

Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental

Effect of climate change on the potential distribution of the fungus *Moniliophthora roreri* and the cultivation of cacao (*Theobroma cacao*) in continental Ecuador

Alexis Herminio Plasencia-Vázquez¹ , Cruz Ruby Vilchez-Ponce² ,
Yarelys Ferrer-Sánchez²  y Carmen Elena Veloz-Portillo² 

¹ Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigaciones Históricas y Sociales. Avenida Agustín Melgar s/n, col Buenavista. 24039 Campeche, México.

[‡] Autor para correspondencia (ahplasen@uacam.mx)

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería Avenida Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

Editor de Sección: Dr. Fernando Abasolo Pacheco

RESUMEN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es uno de los cultivos agrícolas de mayor importancia en Ecuador; sin embargo, la producción y calidad de las cosechas es afectada por la enfermedad “moniliasis del cacao”, causada por el hongo *Moniliophthora roreri*. Actualmente, este patógeno es considerado la principal limitante de producción de cacao en el país. En este estudio se evaluó el nicho ecológico del cultivo de *T. cacao* y de *M. roreri* para identificar los posibles cambios en las distribuciones geográficas potenciales y en las áreas de coexistencia cultivo-patógeno frente a escenarios de cambio climático. Se recopilaron registros de presencia de *M. roreri* y *T. cacao* de bases de datos nacionales e internacionales. Se seleccionaron variables de temperatura y precipitación de worldclim 1.4 para el presente y futuro, y el algoritmo de máxima entropía MaxEnt para obtener los modelos. Se identificó que las zonas donde se distribuye potencialmente el cacao y el fitopatógeno son la región costa y Amazonía del país en el presente. La transferencia de modelos en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para el año 2050, predijo la expansión de áreas adecuadas para el cacao al sur del país en 16% y 18% respectivamente. Por el contrario, para el fitopatógeno, el modelo predice una disminución del 5% de su distribución en los mismos escenarios en la región amazónica.

Las zonas susceptibles a la invasión del hongo y de coexistencia con el cacao coinciden y se localizan principalmente en la costa y Amazonía Ecuatoriana para el presente y escenarios futuros, representando un riesgo para el cultivo de cacao. Por ello, se sugiere adoptar medidas de alerta temprana para la detección y control de la enfermedad, enfocadas en estas zonas de riesgo para la conservación de la biodiversidad y la seguridad alimentaria en el país.

Palabras clave: agricultura, moniliasis, modelación de nicho ecológico, rutas de concentración representativas.

SUMMARY

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is one of the most important agricultural crops in Ecuador; however, the production and quality of the crops is affected by the disease “cocoa moniliasis”, caused by the fungus *Moniliophthora roreri*. Currently, this pathogen is considered the main limiting factor for cocoa production in the country. In this study, the ecological niche of the cultivation of *T. cacao* and *M. roreri* was evaluated to identify the possible changes in the potential geographic distributions and in the areas of crop-pathogen coexistence in the face of climate change scenarios. For this, records of the presence of *M. roreri* and *T. cacao* were collected from national and international

Cita recomendada:

Plasencia-Vázquez, A. H., Vilchez-Ponce, C. R., Ferrer-Sánchez, Y. y Veloz-Portillo, C. E. (2022). Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-14. e1151. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>

Recibido: 18 de diciembre de 2021. Aceptado: 25 de enero de 2022.

Artículo. Volumen 40, octubre de 2022.

databases. Fifteen bioclimatic variables of worldclim 1.4 for the present and future were selected, and the algorithm of maximum entropy MaxEnt to obtain the models. The areas where cocoa and the phytopathogen are potentially distributed are the coastal and Amazon regions of the country at present. The transfer of models in the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for the year 2050, predicted the expansion of areas suitable for cocoa, especially in the south of the country, by 16% and 18%, respectively. On the contrary, for the phytopathogen, the model predicts a 5% decrease in suitability in the same future scenarios in the Ecuadorian Amazon region. The areas susceptible to the invasion of the fungus and coexistence with cocoa coincide and are located mainly in the Ecuadorian coast and Amazon for the present and future scenarios, representing a risk for cocoa cultivation. For this reason, it is suggested to adopt early warning measures for the detection and control of the disease, focused on these risk areas for the conservation of biodiversity and food security in the country.

Index words: *agriculture, moniliasis, ecological niche modeling, representative concentration pathway.*

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un árbol perennifolio de tamaño mediano (5 a 8 m), aunque puede alcanzar hasta 20 m cuando crece libremente bajo sombra intensa (Ogata, 2007), que se desarrolla en temperaturas óptimas de alrededor de 25.5 °C (Urquart, 1963; Reyes y Capriles de Reyes, 2000). Esta especie se cultiva en zonas cálidas y húmedas en más de 50 países de todo el mundo, de los cuales 23 se ubican en América, y Ecuador constituye uno de ellos (Arvelo *et al.*, 2017). Es una especie nativa de la región neotropical (Ogata, 2007), que ha sido usada ancestralmente, constituyendo un recurso importante dentro de las actividades culturales y económicas a nivel mundial. Es uno de los impulsores económicos mundiales para los países productores como Ecuador, Bolivia, Brasil y Colombia. Además, tiene importancia ecológica, debido a que sus plantaciones forman agroecosistemas que por su estructura y función mantienen una diversidad de especies similar a bosques naturales y superior a la de ecosistemas agrícolas más intervenidos (Ramírez-González, 2008). Las plantaciones de *T. cacao* también contribuyen a

la fijación de CO₂ atmosférico, a la conservación del suelo y el agua, a la polinización y otros servicios ecosistémicos (De Beenhouwer, Aerts y Honnay, 2013; Portalanza *et al.*, 2019).

Ecuador, por su riqueza biológica y ubicación geográfica, es un productor de cacao por excelencia, siendo uno de los principales productos tradicionales de exportación en el país (Arvelo *et al.*, 2017). Según la Organización Internacional del Cacao (ICCO, por sus siglas en inglés), Ecuador es el tercer productor de cacao en el mundo, lo que representa el 7% de la producción mundial (ANECACAO, 2020). Este sector incluye al 5% de la población económicamente activa en Ecuador (PEA) y el 15% de la PEA rural, por lo que constituye una base fundamental de la economía familiar (ANECACAO, 2020).

