Potencial Actual

Para el escenario climático actual, el modelo determinó que *Phytophthora* spp., presenta condiciones climáticas adecuadas para su distribución potencial en un área de 25 165.1 km², mientras que 229 790.2 km² del territorio ecuatoriano continental no presentan condiciones favorables para su desarrollo (Figura 5). La distribución favorable corresponde al 9.87% del área total del país, lo que indica que, aunque la distribución potencial es relativamente limitada en términos porcentuales, abarca una extensión considerable en términos absolutos.

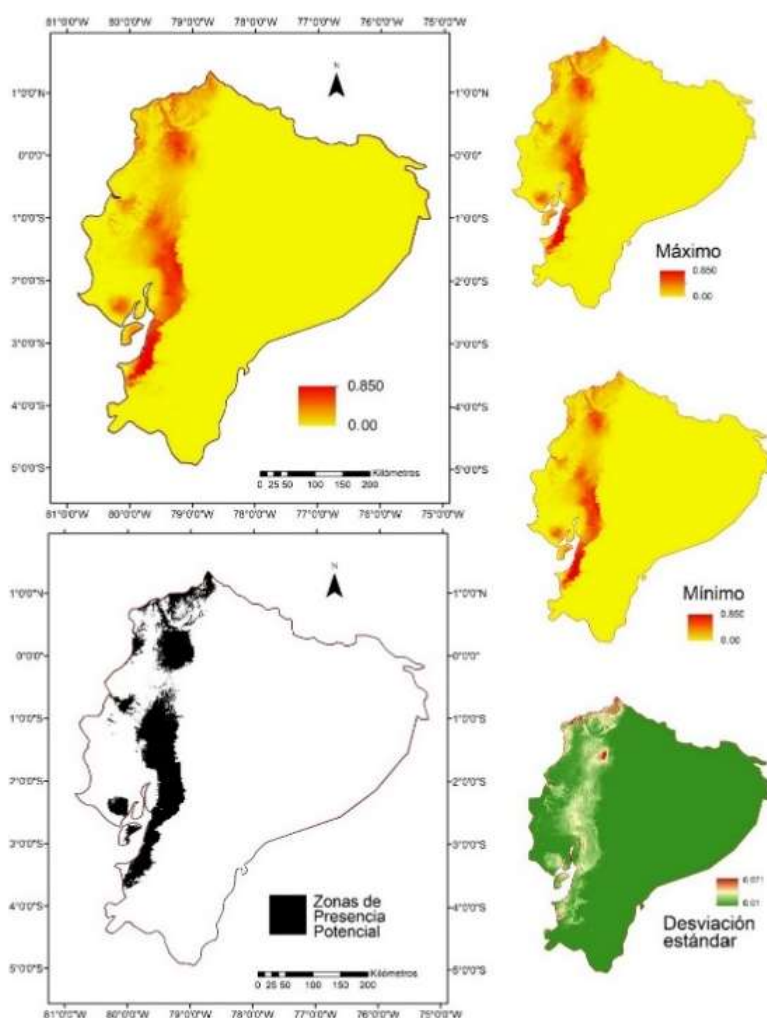


Figura 5. Mapas resultantes de la modelación del área de distribución potencial con Maxent de *Phytophthora* spp., en el escenario actual de Ecuador continental. Se muestran la idoneidad media, sus límites, variabilidad y el mapa binarizado con umbral de corte de máxima sensibilidad más especificidad.

Figure 5. Maps resulting from the modeling of the potential distribution area with Maxent of *Phytophthora* spp. in the current scenario of continental Ecuador. The mean suitability, its limits, variability and the binarized map with cut-off threshold of maximum sensitivity plus specificity are shown.

El mapa de idoneidad continua muestra un gradiente de aptitud del hábitat, donde las áreas con mayor probabilidad de presencia se concentran predominantemente en las regiones de mayor humedad relativa y temperatura moderada. La distribución sugiere una marcada preferencia por ambientes con condiciones microclimáticas específicas, probablemente asociadas a zonas de transición altitudinal.

El mapa binario revela que la distribución actual se encuentra en varios lugares altamente fragmentada en fragmentos discretos, lo que refleja la naturaleza diversa de las condiciones microclimáticas del país y una alta especificidad de nicho ecológico. Los límites de la distribución potencial evidencian restricciones biogeográficas claras, con patrones que sugieren una fuerte dependencia de variables bioclimáticas específicas, particularmente aquellas relacionadas con la disponibilidad hídrica y regímenes térmicos. Es importante destacar que el área actual de cultivo de cacao en Ecuador continental es de aproximadamente 3931 km², lo que representa una fracción significativa del área con condiciones climáticas favorables para *Phytophthora* spp. La relación espacial sugiere una alta vulnerabilidad potencial de las plantaciones cacaoteras ante la presencia del patógeno.

Estudios recientes indican que *P. palmivora* prospera en condiciones climáticas húmedas y cálidas; por ejemplo, climas con lluvias anuales superiores a 2200–2500 mm se asocian con incidencias de enfermedad muy elevadas (hasta 65–70% de mazorcas dañadas) (Kongor, Owusu y Oduro, 2024). La alta humedad relativa y temperaturas moderadas (<20–32 °C) favorecen la esporulación e infección de *Phytophthora* spp. (Tinoco-Jaramillo *et al.*, 2024; Moura *et al.*, 2025). El perfil coincide con la climatología típica de las regiones cacaoteras de Ecuador, sugiriendo ya de por sí un escenario de alta "favorabilidad" del clima para los hongos, causantes de enfermedades en las plantas. Según Palomino-Lemus, Córdoba, Gámiz, Castro y Esteban (2018), la interacción entre las variables crea un entorno favorable para la expansión del patógeno en muchas de las regiones cacaoteras del país, especialmente aquellas expuestas a lluvias intensas y temperaturas estables a lo largo del año. Tanto para *Moniliophthora* (moniliasis/escoba) como para *Phytophthora*, la coocurrencia de lluvia/agua libre y temperaturas cálidas determina la mayor idoneidad y el riesgo epidémico en el Litoral. Los modelos para los hongos *M. roleri* y *M. perniciosa* desarrollados previamente (Ferrer-Sánchez *et al.*, 2022; Plasencia-Vázquez, Vilchez, Ferrer y Veloz, 2022), ubican sus áreas favorables en Costa y tierras bajas húmedas, lo que coincide con la importancia de variables trimestrales de la estación lluviosa (p. ej.: BIO8/BIO16) empleadas en este estudio.