Sin embargo, la producción y calidad de las cosechas de este cultivo se han visto afectadas por diferentes enfermedades. Entre las más comunes está la moniliasis del cacao, cuyo agente causal es el hongo *Moniliophthora roreri* (Cif y Par). Este patógeno ataca al fruto en cualquier etapa de su desarrollo, penetra la vaina y se desarrolla intracelularmente e invade las células del parénquima cortical, causando la infección de la mazorca (Johnson, Bonilla y Agüero, 2008). Esto produce anomalías de formas geométricas y protuberancias o tumores (Merchán, 1981; Evans, Holmes y Reid, 2003), y provoca pérdidas de hasta el 90% de la producción. Además, de forma indirecta, puede ocasionar pérdida de hábitat de flora y fauna, fragmentación y erosión del suelo (Sánchez, Gamboa y Rincón, 2003). Su ataque es tan severo, que es considerado en Ecuador la principal limitante de producción de cacao por las cuantiosas pérdidas que origina (Sánchez-Mora y Garcés-Fiallos, 2012). En un futuro, la capacidad adaptativa del fitopatógeno y el cambio climático podrían favorecer su distribución y expansión geográfica (Phillips y Wilkinson, 2007), si tomamos en cuenta que la dispersión de esta enfermedad depende, entre otros factores, de las condiciones ambientales, lo que dificulta su control (Ampuero, 1967).

En cultivos perennes como el cacao, adaptar los sistemas agrícolas al cambio climático es particularmente difícil, porque tardan mucho antes de que los agricultores se beneficien plenamente de sus decisiones de manejo (Gunathilaka, Smart y Fleming, 2018; Parker, McElrone, Ostoja y Forrester, 2020). Sin embargo, se ha establecido entre los agricultores

y los científicos la necesidad de formular políticas en los trópicos a medida que el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos comprometen la productividad de los principales cultivos perennes (Altieri y Nicholls, 2017). Una estrategia efectiva en el manejo de enfermedades en plantas es identificar áreas apropiadas para el desarrollo de la especie, donde las condiciones ambientales no sean favorables para el agente patógeno. La modelación de nicho ecológico representa una herramienta poderosa para caracterizar la distribución ambiental y geográfica actual y potencial de las especies, basada en asociaciones entre presencias geográficas conocidas de las especies y la variación ambiental a través de paisajes (Peterson *et al.*, 2011). Por ello, los modelos de nicho ecológico pueden ser muy útiles en la implementación de estrategias para reducir el impacto de diferentes enfermedades sobre las plantaciones agrícolas p. ej.: (Machovina y Feeley, 2013; Carvalho, Rangel y Vale, 2017; Paterson, 2021; Ruheili, Boluwade y Subhi, 2021) y sobre las de cacao.

En este estudio se evaluó el nicho ecológico del cacao *T. cacao* y del hongo patógeno *M. roleri*, para identificar los posibles cambios en las distribuciones geográficas potenciales y en las áreas de coexistencia cultivo-patógeno ante escenarios de cambio climático en Ecuador continental. De esta manera, se podrían evaluar nuevas regiones con potencial para las plantaciones de cacao y monitoreo de zonas con riesgo de invasión del patógeno y que apoyen significativamente la planificación del uso del suelo considerando los efectos del cambio climático en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Compilación y Limpieza de Registros de Presencia

Los registros primarios de presencia de las especies se obtuvieron de diversas fuentes. Los datos se descargaron de bases internacionales como global biodiversity information facility (GBIF) con la herramienta Niche Toolbox (Osorio-Olvera *et al.*, 2020); a través de la cual se obtuvieron 45 registros para *T. cacao* y cuatro registros para *M. roleri*. A partir de literatura científica (Jaimes, Aránzazu, Rodríguez y Martínez, 2011; Villamil-Carbajal, Blanco y Viteri, 2012; López-Báez *et al.*, 2014; Melo *et al.*, 2014; Seng, Herrera, Vaughan y McCoy, 2014; Ballesteros, Lagos y Ferney, 2015; Ochoa-Fonseca, Ramírez,

López, Moreno y Espinosa, 2015; Solís, Zamarripa, Pecina, Garrido y Hernández, 2015; Carrera-Sánchez, Herrera, Díaz y Leiva, 2016; Cárdenas-Pardo, Darghan, Sosa y Rodríguez, 2017; Villavicencio-Vásquez, Espinoza, Pérez y Sosa del Castillo, 2018; Anzules-Toala, Borjas, Alvarado, Castro y Julca, 2019; Fachin *et al.*, 2019), se obtuvieron 28 registros para *T. cacao* y 87 registros para *M. roleri*. Además, se realizó la búsqueda en la base de datos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador (INIAP), donde se obtuvieron 27 registros para *T. cacao* y 17 registros para *M. roleri*. Finalmente, se recopilaron 94 registros del cacao y 79 para el patógeno a partir de informes de proyectos y tesis de grado de los años 2016 al 2019.

Al conjunto inicial de registros de presencia se les hizo una limpieza de datos para reducir posibles sesgos en la calibración de los modelos de nicho ecológico (Syfert, Smith y Coomes, 2013). Estos datos fueron filtrados en pasos secuenciales para mejorar la calidad. Primero se descartaron todos los registros con referencias geográficas desconocidas, o con errores obvios como coordenadas incompletas, ubicaciones en el océano y desajustes entre metadatos y coordenadas. También se eliminaron todos los registros duplicados. Un segundo paso correspondió al filtrado de los datos por distancia, de modo que se omitieron todos los registros redundantes que se encontraban en una sola celda de 1 km, que es la resolución espacial más fina para las variables de clima disponibles en worldclim. Aunque se descartaron una gran cantidad de puntos, este paso elimina los sesgos espaciales a gran escala y permite una mejor estimación de las características del nicho (Fourcade, Engler, Rödder y Secondi, 2014).

Se obtuvieron un total de 118 registros de presencia para *T. cacao* (Figura 1a), que se distribuyen en la mayoría de las provincias de Ecuador. Para *M. roleri* se utilizó un rango espacial más amplio debido a la poca disponibilidad de registros en Ecuador. Con la ampliación del rango de búsqueda se podría reflejar un conjunto más amplio de condiciones climáticas donde se pueda encontrar al patógeno. Se obtuvieron 160 registros finales de presencia de *M. roleri* distribuidos en países como Ecuador (66) (Figura 1d), Perú (10), Bolivia (4), Colombia (38), Venezuela (2), Panamá (1), México (31), Nicaragua (6) y Costa Rica (2). No se hizo distinción entre ubicaciones de bosques naturales o cultivos, porque esta información no siempre estuvo disponible en las fuentes originales. Este procedimiento

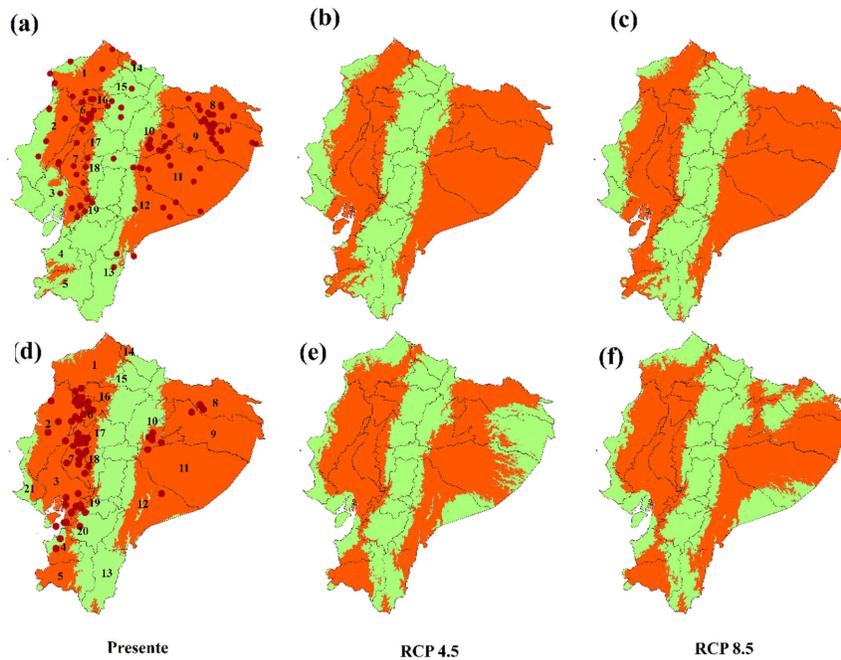


Figura 1. Distribución geográfica potencial de *Theobroma cacao* (a), (b) y (c); y *Moniliophthora roreri* (d), (e) y (f) en Ecuador continental, para el presente y en los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 del 2050. Provincias: 1: Esmeraldas; 2: Manabí; 3: Guayas; 4: El Oro; 5: Loja; 6: Santo Domingo de los Tsáchilas; 7: Los Ríos; 8: Sucumbíos; 9: Orellana; 10: Napo; 11: Pastaza; 12: Morona Santiago; 13: Zamora Chinchipe; 14: Carchi; 15: Imbabura; 16: Pichincha; 17: Cotopaxi; 18: Bolívar; 19: Cañar; 20: Azuay y 21: Santa Elena. En puntos rojos aparecen los registros de presencia utilizados para obtener los modelos de ambas especies. Color verde representa la ausencia y color naranja la presencia.

Figure 1. Potential geographic distribution of *Theobroma cacao* (a), (b) and (c); and *Moniliophthora roreri* (d), (e) and (f) in continental Ecuador, for the present and in the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate scenarios of 2050. Provinces: 1: Esmeraldas; 2: Manabí; 3: Guayas; 4: El Oro; 5: Loja; 6: Santo Domingo de los Tsáchilas; 7: Los Ríos; 8: Sucumbíos; 9: Orellana; 10: Napo; 11: Pastaza; 12: Morona Santiago; 13: Zamora Chinchipe; 14: Carchi; 15: Imbabura; 16: Pichincha; 17: Cotopaxi; 18: Bolívar; 19: Cañar; 20: Azuay and 21: Santa Elena. The presence records used to obtain the models of both species appear in red points. Green color represents the absence and orange color the presence.

de filtrado de los datos redujo los problemas asociados con la agrupación artificial de registros de presencia, que está relacionada con sesgos en el muestreo y en los reportes (Alkishe, Peterson y Samy, 2017).

Variables Climáticas

Se utilizaron 15 variables de los datos climáticos de worldclim versión 1.4 (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005) a una resolución espacial de 30 segundos de arco (~ 1km). Estas variables se derivaron de la interpolación de datos de precipitación y temperatura promedio mensual obtenidos de las estaciones

meteorológicas durante 1950-2000 y se utilizan para generar modelos de nicho ecológico, por considerarse biológicamente significativas para la caracterización de la distribución de las especies (Hijmans *et al.*, 2005). Se excluyeron cuatro variables: temperatura promedio del trimestre más húmedo (bio8), temperatura promedio del trimestre más seco (bio9), precipitación en el trimestre más caliente (bio18) y precipitación en el trimestre más frío (bio19) por considerarse artificios matemáticos que no se relacionan con las especies en estudio (Alkishe *et al.*, 2017).

Para la selección de las variables se utilizaron cuatro métodos: (1) análisis de correlación de Spearman,

(2) análisis de componentes principales ACP (se seleccionaron las variables con mayor relevancia en los componentes, peso > 0.8), (3) variables que tuvieron mayor influencia en la modelación de *M. roreri* y *T. cacao* según estudios realizados previamente (Ortega, Páez, Feria y Muñoz, 2017; Másmela, 2019), y (4) variables de mayor relevancia ecológica para las especies en estudio según la literatura (Enríquez, 1985; Wood y Lass, 1985; Phillips-Mora, Ortiz y Aime, 2006; Suárez, Bacallao, Carreño y Núñez, 2013). Las variables que menos contribuían se eliminaron secuencialmente. Al final, se usaron siete variables para el modelo del cacao: Temperatura media anual (bio 1), temperatura máxima media del periodo más cálido (bio 5), temperatura media del cuatrimestre más cálido (bio 10), temperatura media del cuatrimestre más frío (bio 11), precipitación anual (bio 12), precipitación del periodo más lluvioso (bio 13) y precipitación del cuatrimestre más lluvioso (bio16) y cinco variables para el modelo del patógeno: bio 1, temperatura mínima media del periodo más frío (bio 6), bio 12, bio 13 y 16.

Datos Climáticos Futuros

Para evaluar el potencial de distribución futuro de las especies, es fundamental tener en cuenta la incertidumbre en las estimaciones de distribución futura. Para considerar esta incertidumbre, se puede explorar la variación en los análisis que utilizan múltiples escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Raghavan, Peterson, Cobos, Ganta y Foley, 2019). Por ello, paralelamente, se obtuvieron capas de datos para el modelo de circulación general GISS-E2-R (NASA-GISS-NASA Goddard Institute for Space Studies, USA) el cual ha sido identificado en estudios previos como uno de los cuatro laboratorios que mejor simulan el clima de Ecuador en el futuro (Armenta, Villa y Jácome, 2016), para cada vía de concentración representativa (RCP) en el período 2046-2065 con centro en 2050. Se eligió el escenario intermedio RCP 4.5, que predice un aumento de la temperatura promedio de 1.4 °C (0.9–2.0 °C), y un escenario con emisiones muy altas de gases de efecto invernadero RCP 8.5, que predice un aumento de temperatura promedio de 2.0 °C (1.4-2.6 °C). Se eligieron estas proyecciones climáticas con centro en 2050 para alinearlas con el marco de las Naciones Unidas y los desafíos mundiales en la agricultura (Lipper *et al.*, 2014).