Variabilidad Provincial en la Favorabilidad Climática

El análisis de la distribución de registros de presencia y la idoneidad climática por provincias reveló patrones heterogéneos a lo largo del territorio ecuatoriano (Cuadro 1). Las provincias con mayor número de registros fueron Cotopaxi (455 registros), Sucumbíos (339) y El Oro (309), lo que refleja tanto la intensidad de muestreo como la presencia efectiva del patógeno en estas regiones. El análisis de la distribución espacial de los registros por provincias reveló una cobertura heterogénea pero representativa del territorio nacional, lo que refleja tanto la intensidad de investigación fitosanitaria en las regiones como la presencia efectiva del patógeno en diversos ecosistemas y sistemas productivos (Figura 1).

En términos de favorabilidad climática normalizada, El Oro presentó los valores más altos (0.83), seguido por Guayas (0.72) y Los Ríos (0.61). Las provincias, ubicadas principalmente en la región Costa, muestran las condiciones más favorables para el desarrollo de *Phytophthora* spp., lo que es consistente con las características climáticas de esta región caracterizada por temperaturas cálidas y regímenes de precipitación que favorecen el desarrollo del patógeno ya que para los patógenos del género *Phytophthora*, la coocurrencia de lluvia/agua libre y temperaturas cálidas (~20–30 °C) es determinante para la producción de esporangios, liberación de zoosporas y establecimiento de infecciones. Esto ha sido documentado para *P. palmivora* en cacao y otros hospedadores, y para *P. capsici* en cultivos hortícolas (Granke y Hausbeck, 2010; Miyake y Nagai, 2018; PerrineWalker, 2020).

En contraste, las provincias amazónicas como Morona Santiago (0.0001), Pastaza (0.0003) y Orellana (0.0010) presentaron valores de favorabilidad climática muy bajos, a pesar de las condiciones de alta humedad características de la región. Lo que sugiere que otros factores climáticos, posiblemente relacionados con los patrones específicos de temperatura y estacionalidad de precipitaciones, limitan la idoneidad de estas áreas para *Phytophthora* spp.

Obiakara, Etaware y Chukwuka (2020) emplearon MaxEnt para estimar la distribución global de *Phytophthora megakarya* y encontraron que extensas zonas tropicales son ambientalmente adecuadas para su establecimiento. Esta es solo como referencia bibliográfica de nicho similar. De forma semejante, Ferrer-Sánchez *et al.* (2022), modelaron *Moniliophthora perniciosa* en Ecuador, reportando que el patógeno comparte el 74% de la superficie cacaotera con áreas de distribución favorable. De acuerdo con Alvarez-Romero *et al.* (2025), la biodiversidad de los patógenos en el cacao se ve influenciada por las características microclimáticas. Por tal motivo, la distribución de *Phytophthora* spp. en Ecuador con una alta preferencia por zonas costeras, refleja la influencia directa de los gradientes térmicos y de humedad en la dispersión de la enfermedad. Los resultados son similares con los hallazgos de Ceccarelli *et al.* (2021), quienes observaron que las variables de temperatura y precipitación son las principales determinantes para el éxito de *Phytophthora* spp., en áreas productivas de cacao en Perú.

Cuadro 1. Diferencias en la favorabilidad climática media (F.C.) para *Phytophthora* spp., por provincias de Ecuador.
Table 1. Differences in mean climatic favorability (C.F.) for *Phytophthora* spp. by provinces of Ecuador.

Provincia	N	F.C. normalizada	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
El Oro	309	0.8298	0.0110	0.8073	0.0062
Guayas	169	0.7245	0.0116	0.7594	0.1446
Los Ríos	86	0.6114	0.0130	0.6825	0.0783
Esmeraldas	68	0.4607	0.0221	0.5865	0.0467
Cañar	4	0.4332	0.0117	0.5235	0.2374
Pichincha	14	0.4155	0.0213	0.6280	0.0311
Bolívar	50	0.2176	0.0068	0.4116	0.0009
Cotopaxi	455	0.1776	0.0104	0.2886	0.0025
Chimborazo	10	0.1747	0.0082	0.2635	0.0537
Manabí	3	0.1726	0.0126	0.1648	0.1090
Sucumbíos	339	0.0023	0.0002	0.2910	0.0000
Zamora Chinchipe	136	0.0013	0.0002	0.0061	0.0000
Orellana	22	0.0010	0.0001	0.0014	0.0002
Napo	8	0.0008	0.0002	0.0019	0.0001
Loja	10	0.0006	0.0002	0.0028	0.0000
Pastaza	19	0.0003	0.0001	0.0007	0.0000
Morona Santiago	8	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000

Los hallazgos concuerdan que los patrones climáticos dominantes en las zonas de producción de cacao en Ecuador son propicios para hongos fitopatógenos.

Proyecciones Bajo Escenarios de Cambio Climático

Las proyecciones climáticas bajo el escenario de emisiones moderadas (SSP2-4,5) indican una expansión considerable del área con condiciones favorables para *Phytophthora* spp. Para el período 2041-2060, se proyecta un incremento del área potencial de 43 787 km², lo que representa un aumento significativo respecto a las condiciones actuales (Cuadro 2; Figura 6). Bajo este escenario, se observa una extensión del área de distribución potencial, con desplazamientos altitudinales hacia zonas de mayor elevación. La migración vertical refleja la búsqueda de condiciones térmicas óptimas ante el incremento de temperatura proyectado. La expansión se intensifica hacia el período 2081-2100, donde el incremento proyectado alcanza los 61 319 km².

El escenario de altas emisiones presenta proyecciones aún más preocupantes para el manejo fitosanitario del cacao en Ecuador (Figura 7). Para el período 2041-2060, se proyecta un crecimiento del área favorable de 55 161 km², representando un incremento del 21% superior al escenario moderado para el mismo período. La tendencia se acentúa dramáticamente hacia el período 2081-2100, donde el área con condiciones adecuadas podría expandirse en 72 439 km², alcanzando los mayores valores proyectados en todos los escenarios analizados.

Las proyecciones a largo plazo (2081-2100) bajo las mismas trayectorias socioeconómicas extremas intensifican las tendencias observadas en el período intermedio (Figura 7), revelando transformaciones más pronunciadas en la distribución espacial del patógeno. Para el final del siglo XXI, ambos escenarios proyectan una reorganización sustancial de la distribución potencial de *Phytophthora* spp., con implicaciones significativas para la gestión fitosanitaria del país. El escenario más pesimista sugiere también una fragmentación considerable de las áreas de distribución continua, resultando en un mosaico de hábitats adecuados distribuidos de manera heterogénea a lo largo del territorio nacional.