Modelo de Nicho Ecológico

Para estimar los modelos de nicho ecológico se utilizó el algoritmo de máxima entropía MaxEnt 3.4.1 (Phillips y Dudík, 2008). Se usaron las asociaciones entre los puntos de presencia de las especies y las variables climáticas para construir el nicho ecológico de cada una. Para calibrar el modelo se definió el área accesible adecuada (M) para la especie. Esta M es el área a través de la cual se debe ejecutar la calibración del modelo, ya que mejora el rendimiento del mismo (Anderson y Raza, 2010) al minimizar los impactos de los supuestos sobre la ausencia de especies en áreas que no son accesibles para las mismas. M se define como el área a la que la especie probablemente tuvo acceso a través de la dispersión (Barve *et al.*, 2011). En este estudio, se consideró que el área accesible (M en el marco del diagrama BAM) (Soberón y Peterson, 2005) incluye los países donde existieron puntos de presencia del patógeno; así se logró obtener la zona accesible o de movilidad, para proyectar el modelo a Ecuador continental.

Para la calibración del modelo, se realizó una validación cruzada mediante la asignación aleatoria (sin reemplazo) de datos de ubicación. Se utilizó el 80% de los datos para calibrar el modelo y el 20% para validarlo. Se usó el partialROC (Peterson *et al.*, 2011) para probar la robustez de los modelos a través de Niche Toolbox (Osorio-Olvera *et al.*, 2020). Se consideraron como parámetros una tasa de omisión de 5%, un porcentaje de puntos aleatorios de 50% y 500 iteraciones de *bootstrap* (Peterson, Papeş y Soberon, 2008). Cada modelo fue proyectado a escenarios climáticos futuros para el 2050, en dos RCP (4.5 y 8.5) (Van Vuuren, *et al.*, 2011). Para evitar problemas con el sobreajuste de los modelos (Peterson, Papeş y Eaton, 2007), se estableció como umbral de corte el 10mo percentil (Liu, Berry, Dawson y Pearson, 2005; Liu, White y Newell, 2013). Los mapas binarios (presencia/ausencia) obtenidos permitieron la identificación de amplias regiones geográficas con condiciones climáticas adecuadas para el cacao y el fitopatógeno.

Se transfirieron los modelos del patógeno y del cacao a condiciones futuras de cambio climático en el 2050 y se compararon con el presente. Para ello, se realizaron comparaciones de los mapas binarios de las especies para identificar los cambios potenciales (expansión, contracción del rango, no cambio) en las

¹ Phillips Mora, W. (2003). Origin, biogeography, genetic diversity and taxonomic affinities of the cacao (*Theobroma cacao* L.) fungus *Moniliophthora roreri* (Cif.) Evans *et al.* as determined using molecular, phytopathological and morpho-physiological evidence. Thesis degree: Doctor of Philosophy. The University of Reading. United Kingdom. Disponible en http://cadencacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Origin_biogeography_genetic_diversity_and_taxonomic_affinities_of_the_cacao.pdf

condiciones favorables que podría generar el cambio climático a futuro. Para esto se empleó el complemento Distribution Changes Between Binary SDM de la caja de herramientas SDMToolBox v2.4 en ArcGIS 10.5 (Esri, 2011). A partir de este análisis se obtuvo la extensión del área en km² por cada especie, para visualizar el rango de expansión/contracción o si la distribución geográfica potencial de las especies no presentaba cambios.

Para identificar las zonas susceptibles a la invasión del fitopatógeno y a la coexistencia con el cacao, se hizo una suma de los mapas binarios de distribución geográfica potencial de ambas especies en el presente y para los dos escenarios futuros. Para ello se usó la herramienta SDM Toolbox en ArcGis 10.5 (Esri, 2011). El resultado de esta suma indicó las zonas con coincidencia en la distribución de las dos especies, así como las zonas donde solo existían condiciones para la distribución potencial de una de las especies.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de Variables Climáticas

La variable que tuvo mayor influencia en el modelo de *T. cacao* fue la precipitación del trimestre más húmedo (bio 16) con el 67% de contribución al modelo y el 64% de importancia en la permutación. La precipitación anual (bio 12) y la temperatura promedio anual (bio 1) contribuyeron con el 7% cada una y la temperatura promedio del trimestre más frío (bio 11) tuvo un 20% de importancia en el análisis de la permutación. Esto indica que la probabilidad de presencia del cacao es mayor en zonas con altas precipitaciones y con temperaturas óptimas entre 23 °C y 25 °C. Estas condiciones climáticas son favorables para la floración y fructificación del cultivo de cacao, lo cual coincide con los datos ecológicos reportados para la especie (Ogata, 2007).

Para *M. royeri*, las variables de mayor importancia en el modelo fueron la precipitación del mes más húmedo (bio13) con el 66% y la temperatura mínima del mes más frío (bio 6) con 17%, coincidiendo con los aspectos descritos sobre su ecología (Evans, 1981; Ortega *et al.*, 2017). Según el análisis de permutación, las variables de mayor contribución fueron la precipitación en el trimestre más húmedo (bio 16) con un 46% y la temperatura mínima del mes más frío (bio 6) con un 30%. Este hongo puede crecer

y desarrollarse entre los 18 °C y 30 °C y sus esporas pueden germinar entre 10 °C y 40 °C (Phillips-Mora, 2003¹). Este amplio rango de tolerancia a variaciones de temperatura contribuye con la expansión potencial del hongo hacia diferentes zonas donde no se había registrado previamente.

Modelos de Nicho Ecológico

Los modelos tuvieron valores altos de rendimiento para ambas especies. Para *T. cacao*, el AUC (Área Bajo la Curva) con los datos de calibración fue de 0.8 y para *M. royeri* 0.82, lo que confirma que los modelos desarrollados son de confianza (Ortega *et al.*, 2017; Másmela, 2019). Las predicciones dieron proporciones de área bajo la curva (AUCratio) por encima de las expectativas nulas en los análisis ROC parcial ($P < 0.001$). El AUCratio tuvo un valor promedio de 1.33 para el modelo del cacao y 1.37 para el modelo del patógeno. Estos valores indican que los modelos tuvieron un buen rendimiento según las variables utilizadas, y predicen adecuadamente y mejor que un modelo al azar.

Según la proyección del modelo de *T. cacao* en el espacio geográfico, esta especie se distribuye potencialmente en zonas tropicales del país, en la costa y la Amazonía, que incluyen las provincias Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Loja, Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Sucumbíos, Orellana, Napo, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe (Figura 1a). Además, existen condiciones climáticas adecuadas para su presencia en las provincias Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Bolívar y Cañar, con idoneidad en zonas colindantes con la región costa. Las regiones cálidas de la costa y Amazonía fueron identificadas como las zonas principales para el cultivo de cacao. En estas regiones el clima es ideal para que el cultivo de cacao se adecue perfectamente, ya que este se desarrolla en regiones calientes muy húmedas, donde las lluvias son regulares y las temperaturas oscilan entre 25 °C y 30 °C (Meléndez-Marin, 1993²; Másmela, 2019). Estas condiciones climáticas son típicas de las regiones tropicales húmedas de los bosques del Amazonas, que constituyen el centro de origen del cacao (Motamayor *et al.*, 2008).

Al transferir el modelo a condiciones futuras, los patrones de distribución actuales y futuros coincidieron en gran medida (Figura 1b, 1c). Sin embargo, las predicciones del modelo indicaron cierto potencial de expansión (Cuadro 1) en áreas no identificadas

² Meléndez-Marin, L. (1993). *Microambiente, cantidad de esporas en el aire e incidencia del hongo Moniliophthora royeri (Cif & Par.) Evans et al., bajo tres sistemas de manejo de sombra leguminosa en cacao (Theobroma cacao)*. Tesis para obtener el grado de Magister Scientiae. CATIE. Turriéiba, Costa Rica.

como aptas para el cacao en las condiciones actuales, particularmente en el sur de Ecuador (Figura 1b, 1c), donde hubo ausencia de registros en fuentes oficiales; sin embargo, el algoritmo de modelación es eficaz, incluso cuando el número de sitios en la que se ha documentado la especie es bajo (Costa, Nogueira, Machado y Colli, 2010). Según los análisis de ganancia o pérdida, en los dos escenarios proyectados RCP 4.5 y RCP 8.5, se observó que *T. cacao* obtiene ganancias de un 16% y 18% respectivamente de superficie idónea en las provincias costeras y amazónicas del país (Figura 2a, 2b). Esto es muy favorable para los productores de cacao en Ecuador, dada la importancia de este cultivo en el país (ANECACAO, 2020). De favorecerse las condiciones climáticas en un futuro cercano, pudieran incrementarse las áreas dedicadas al cultivo de cacao, ya que nuevos sitios brindarían las condiciones agroecológicas necesarias para el establecimiento de plantaciones, y

las existentes podrían seguir operando sin afectaciones dadas por el cambio climático.

En el caso de *M. roreri*, se identificaron condiciones climáticas adecuadas principalmente en las provincias de la costa y Amazonía, que incluyen Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, Los Ríos, El Oro, Loja, Santo Domingo de los Tsáchilas, Sucumbíos, Orellana, Napo, Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe (Figura 1d), así como en las zonas colindantes con la región Costa de las provincias Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Bolívar, Cañar y Azuay. La mayoría de estas áreas coinciden con los sitios donde se predice la distribución de *T. cacao* para el presente. La costa y Amazonía ecuatoriana son las regiones más afectadas por moniliasis en el país, debido a que presentan condiciones bioclimáticas de mayor relevancia en la distribución geográfica potencial de esta especie, según el modelo obtenido y otros estudios que indican que las zonas tropicales son más

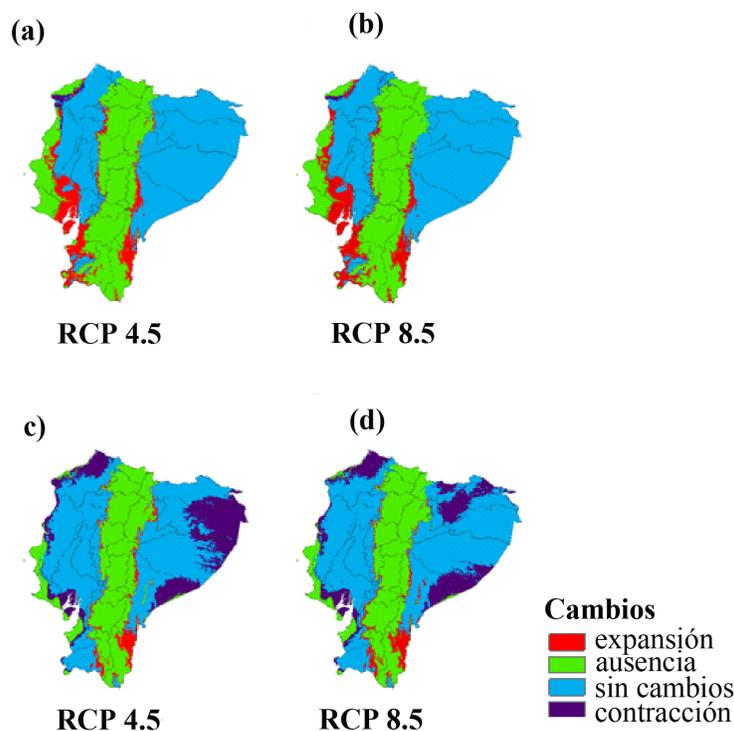


Figura 2. Variaciones en el área de distribución potencial de *Theobroma cacao* (a y b) y *Moniliophthora roreri* (c y d) en Ecuador continental bajo escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 al año 2050.

Figure 2. Variations in the potential distribution area of *Theobroma cacao* (a and b) and *Moniliophthora roreri* (c and d) in continental Ecuador under climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 to the year 2050.

³ Ram, A. (1989). *Biology, epidemiology and control of moniliasis (Moniliophthora roreri)* Thesis degree: MSc (Agric) Agronomy. Faculty of Science. University of London. England.

Cuadro 1. Área de distribución potencial de *Moniliophthora roreri* y *Theobroma cacao* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental.**Table 1. Potential distribution area of *Moniliophthora roreri* and *Theobroma cacao* under climate change scenarios in continental Ecuador.**

Especies	Escenario actual	RCP 4.5 año 2050	RCP 8.5 año 2050
	----- km ² -----		
<i>M. roreri</i>	195 323	157 880	167 394
<i>T. cacao</i>	159 202	185 020	188 635
Coexistencia hongo-cacao	157 114	137 028	148 379

propensas a la propagación del hongo en cultivos de cacao, principalmente por la influencia de variables de precipitación y temperatura (Ortega *et al.*, 2017; Másmela, 2019). La distribución geográfica potencial de este fitopatógeno se ve favorecida en aquellas áreas donde hay mayor ocurrencia de las precipitaciones, y se ha documentado que en sitios con lluvias frecuentes e intensas su incidencia es mayor (hasta 80% de infección) que en sitios secos (Evans, 1981; Wood y Lass, 1985; Ortega *et al.*, 2017).