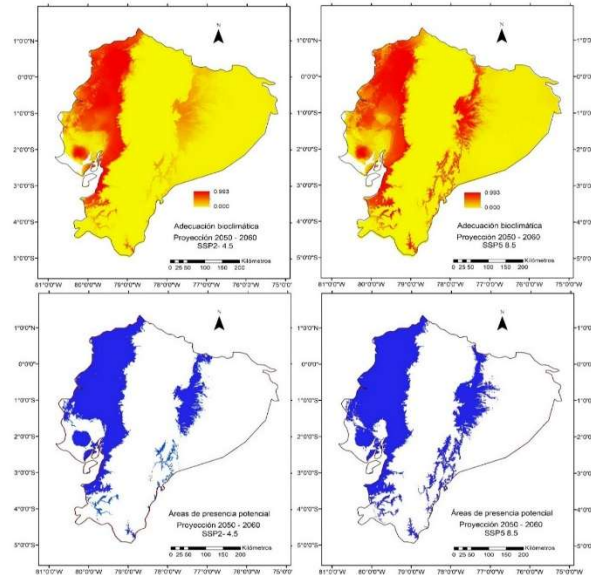


Figura 6. Mapas de favorabilidad bioclimática de los hábitats para *Phytophthora* spp., Se proyectan los cambios climáticos para el periodo 2041-2060 bajo dos trayectorias socioeconómicas. Se muestran los mapas continuos y binarizados (área de distribución potencial) con un umbral de corte de máxima sensibilidad más especificidad.

Figure 6. Bioclimatic favorability maps of *Phytophthora* spp. habitats, projected climate changes for the period 2041-2060 under two socioeconomic trajectories. Continuous and binarized maps (potential distribution area) are shown with a cut-off threshold of maximum sensitivity plus specificity.

El escenario más severo muestra, en general, un aumento explosivo del hábitat adecuado, con reducción de la fragmentación y aumento de la conectividad entre poblaciones potenciales. Los mapas revelan un desplazamiento hacia elevaciones superiores, donde las condiciones térmicas e hídricas se mantienen dentro de los rangos de tolerancia de las especies. Sin embargo, el desplazamiento altitudinal está limitado por la disponibilidad de hábitat en las zonas más altas. Las áreas de alta idoneidad se extienden hacia refugios climáticos específicos, principalmente en zonas montañosas y de mayor estabilidad microclimática.

La comparación entre escenarios revela que las emisiones más altas de gases de efecto invernadero exacerbaban significativamente la expansión potencial de *Phytophthora* spp., creando condiciones climáticas cada vez más favorables para el patógeno en extensas áreas del territorio ecuatoriano. Los resultados sugieren que las especies de este género experimentarán un desplazamiento altitudinal ascendente en respuesta al cambio climático, siguiendo el patrón típico de muchas especies en regiones montañosas tropicales como variedades de maíz en Los Andes (Skarbø y VanderMolen, 2016). La migración altitudinal estaría mediada por el seguimiento de isoterma óptimas y el mantenimiento de condiciones de humedad adecuadas para la supervivencia y reproducción del patógeno.

Los resultados sugieren que, bajo un escenario de cambio climático moderado, las condiciones térmicas y de precipitación se modificarán de manera favorable para la expansión geográfica de *Phytophthora* spp., incrementando potencialmente el riesgo de afectación a las plantaciones de cacao en nuevas áreas geográficas. La evidencia sugiere que la favorabilidad climática para *Phytophthora* spp., en Ecuador depende de parámetros clave (precipitación, temperatura, humedad) que actualmente ya son casi óptimos y que variarán con el cambio climático. Plasencia-Vázquez *et al.* (2022) mostraron que bajo el SSP 8.5 (extremo) al 2070, *Moniliophthora perniciosa* podría expandir hasta 10 392 km² adicionales en Ecuador. Las tendencias empíricas coinciden con la idea de que el cambio global redistribuirá los hábitats idóneos para patógenos de cacao generando una gran proliferación de enfermedades que perjudican el rendimiento del cultivo.

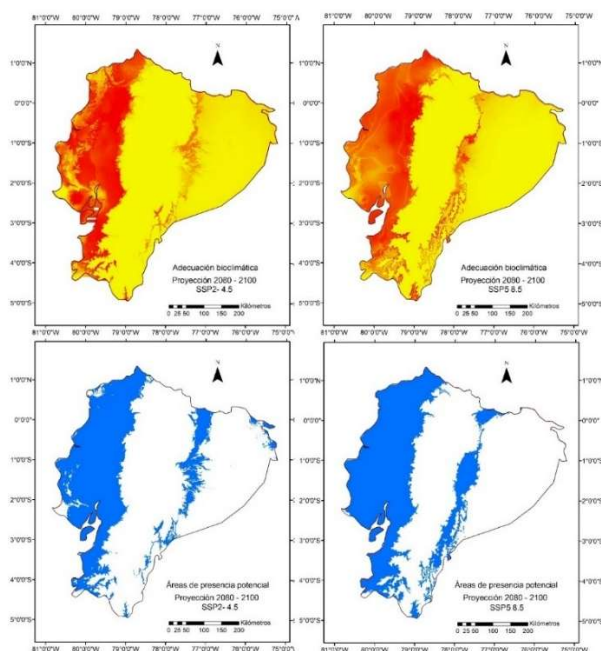


Figura 7. Mapas de favorabilidad bioclimática de los hábitats para *Phytophthora* spp. Se proyectan los cambios climáticos para el periodo 2081-2100 bajo dos trayectorias socioeconómicas extremas. Se muestran los mapas continuos y binarizados (área de distribución potencial) con un umbral de corte de máxima sensibilidad más especificidad.

Figure 7. Bioclimatic habitat favorability maps for *Phytophthora* spp. habitats. Climate changes are projected for the period 2081-2100 under two socioeconomic trajectories. Continuous and binarized maps (potential range) are shown with a cut-off threshold of maximum sensitivity plus specificity.

Análisis de cambios en la Distribución

El análisis detallado de los cambios en la distribución potencial (Figura 8; Cuadro 2) revela patrones consistentes de expansión del rango geográfico de *Phytophthora* spp., bajo todos los escenarios de cambio climático evaluados. Los rangos de ampliación superan consistentemente los rangos de contracción en todos los casos, siendo particularmente notorio que en el escenario SSP5-8,5 para el período 2081-2100 no se proyecta contracción alguna del área de distribución. Los rangos de estabilidad, que representan las áreas que mantendrán condiciones favorables tanto en el presente como en el futuro, muestran valores consistentes entre 21 176 y 25 101 km² dependiendo del escenario, lo que sugiere que las áreas actualmente favorables para el patógeno continuarán siéndolo bajo las condiciones climáticas futuras (Figura 8).