Para el escenario RCP 4.5 (Figura 1e) y RCP 8.5 (Figura 1f), las zonas con condiciones óptimas se mantuvieron en la mayoría de provincias, a excepción de Sucumbíos, Orellana, Pastaza y Morona Santiago, en las que, según el análisis de ganancia y pérdida para el fitopatógeno, se observó una contracción de rango de un 5% de pérdida de superficie en el área considerada idónea en ambos escenarios en comparación con el presente (Cuadro 1), (Figura 2c y 2d). Esta contracción se prevé por variaciones en el clima a futuro, ya que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, y de temperatura, producirían alteraciones en los ecosistemas naturales y por ende la distribución de enfermedades y migración de las mismas a otras zonas geográficas (Vuille *et al.*, 2008; IPCC, 2014; Reyer *et al.*, 2017). Debido a que las precipitaciones son fundamentales para el desarrollo del patógeno, la alteración de las mismas implicaría modificaciones en su hábitat idóneo y serían factores importantes en el inicio de infecciones sucesivas (Ortega *et al.*, 2017; Másmela, 2019). Considerando que el agua es el principal componente, y a veces el único sustrato, para iniciar la germinación de las esporas de *M. roreri*, el desarrollo de la enfermedad se favorece en el cultivo de cacao (Evans, 2002). Sin embargo, es importante mencionar que otros factores adicionales a los climáticos podrían favorecer su

distribución geográfica. Por ejemplo, su capacidad de adaptación, capacidad de dispersión y factores antropogénicos como el transporte de organismos y cambio de uso de suelo (Soberón y Peterson, 2005). De la misma manera, otros estudios también sugieren que este hongo posiblemente reduzca su área de expansión en la Amazonía ecuatoriana para el 2050 (Ortega *et al.*, 2017), lo que significa una oportunidad para el establecimiento de cultivos de cacao sin riesgo de infección. Por otra parte, otros estudios prevén que *M. roreri* se desplace a nuevas regiones extensas como algunas zonas de Brasil y Perú, donde actualmente no se encuentra (Ortega *et al.*, 2017).

Coexistencia Patógeno-Cacao

La suma de modelos indicó que principalmente en la costa y Amazonía (Figura 3a) existen condiciones climáticas favorables para la coexistencia hongo-cacao. Además, podrían coexistir en las zonas limítrofes con la costa ecuatoriana (Figura 3a). Las zonas de mayor extensión en la distribución potencial de *M. roreri* coinciden con las zonas productoras de cacao en Ecuador, debido a la fuerte relación entre el patógeno y este cultivo, por sus similitudes en los requerimientos bioclimáticos para su establecimiento. La distribución de este fitopatógeno está estrechamente ligada al cacao y se limita en gran medida a las zonas donde este se cultiva (Ram, 1989³). Al existir estas similitudes climáticas entre las regiones costa y Amazonía, era previsible que las zonas susceptibles a la invasión del hongo y de coexistencia con el cacao coincidieran, y se localicen principalmente en estas regiones tropicales donde la temperatura promedio oscila entre 22 a 26 °C y las precipitaciones entre 3000 mm a 4000 mm anuales (Portilla, 2018). Estas zonas con lluvias recurrentes

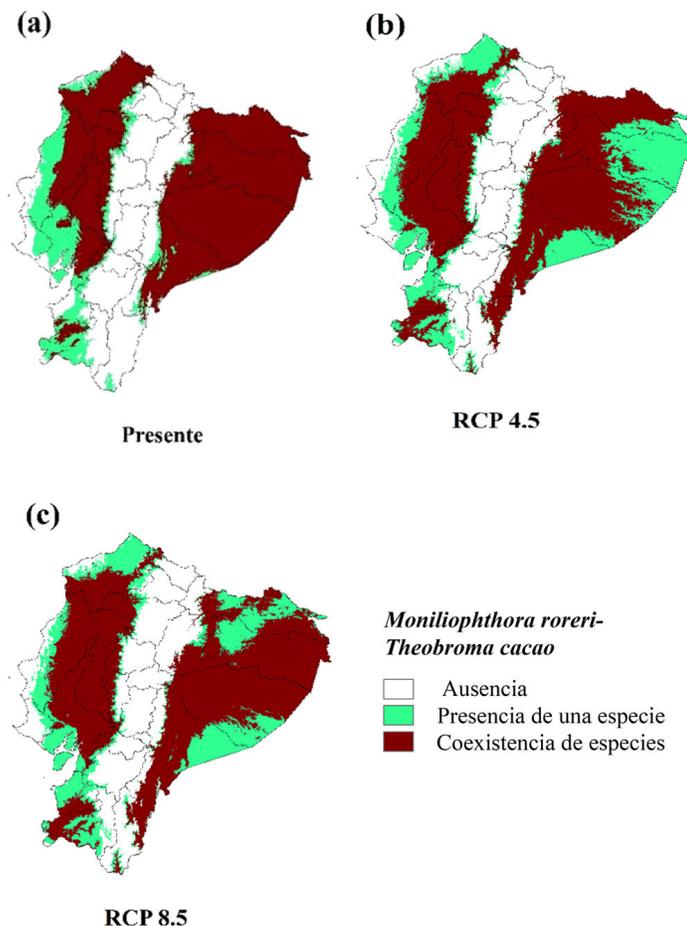


Figura 3. Zonas de coexistencia hongo-cacao para el presente (a), RCP 4.5 al año 2050 (b), RCP (8.5) al año 2050 (c) en Ecuador continental.
 Figure 3. Fungus-cocoa coexistence zones for the present (a), RCP 4.5 to the year 2050 (b), RCP (8.5) to the year 2050 (c) in continental Ecuador.

son consideradas adecuadas para la presencia del fitopatógeno, ya que la humedad facilita la germinación de sus esporas y favorecen una incidencia superior de la moniliasis sobre el cultivo del cacao (Campuzano, 1980; Cubillos, 2017).