A mediano plazo, en el escenario de cambio con menor impacto negativo se espera un incremento del 261% en el área de extensión potencial del patógeno (Cuadro 2), el cual asciende a 307% si se cumplieran las predicciones de la trayectoria más desfavorable. A largo plazo, para finales de siglo, incluso el escenario de cambios más favorable puede implicar un aumento del 356% en esta área y hasta del 400% en el peor escenario.

Los cambios en las áreas responden a marcados cambios en las distribuciones de los índices de favorabilidad climática en relación con la situación actual, como se muestra en el Cuadro 3 y Figura 9. Los índices de favorabilidad climática muestran un incremento marcado en todos los escenarios, siendo máximos en la trayectoria SSP2 4,5 a mediano plazo (0.621 ± 0.378). En los escenarios de cambios más drásticos los índices medios aumentan, pero su variabilidad disminuye (se hacen más altos y constantes).

Como se observa en la distribución de los puntos en la Figura 9, la distribución pasa de ser regular en la actualidad (con una distribución relativamente gradual de las adecuaciones climáticas en la actualidad) a convertirse en distribuciones marcadamente bimodales. Tuvo dos zonas de concentración marcada, una en los valores más bajos que representan las zonas elevadas de la sierra, donde las condiciones siguen siendo inadecuadas para las especies del género. La otra tuvo los valores máximos del índice, denotando que muchas áreas de condiciones medianamente adecuadas se convierten en muy adecuadas para el desarrollo de estas especies.

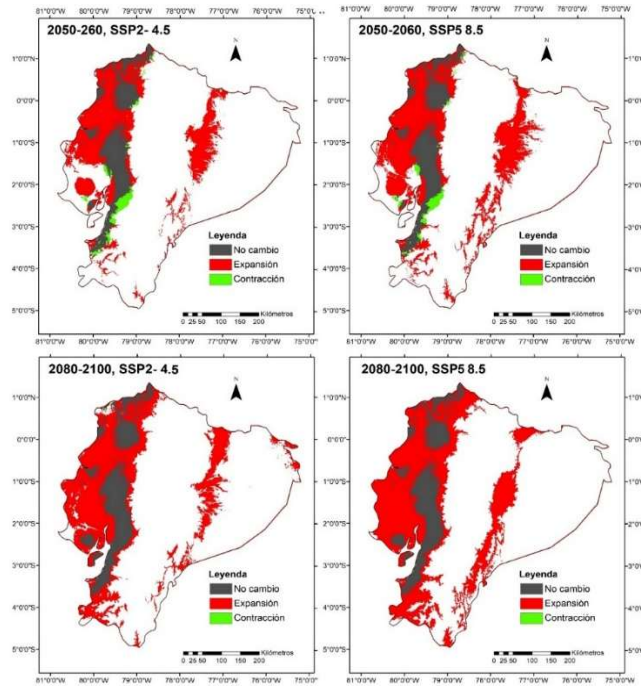


Figura 8. Mapas de cambio en las extensiones de áreas de distribución potencial de *Phytophthora* spp. Se proyectan los cambios climáticos para el periodo 2041-2060 bajo dos trayectorias socioeconómicas extremas.

Figure 8. Maps of change in the extent of potential distribution areas of *Phytophthora* spp. Climate changes are projected for the period 2041-2060 under two extreme socioeconomic trajectories.

Superposición entre Plantaciones de Cacao y Distribución de *Phytophthora* spp.

El análisis de superposición entre los mapas binarios de distribución potencial de *Phytophthora* spp. y las áreas de cultivo de cacao reveló una coincidencia espacial considerable (Figura 10). Se identificaron 2 256.9 km² de zonas cacaoteras ubicadas dentro del área de distribución potencial del patógeno, lo que representa el 57% del área total de cultivo de cacao en Ecuador continental. Existen 1 674.5 km² de cultivos, que, en el momento actual, no contienen las condiciones climáticas adecuadas para estas especies y pueden considerarse con cierto nivel de seguridad. Los cultivos de la zona amazónica en su gran mayoría están en esta categoría.

Cuadro 2. Extensión de áreas (km²) de cambios en la distribución potencial de *Phytophthora* spp., en distintos escenarios de cambio climático a medio y largo plazo.

Table 2. Extent of areas (km²) of changes in the potential distribution of *Phytophthora* spp. under different medium- and long-term climate change scenarios.

Descripción	2041-2060		2081-2100	
	Escenario SSP2 4,5	Escenario SSP5 8,5	Escenario SSP2 4,5	Escenario SSP5 8,5
Área de presencia potencial	65 816	77 302	89 561	100 560
Rango de ampliación del área	43 787	55 161	61 319	72 439
Porcentaje de incremento respecto a la actualidad	261%	307%	355%	400%
Rango de estabilidad	2 1176	21 638	25 079	25 101
Sin presencia	175 726	165 166	160 746	149 644
Rango de contracción del área	3093	2641	29	0

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de la favorabilidad climática media para *Phytophthora spp.*, en Ecuador, en la actualidad y en dos escenarios de cambio climático a mediano y largo plazo.

Table 3. Descriptive statistics of mean climatic favorability for *Phytophthora spp.* in Ecuador, at present and in two scenarios of climate change in the medium and long term.

Escenario	N	Media	Desv.Est.	Mediana	Máximo	Coef.Var.
ACTUAL	2153	0.237	0.276	0.138	0.8	116.4
2040_SSP4,5	1835	0.56	0.411	0.829	0.986	73.5
2040_SSP8,5	1835	0.621	0.378	0.845	0.988	60.9
2080_SSP4,5	2157	0.558	0.39	0.81	0.994	70
2080_SSP8,5	2157	0.433	0.278	0.564	0.8	64.2

La alta proporción de superposición refleja las similitudes en los requerimientos bioclimáticos entre el patógeno y las condiciones óptimas para el cultivo de cacao, particularmente en lo que respecta a temperatura y humedad.

La distribución geográfica potencial de *Phytophthora spp.*, establece un escenario de alta vulnerabilidad para este cultivo de importancia económica nacional. El alto solapamiento entre las zonas de cacao y el área de distribución potencial del patógeno indica que más de la mitad de la superficie cacaotera nacional se encuentra en riesgo potencial de afectación por mazorca negra y otras enfermedades causadas por este hongo. Las áreas de cultivo de cacao que actualmente no coinciden con la distribución potencial del patógeno (43% restante) representan zonas de menor riesgo inmediato, pero que podrían volverse vulnerables bajo los escenarios de cambio climático proyectados, según el análisis, dada la expansión esperada del rango de distribución de *Phytophthora spp.*

Cárdenas *et al.* (2023) hallaron que los escenarios de cambio climático aumentan la extensión de hábitats adecuados para fitopatógenos en el Amazonas peruano, en particular bajo trayectorias de emisiones elevadas. Resultados similares de la presente investigación en Ecuador refuerzan la idea de que el cambio climático incrementa la coincidencia entre zonas de cultivo y condiciones óptimas para patógenos como *Phytophthora spp.*, generando escenarios de mayor riesgo sanitario.