Para los escenarios climáticos futuros RCP 4.5 (Figura 3b) y RCP 8.5 (Figura 3c), en la mayoría de provincias esta situación se mantiene y las zonas de coexistencia siguen siendo las mismas regiones tropicales donde hay plantaciones de cacao en la actualidad. Estas zonas en un futuro mantendrán altas temperaturas y humedad, que favorecerán el desarrollo de plantaciones cacaoteras y la proliferación del fitopatógeno (Gottlieb, 1950; Thuiller *et al.*, 2005). Sin embargo, se observa una disminución de idoneidad en las zonas de coexistencia hongo-cacao en la región

oriental del país, en las provincias de Sucumbíos, Orellana, Pastaza y Morona Santiago en ambos escenarios en comparación con el escenario actual. Tomando en cuenta los factores climáticos, que son factores limitantes para la distribución de organismos, estas provincias son las más recomendadas para el cultivo de cacao en el futuro y con menor riesgo de infección por monilia, si se considera que la distribución del cacao se ve comprometida por la del fitopatógeno (Ortega *et al.*, 2017). El resto de provincias con riesgo de coexistencia representan zonas de riesgo para el cultivo de cacao por la posible invasión del fitopatógeno, pudiendo devastar completamente cultivos de cacao, como viene ocurriendo actualmente. Esto ocasiona un decrecimiento de la producción de cacao y por ende pérdidas económicas importantes en

el sector cacaotero (Pilaloo-David, Alvarado, Pérez y Torres, 2021), considerando que este sector contribuye con el 5% de la población económicamente activa nacional (PEA) y el 15% rural (ANECACAO, 2020).

Sitios Recomendados para Monitoreo de la Enfermedad

Se deben considerar varios factores antes de interpretar las predicciones de los modelos con respecto a las expansiones y cambios en la distribución potencial de *M. royeri*. La distribución predicha identificó en su mayoría a las provincias de la costa y Amazonía de Ecuador como zonas que podrían estar infectadas por la enfermedad. Sin embargo, a la hora de tomar medidas de prevención y control de este fitopatógeno en Ecuador, tanto en la actualidad como para escenarios futuros, se deben tener en cuenta todos los factores importantes que favorecen su diseminación, no solo los climáticos. El cambio climático puede tener efectos directos sobre su abundancia y distribución, pero, además, se deben considerar otros factores abióticos (p. ej.: uso de la tierra, características del suelo) y factores bióticos (p. ej.: abundancia y salud de los hospederos). Además, las áreas adecuadas para este fitopatógeno, deben ser accesibles a través de la dispersión para que tengan lugar las expansiones reales del rango. Otros factores a tener en cuenta, que determinan que la invasión de *M. royeri* pueda llegar a niveles incontrolables son su alta adaptación a los cultivos de *T. cacao*, la resistencia a ambientes cambiantes, su rápida dispersión natural, su capacidad evolutiva, las actividades humanas como el manejo inadecuado de cultivos y el cambio de uso de suelo (Ortega *et al.*, 2017; Phillips y Wilkinson, 2007).

En este estudio se usó un enfoque riguroso de modelación para aproximar los nichos ecológicos del cacao y el patógeno en cuestión, y luego evaluar su potencial de distribución en las condiciones actuales y futuras. Sin embargo, es importante reconocer que modelar los requisitos ecológicos de las especies para anticipar patrones futuros de transmisión de enfermedades es un desafío. Este estudio aplicó varias de las recomendaciones metodológicas recientes para producir modelos robustos de nichos ecológicos, que incluyeron el filtrado de los registros de presencia (Boria, Olson, Goodman y Anderson, 2014), pruebas de distintos conjuntos candidatos de variables ambientales, delimitación de un área accesible para la calibración del modelo (Barve *et al.*, 2011), uso de criterios estadísticos (ROC parcial, tasas de omisión)

para la selección del modelo. Sin embargo, en próximos pasos se debe incluir un análisis de la paridad orientada a la movilidad (MOP) para comprender la certeza y la incertidumbre en diferentes áreas en la región de estudio (Owens *et al.*, 2013). Con el análisis MOP se podría evaluar el grado de novedad de las condiciones climáticas en todos los escenarios climáticos futuros en relación con las condiciones actuales. Esta novedad es una distancia en el espacio ambiental entre las características ambientales del área de interés (período de tiempo futuro) y el conjunto de ambientes representados en toda la región de referencia (período presente). Se evaluaría la novedad general de las condiciones y se destacarían las regiones donde se produce una extrapolación estricta (valores fuera del rango de entornos en la región por tiempo de referencia), para dar una visión de certeza e incertidumbre en varios sectores del área de estudio (Owens *et al.*, 2013). Cualquier transferencia extrapolativa del modelo debe interpretarse con mucha cautela, como es el caso de la expansión de condiciones adecuadas hacia el sur de Ecuador, donde no se tienen registros de presencia del cacao.

Es evidente que en Ecuador existen las condiciones adecuadas para que el riesgo de infestación del cacao por *M. royeri* proliferen y se mantenga en un futuro. Sin embargo, teniendo en cuenta las evidencias de los sitios de coexistencia, se pueden desarrollar planes de prevención y control eficientes en los mismos. Además, al conocer las áreas donde potencialmente *M. royeri* perdería hábitats con condiciones óptimas para su desarrollo en un futuro, se podrían establecer estas plantaciones de cacao menos vulnerables a su ataque y llevar a cabo acciones que permitan mantener los cultivos libres del hongo. Es necesario contribuir con la divulgación de la información y que los tomadores de decisiones dentro del sector agrícola, tomen los resultados obtenidos como línea base para el desarrollo de estrategias agrícolas que mejoren la resiliencia de los cultivos y agricultores ante el cambio climático.

Podría decirse que la susceptibilidad de la agricultura a las condiciones ambientales cambiantes es la consecuencia a corto plazo más peligrosa del cambio climático, y las predicciones sobre la geografía de los cambios serán útiles para implementar estrategias de mitigación. Este es un primer paso que se da en el país para relacionar los modelos de nicho ecológico con la información de los cultivos de interés y utilizarlos como base para la visualización de la idoneidad ambiental,

en vías de trabajar con una agricultura de precisión. El uso de estos modelos en la agricultura proporciona un ejemplo de una herramienta científica de apoyo a la toma de decisiones (Zhang, Cao, Bai, Li y Mao, 2016) y proporciona las bases para difundir esta información a los profesionales, y eventualmente integrar los hallazgos de la investigación en las prácticas agrícolas locales.

Un aporte interesante para que estos resultados lleguen a personas no científicas podría ser a partir de la creación de una aplicación web interactiva, de fácil uso, donde los puntajes de idoneidad previstos para el área de estudio puedan ser accesibles para cualquier persona interesada, fundamentalmente el sector cacaotero. Según Bariotakis *et al.* (2019), este tipo de aplicaciones puede proporcionar información tanto en forma visual (es decir, mapas de idoneidad prevista) como en forma numérica y se podría acceder y utilizar por todos los grupos interesados, desde el nivel de los formuladores de políticas hasta el nivel de los profesionales individuales.