La coincidencia espacial entre cultivos económicamente importantes y áreas favorables para fitopatógenos es un factor determinante en la planificación de estrategias de manejo ya que el cambio climático impulsa desplazamientos altitudinales y expansión en zonas actualmente seguras. En el caso de cultivos como el cacao, el comportamiento indica que regiones hoy libres de enfermedades se volverán vulnerables en un futuro cercano, especialmente bajo escenarios de emisiones extremas.

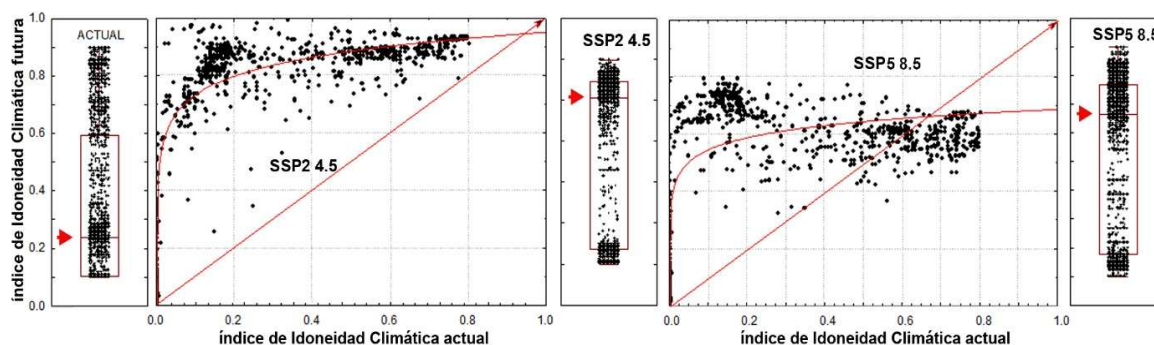


Figura 9. Distribución de los cambios en los índices de favorabilidad climática para *Phytophthora spp.* en Ecuador. En sus áreas de distribución potencial, entre el escenario actual y los proyectados según los cambios climáticos predichos para el periodo 2041-2060 y 2081-2100 bajo dos trayectorias socioeconómicas (SSP2 4,5 y SSP5 8,5).

Figure 9. Distribution of changes in climate favorability indices for *Phytophthora spp.* in Ecuador. In its areas of potential distribution, between the current scenario and those projected according to the climate changes predicted for the period 2041-2060 and 2081-2100 under two socioeconomic trajectories (SSP2 4.5 and SSP5 8.5).

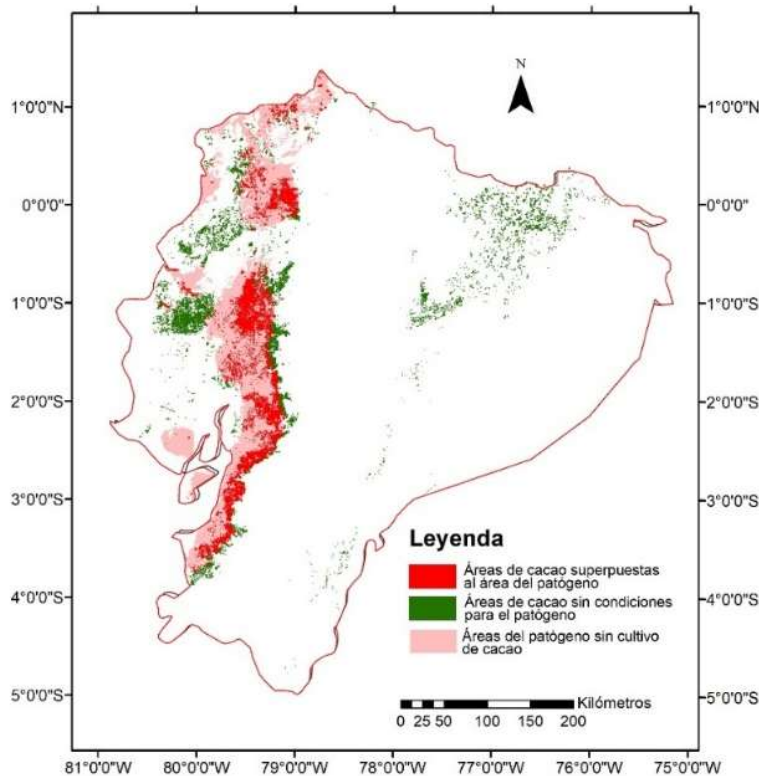


Figura 10. Áreas de coincidencia entre las plantaciones de cacao y las áreas de distribución potencial de *Phytophthora* spp., en Ecuador continental.
Figure 10. Areas of coincidence between cocoa plantations and areas of potential distribution of *Phytophthora* spp. in continental Ecuador.

Estrategias de Prevención para la Proliferación de *Phytophthora* spp.

Como resultado del análisis de superposición espacial entre las zonas de cultivo de cacao y la distribución potencial de *Phytophthora* spp., se identificaron áreas con distintos niveles de riesgo fitosanitario. La información permitió proponer un conjunto de estrategias diferenciadas (Cuadro 4), enfocadas en prevenir y reducir la proliferación del patógeno en función de las condiciones climáticas actuales y proyectadas. El Cuadro 4 resume las principales acciones recomendadas para cada categoría de riesgo, considerando enfoques prácticos como el manejo agronómico, el control biológico, la capacitación de productores y la vinculación con centros de investigación. Las estrategias están orientadas a fortalecer la resiliencia del sistema productivo cacaotero en Ecuador ante escenarios de vulnerabilidad creciente.

El diseño de estrategias preventivas contra *Phytophthora* spp., en el cultivo de cacao debe contemplar principios de sostenibilidad, resiliencia climática y participación comunitaria. Según Somarriba *et al.* (2021), los sistemas agroforestales diversificados pueden reducir la incidencia de enfermedades al modificar las condiciones microclimáticas desfavorables para el patógeno. De igual manera, Konaté, Ouattara, Kouakou y Barima (2024) destacan que el manejo agroecológico no solo mejora la resistencia a enfermedades, sino también incrementa la fertilidad del suelo y promueve la biodiversidad. Siendo así que, las estrategias agroforestales deben adaptarse a contextos locales para optimizar la salud de los cultivos sin comprometer los rendimientos.

Frente a las amenazas crecientes, Kongor *et al.* (2024), optan por una intensificación sostenible que incluya variedades resistentes, sistemas agroforestales y planes de manejo integrado para enfrentar plagas y enfermedades bajo cambio climático. Por otro lado, Anzules-Toala *et al.* (2022) mostraron que la aplicación conjunta de fungicidas (químicos y biológicos) con labores culturales redujo significativamente la incidencia tanto de *Phytophthora* spp., como de *Moniliophthora*. Las estrategias presentadas se alinean, integrando variedades resistentes dentro de un sistema agroforestal, a la vez que se promueve el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIP) mediante la combinación de control biológico y prácticas culturales.

Cuadro 4. Estrategias de prevención para la proliferación de *Phytophthora* spp. en zonas cacaoteras de Ecuador.
Table 4. Prevention strategies for the proliferation of *Phytophthora* spp. in cocoa-growing areas of Ecuador.

Zona de riesgo	Características	Estrategias recomendadas	Enfoque
Alta coincidencia (Riesgo inmediato) 2 256 9 km ² (57%)	Mayor presencia en la región Costa. Coincidencia actual entre condiciones del cacao y del patógeno. Alta humedad y temperatura. Refleja alta similitud en requerimientos bioclimáticos, lo que favorece el desarrollo tanto del cultivo como del patógeno.	Poda sanitaria frecuente y eliminación de frutos infectados. Aplicación de fungicidas biológicos como <i>Trichoderma</i> spp., y <i>Bacillus subtilis</i> . Manejo del sombreado y mejora del drenaje para reducir la humedad excesiva. Promoción del control cultural mediante la recolección y destrucción de residuos enfermos.	Prácticas agronómicas y control biológico.
Baja coincidencia actual (Riesgo bajo, estable) 1 674 5 km ² (43%)	Principalmente en la región Amazónica. Condiciones climáticas aún no favorables para el patógeno. Zonas con cierto nivel de seguridad fitosanitaria actual, aunque susceptibles a cambios futuros.	Establecimiento de buenas prácticas agrícolas desde etapas tempranas. Implementación de vigilancia fitosanitaria comunitaria. Conservación de germoplasma local de variedades tolerantes.	Prevención, monitoreo y educación.
Zonas vulnerables futuras (Riesgo emergente por cambio climático) Superficie por definir (expansión proyectada)	Zonas que podrían volverse aptas para el patógeno por aumento de temperatura o humedad. Las áreas requieren monitoreo constante y preparación para futuros escenarios de cambio climático.	Instalación de estaciones climáticas locales para monitoreo. Formación de promotores comunitarios para la detección temprana. Vinculación con centros de investigación para evaluar variedades resistentes. Creación de parcelas demostrativas y programas de extensión agrícola.	Investigación, vigilancia y educación.

El control biológico ha demostrado ser una herramienta eficaz y sostenible en la prevención de enfermedades del cacao. Por esta razón, Mbarga *et al.* (2014) en su investigación evaluaron una formulación oleosa de *Trichoderma asperellum* aplicada en plantaciones de Camerún y reportaron reducciones de hasta un 47% en incidencia de podredumbre parda causada por *Phytophthora megakarya*. Los datos concuerdan con Bowers, Bailey, Hebbar, Sanogo y Lumsden (2018), quienes demostraron que la eficacia del control biológico se ve aún más reforzada cuando se combina con prácticas culturales como poda sanitaria y manejo de sombra. Las diversas estrategias aplicadas en el estudio son validadas en contextos internacionales, ajustadas a las condiciones particulares de cada región, a fin de optimizar los resultados en la lucha contra las enfermedades.

La remoción de frutos infectados es una práctica cultural básica con efectividad probada, ya que según Polanco, Alferes, Fuquene, Amaya y Polanco (2020), la erradicación semanal de mazorcas enfermas constituyó la base del manejo de *Phytophthora* spp., en cacao susceptible (clon CCN51). Por otra parte, Jibat y Alo (2023), encontraron en Etiopía que la combinación de cobre oxiclórico con prácticas culturales resultó en el mayor control de la pudrición parda, reduciendo la enfermedad significativamente. Las estrategias que se presentan en la investigación son efectivas y de fácil accesibilidad para que los productores puedan aplicar en sus cultivos.

Las estrategias deben equilibrar beneficios productivos y ambientales. Tinoco-Jaramillo *et al.* (2024), señalan que la sombra moderada aporta humedad y refugio para biocontroladores, pero puede también crear microclimas favorables para *Phytophthora* spp. Así, las estrategias deben combinar variedades tolerantes, prácticas culturales, monitoreo comunitario y asistencia técnica vinculada a centros de investigación.

A nivel comparativo, los estudios presentados reflejan un patrón común en el manejo de enfermedades del cacao, que se basa en la integración de múltiples estrategias: el uso de variedades resistentes, el control biológico, la aplicación de fungicidas, y las prácticas culturales. En la presente investigación se buscó fusionar los enfoques con un énfasis especial en la sostenibilidad y la adaptabilidad local, considerando las particularidades

del contexto ecuatoriano. A diferencia de enfoques más segmentados que abogan por el uso exclusivo de un solo método, las estrategias planteadas se fundamentan en la interrelación de los elementos, creando un sistema sinérgico que no solo reduce la incidencia de las enfermedades, sino que también mejora la productividad y la calidad del cacao a largo plazo.

CONCLUSIONES

El análisis de distribución confirmó que las zonas cacaoteras de la región Costa y parte de la Amazonía presentan condiciones climáticas altamente favorables para la persistencia y proliferación de *Phytophthora* spp., evidenciando un incremento significativo entre el cultivo y el patógeno en más del 50% del territorio analizado. El hallazgo implica que la presión fitosanitaria ya es estructural en la actualidad y debe abordarse desde un enfoque territorial preventivo.

Los escenarios climáticos bajo las trayectorias SSP2-4,5 y SSP5-8,5 proyectan una expansión significativa de las áreas con condiciones favorables para *Phytophthora* spp., especialmente las provincias El Oro, Guayas y Los Ríos, actuando como un potenciador de riesgo fitosanitario para el cultivo de cacao. Lo que significa que, áreas actualmente marginales o libres de afectación fitosanitaria podrían convertirse en zonas de riesgo medio a alto en las próximas décadas. En este sentido, el cambio climático actúa como un amplificador del riesgo fitopatológico, reconfigurando la distribución espacial del peligro agroclimático para Ecuador continental.

El análisis espacial evidenció que más del 50% de las zonas cacaoteras coinciden con áreas favorables para *Phytophthora* spp., situación que podría agravarse con el cambio climático. Lo que confirma la necesidad de establecer estrategias de manejo diferenciadas según el nivel de riesgo, basadas en prácticas agroecológicas, con énfasis en prácticas culturales combinadas con control biológico y monitoreo constante, con el fin de reducir el riesgo fitosanitario.

El presente estudio se fortaleció al integrar modelos de nicho ecológico con escenarios climáticos futuros, permitiendo proyectar con precisión la distribución potencial de *Phytophthora* spp., y su coincidencia con zonas cacaoteras. Se confirmó que el cambio climático incrementa la favorabilidad climática para *Phytophthora* spp., especialmente en nuevas zonas de altitud media y alta, cumpliéndose también las predicciones planteadas sobre la expansión del riesgo hacia áreas actualmente menos afectadas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

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

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 9na Convocatoria, a través del proyecto: "Modelación de la distribución potencial del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) bajo diferentes métodos estadísticos y escenarios de cambio climático en Ecuador".

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y.F.S., N.E.P.M. y K.X.M.P.; Metodología: Y.F.S., N.E.P.M. y K.X.M.P.; Software: Y.F.S.; Validación: N.E.P.M. y K.X.M.P.; Análisis formal: Y.F.S., N.E.P.M. y K.X.M.P.; Investigación: N.E.P.M.; Recursos: Y.F.S.; Curación de datos: N.E.P.M. y K.X.M.P.; Escritura - preparación del borrador original: Y.F.S., N.E.P.M. y K.X.M.P.; Escritura - revisión y edición: N.E.P.M. y K.X.M.P.; Visualización: N.E.P.M. y K.X.M.P.; Supervisión: Y.F.S.; Administración del proyecto: Y.F.S.; Adquisición de fondos: Y.F.S.

AGRADECIMIENTOS

A la SENESCYT por la beca de posgrado otorgada a N.E.P.M. y K.X.M.P. A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por el apoyo logístico y académico para la realización del estudio. A los revisores anónimos del manuscrito y los editores de la revista por sus sugerencias.

LITERATURA CITADA

- Adejuwon, J. O., Tewogbade, K. E., Oguntoke, O., & Ufoegbune, G. C. (2023). Comparing farmers' perception of climate effect on cocoa yield with climate data in the Humid zone of Nigeria. *Heliyon*, 9(12), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23155>
- Ali, M. M., Bachik, N. A., Muhadi, N. A., Yusof, T. N. T., & Gomes, C. (2019). Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 108, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426>
- Alvarez-Romero, P. I., Román-Robalino, D. A., Salazar-Castañeda, E. P., Suárez-Cedillo, S. E., Hinojosa-Sánchez, L. A., Ferreira, A. F. T. A. F. E., & Gualpa-Calva, M. A. (2025). Diversity and Composition of Endophytic Fungal Communities Associated with Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Fruits in the Northern Ecuadorian Amazon. *International Journal of Plant Biology*, 16(1), 17. <https://doi.org/10.3390/IJPB16010017>
- Anzules-Toala, V., Pazmiño-Bonilla, E., Alvarado-Huamán, L., Borjas-Ventura, R., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2022). Control de enfermedades del cacao (*Theobroma cacao*) en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 1-12. <https://doi.org/10.15517/AM.V33I1.45939>
- Attah, A. I., Asare, K. E., & Bukari, Y. H. (2021). Long-Term preservation of cultures of *Phytophthora* species causing black pod disease on cacao. *Journal of Plant Pathology Research*, 3(1), 24-29. <https://doi.org/10.36959/394/623>
- Bevacqua, D., Vanalli, C., Casagrandi, R., & Gatto, M. (2023). A climate-driven compartmental model for fungal diseases in fruit orchards: The impacts of climate change on a brown rot-peach system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 332, 109293. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.109293>
- Booth, T. H. (2022). Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology*, 47(7), 1506-1514. <https://doi.org/10.1111/aec.13234>
- Bowers, J. H., Bailey, B. A., Hebbbar, P. K., Sanogo, S., & Lumsden, R. D. (2001). The impact of plant diseases on world chocolate production. *Plant Health Progress*, 2(1), 12. <https://doi.org/10.1094/PHP-2001-0709-01-RV>
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - A bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6(1), 8-9.
- Cárdenas, G. P., Bravo, N., Barboza, E., Salazar, W., Ocaña, J., Vázquez, M., ... & Arbizu, C. I. (2023). Current and future distribution of Shihuahuaco (*Dipteryx* spp.) under climate change scenarios in the Central-Eastern Amazon of Peru. *Sustainability*, 15(10), 7789. <https://doi.org/10.3390/su15107789>
- Carril, A. F., Flombaum, P., & Menéndez, C. G. (2023). Datos climáticos y prácticas recomendadas para proyectar cambios en la distribución de especies. *Darwiniana, Nueva Serie*, 11(1), 367-389. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2023.111.1094>
- Ceccarelli, V., Fremout, T., Zavaleta, D., Lastra, S., Imán Correa, S., Arévalo-Gardini, E., ... & Thomas, E. (2021). Climate change impact on cultivated and wild cacao in Peru and the search of climate change tolerant genotypes. *Diversity and Distributions*, 27(8), 1462-1476. <https://doi.org/10.1111/ddi.13294>
- Cilas, C., & Bastide, P. (2020). Challenges to cocoa production in the face of climate change and the spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10(9), 1232. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Esri. (2011). ArcGIS. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. Consultado el 30 de junio de 2025, desde <https://www.esri.com/>
- Ferrer-Sánchez, Y., Mafaldo-Sajami, A. A., Plasencia-Vázquez, A. H., & Urdánigo-Zambrano, J. P. (2022). Risk to cocoa cultivation due to changes in the potential distribution of the phytopathogen *Moniliophthora perniciosa* under climate change scenarios in continental Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>
- Fick, S. E. & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- GeoInnova. (2020). Maxent para modelos de distribución de especies. Consultado el 30 de junio de 2025, desde <https://geoinnova.org/>
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2022). Mapa de cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios (versión editada 2020). Consultado el 30 de junio de 2025, desde <https://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Granke, L. L., & Hausbeck, M. K. (2010). Effects of temperature, concentration, age, and algaecides on *Phytophthora capsici* zoospore infectivity. *Plant Disease*, 94(1), 54-60. <https://doi.org/10.1094/PDIS-94-1-0054>
- Guamán-Villa, M. A., Jaramillo-Aguilar, E. E., & Bernal-Morales, J. F. (2022). Control biológico de la mazorca negra (*Phytophthora palmivora* L.) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 5(3), 149-154.
- Hossain, M. M., Sultana, F., Mostafa, M., Ferdus, H., Rahman, M., Rana, J. A., ... & Al Sabbir, M. A. (2024). Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. *Discover Agriculture*, 2(1), 132. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00144-w>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Resumen para responsables de políticas. En *Cambio climático 2021: Bases físicas (Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación)*. Consultado el 16 de julio de 2025, desde https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf
- Jibat, M., & Alo, S. (2023). Integrated management of black pod (*Phytophthora palmivora*) disease of cocoa through fungicides and cultural practices in Southwestern Ethiopia. *International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources*, 4(3), 43-45. <https://doi.org/10.46676/IJ-FANRES.V4I3.150>
- Konaté, N. G., Ouattara, Y., Kouakou, A. K., & Barima, Y. S. (2024). Effects of Traditional Agroforestry Practices on Cocoa Yields in Côte d'Ivoire. *Sustainability*, 16(22), 9927. <https://doi.org/10.3390/SU16229927>
- Kongor, J. E., Owusu, M., & Oduro-Yeboah, C. (2024). Cocoa production in the 2020s: Challenges and solutions. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5(1), 102. <https://doi.org/10.1186/S43170-024-00310-6>
- Mateus-Rodríguez, J. F., Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2023). Effects of simulated climate change conditions of increased temperature and [CO₂] on the early growth and physiology of the tropical tree crop, *Theobroma cacao* L. *Tree Physiology*, 43(12), 2050-2063. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad116>

- Mbarga, J. B., Begoude, B. A. D., Ambang, Z., Meboma, M., Kuate, J., Ewbank, W., & Ten Hoopen, G. M. (2020). Field testing an oil-based *Trichoderma asperellum* formulation for the biological control of cacao black pod disease, caused by *Phytophthora megakarya*. *Crop Protection*, 132, 105134. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2020.105134>
- Merga, J. (2022). Epidemiology and management strategies of cocoa black pod (*Phytophthora* spp.). *Plant Pathology & Quarantine*, 12(1), 34-39. <https://doi.org/10.5943/ppq/12/1/2>
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... & Wang, R. H. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571-3605. <https://doi.org/10.5194/GMD-13-3571-2020>
- Miyake, N., & Nagai, H. (2018). Effects of temperature, zoospore concentration, infection period, and fruit maturity on *Phytophthora palmivora* infection of figs. *Journal of General Plant Pathology*, 84(5), 330-338. <https://doi.org/10.1007/s10327-018-0796-1>
- Moreira, Á. V. C., Meza, R. F. R., Arcos, J. A. A., León, A. F. M., Pacheco, F. A., & Martínez, H. F. C. (2020). Characterization of *Phytophthora* spp. And application of rhizobacteria with biocontrol potential in black pod disease in *Theobroma cacao* variety CCN-51. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 503-512. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.04.05>
- Moura, V. B., Pantoja, L. P., Cavalcante Filho, E. H., Haber, R. A., Leandro-Silva, V., Costa, D. L. P., ... & Rúa, M. L. (2025). Current bioclimatic suitability and climate change impacts on the risk of cacao moniliasis invasion in Pará. *Ecological Modelling*, 505, 111106. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2025.111106>
- Ndougue, M., Petchayo, S., Techou, Z., Nana, W. G., Nembot, C., Fontem, D., & Ten Hoopen, G. M. (2018). The impact of soil treatments on black pod rot (caused by *Phytophthora megakarya*) of cacao in Cameroon. *Biological Control*, 123, 9-17. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2018.04.016>
- Neira, D. P. (2016). Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2560-2568. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.003>
- Obiakara, M., Etaware, P., & Chukwuka, K. (2020). Maximum entropy niche modelling to estimate the potential distribution of *Phytophthora megakarya* (Brasier & MJ Griffin) in tropical regions. *European Journal of Ecology*, 6(2), 1-18. <https://doi.org/10.17161/EUROJECOL.V6I2.13802>
- Oduro, B., Apenteng, O. O., & Nkansah, H. (2020). Assessing the effect of fungicide treatment on Cocoa black pod disease in Ghana. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 8(2), 374-385. <https://doi.org/10.19139/SOIC-2310-5070-686>
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Diez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2018). High-resolution boreal winter precipitation projections over tropical America from CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 51(5), 1773-1792.
- Perrine-Walker, F. (2020). *Phytophthora palmivora*-Cocoa Interaction. *Journal of Fungi*, 6(3), 167. <https://doi.org/10.3390/jof6030167>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2005.03.026>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: An open source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Plasencia-Vázquez, A. H., Vilchez-Ponce, C. R., Ferrer-Sánchez, Y., & Veloz-Portillo, C. E. (2022). Effect of climate change on the potential distribution of the fungus *Moniliophthora roreri* and the cultivation of cacao (*Theobroma cacao*) in continental Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>
- Polanco, E. R., Alferes, E. B. P., Fuquene, P. A. B., Amaya, J. D. S., & Polanco, L. A. R. (2020). Manejo de la pudrición parda de la mazorca (*Phytophthora palmivora*) en cacao por aplicación conjunta de prácticas culturales y químicas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 16(1), 79-94. <https://doi.org/10.18359/RFCB.4887>
- Ruiz-García, P., Rivas-Monterroso, A., Conde-Álvarez, C., Sánchez-Torres, G., Vargas-Castilleja, R., & Báez-Vázquez, J. P. B. (2022). *Guía de escenarios de cambio climático CMIP6: Tres estudios de caso*. México: UACH- UNAM-BUAP-UAT-ISF-México, A.C. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20064.15369>
- Simamora, A. V., Hahuly, M. V., & Henuk, J. B. (2021). Endophytic fungi as potential biocontrol agents of *Phytophthora palmivora* in the cocoa plant. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(5), 1-9. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220519>
- Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidio, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H., & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21(10), 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Skarabø, K., & VanderMolen, K. (2016). Maize migration: key crop expands to higher altitudes under climate change in the Andes. *Climate and Development*, 8(3), 245-255. <https://doi.org/10.1080/17565529.2015.1034234>
- Somarriba, E., Peguero, F., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., López-Sampson, A., Leandro-Muñoz, M. E., ... & Sinclair, F. L. (2021). Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9>
- Sunny, A., Marmolejo, C., Vidal-López, R., Falconi-Briones, F. A., Cuervo-Robayo, Á. P., & Bolom-Huet, R. (2025). EcoNicheS: Enhancing ecological niche modeling, niche overlap and connectivity analysis using the shiny dashboard and R package. *PeerJ*, 13, e19136. <https://doi.org/10.7717/peerj.19136>
- Tinoco-Jaramillo, L., Vargas-Tierras, Y., Habibi, N., Caicedo, C., Chanaluisa, A., Paredes-Arcos, F., ... & Vásquez-Castillo, W. (2024). Agroforestry systems of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 15(1), 195. <https://doi.org/10.3390/f15010195>