CONCLUSIONES

La variable bioclimática de mayor importancia en el modelo de *T. cacao* fue la precipitación del trimestre más húmedo y para *M. royeri* la precipitación del mes más húmedo. En la actualidad, el cacao se distribuye potencialmente en las regiones cálidas del país, como la costa y la Amazonia. En el caso de *M. royeri*, su área de distribución potencial coincide en varios sitios con la distribución de *T. cacao* en el escenario presente. En escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5 en el año 2050, el modelo predice ganancias de área idóneas para la distribución del cacao de 16% y 18% respectivamente, especialmente al sur del país. Mientras que para *M. royeri*, el modelo prevé una reducción de 5% idoneidad en ambos escenarios, en provincias amazónicas del país. En la costa y Amazonía existen condiciones climáticas favorables para la coexistencia hongo-cacao en el presente. De la misma manera, para los escenarios climáticos futuros RCP 4.5 y RCP 8.5, en la mayoría de provincias esta situación se mantiene y las zonas de coexistencia siguen siendo las mismas regiones tropicales donde hay plantaciones de cacao en la actualidad. Se confirma que el potencial de invasión del patógeno y la posibilidad de colonizar espacios geográficos con cultivos sanos de cacao es alto, dado que estas especies coexisten debido a que su nicho

ecológico es semejante. Las áreas de coexistencia son prioritarias para la prevención y control de *M. royeri* en Ecuador, para así poder garantizar la integridad de los cultivos de cacao en el país y poder garantizar la seguridad alimentaria. Este tipo de modelos pueden ser aplicados a otros países de la región, en los cuales el cacao constituye un cultivo de importancia económica y que tienen altas probabilidades de verse afectados por la presencia del fitopatógeno. La información obtenida en este estudio permitirá en un futuro tomar decisiones sobre las zonas adecuadas para el cultivo de cacao, teniendo como base información científica de calidad. Además, contribuirá con la identificación de posibles áreas de proliferación de la enfermedad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 7ma Convocatoria, a través del proyecto: “Cambio climático y riesgo de expansión de los hongos *Moniliophthora royeri* y *Moniliophthora perniciosa* en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*): evaluación a partir de modelaciones de nicho ecológico”.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, Metodología, Recolección de datos, Redacción, Revisión y Edición: C.R.V.P., Y.F.S., A.H.P.V. y C.E.V.P.; Administración de proyecto y Recursos: Y.F.S.; Procesamiento y Edición de datos: Y.F.S. y C.R.V.P.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICT) 7ma Convocatoria, por el financiamiento otorgado al proyecto: "Cambio climático y riesgo de expansión de los hongos *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*): evaluación a partir de modelaciones de nicho ecológico". Al Centro de Investigaciones Históricas y Sociales de la Universidad Autónoma de Campeche, México por su apoyo.

LITERATURA CITADA

- Alkische, A. A., Peterson, A. T., & Samy, A. M. (2017). Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes ricinus*. *Plos One*, 12(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189092>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140(1), 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>
- Ampuero, C. (1967). *Moniliophthora roreri* pod rot of cocoa. *Cocoa Grower's Bull*, 9, 15-17.
- Anderson, R. P., & Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37(7), 1378-93. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x>
- ANECACAO (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao). (2020). *Sector Exportador de Cacao*. Consultado el 7 de octubre, 2022, desde https://www.jica.go.jp/activities/issues/agricul/jipfa/ku57pq0002kz3d-att/20200220_data03_sp.pdf
- Anzules-Toala, V., Borjas-Ventura, R., Alvarado-Huamán, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Control cultural, biológico y químico de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp. en *Theobroma cacao* 'CCN-51'. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 511-520. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08>
- Armenta, G. E., Villa-Cedeño, J. L., & Jácome, P. S. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. Consultado el 10 de septiembre, 2021, desde <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf>
- Arvelo, M. A., Delgado, T., Maroto, S., Rivera, J., Higuera, I., & Navarro, A. (2017). *Estado actual sobre la producción, el comercio y cultivo de Cacao en América*. San José, Costa Rica: IICA-CATIEJ. ISBN: 978-92-9248-617-4
- Ballesteros, W., Lagos, T., & Ferney, H. (2015). Morphological characterization of elite cacao trees (*Theobroma cacao* L.) in Tumaco, Nariño, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(2), 313-328. <http://dx.doi.org/10.17584/rchh.2015v9i2.4187>
- Bariotakis, M., Georgescu, L., Laina, D., Oikonomou, I., Ntagounakis, G., Koufaki, M. I., ... Pirintzos, S. A. (2019). From wild harvest towards precision agriculture: Use of Ecological Niche Modelling to direct potential cultivation of wild medicinal plants in Crete. *Science of the Total Environment*, 694, 133681. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133681>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher S. P., Peterson, ..., Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., & Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling*, 275(10), 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012>
- Campuzano, H. (1980). La moniliasis del cacao. *Cacaotero Colombiano*, 13, 21-24.
- Cárdenas-Pardo, N., Darghan, A., Sosa-Rico, M. D., & Rodríguez, A. (2017). Análisis espacial de las incidencias de enfermedades en diferentes genotipos del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biologica Colombiana*, 22(2), 209-220. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Carrera-Sánchez, K., Herrera-Isla, L., Díaz-Castellanos, M., & Leiva-Mora, M. (2016). Micobiota asociada a frutos de cacao con síntomas de moniliasis en la amazonía ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 43(1), 48-54.
- Carvalho, B. M., Rangel, E. F., & Vale, M. M. (2017). Evaluation of the impacts of climate change on disease vectors through ecological niche modelling. *Bulletin of Entomological Research*, 107(4), 419-430. <https://doi.org/10.1017/S0007485316001097>
- Costa, G. C., Nogueira, C., Machado, R. B., & Colli, G. R. (2010). Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot. *Biodiversity and Conservation*, 19(3), 883-899. <https://doi.org/10.1007/s10531-009-9746-8>
- Cubillos, G. (2017). Frosty pod rot, disease that affects the cocoa (*Theobroma cacao*) crops in Colombia. *Crop Protection*, 96, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.011>
- De Beenhouwer, M., Aerts, R., & Honnay, O. (2013). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 175, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>
- Enríquez, G. A. (1985). *Curso sobre el cultivo del cacao*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. ISBN: 9977-951-52-7
- Esri (2011). *ArcGis User's Guide. Released 10.1*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- Evans, H. C. (1981). *Pot rot of cacao caused by Moniliophthora (Monilia) roreri*. *Phytopathological Papers*. Kew, Surrey, United Kingdom: Commonwealth Mycological Institute. ISBN : 9780815984849
- Evans, H. C. (2002). *Invasive neotropical pathogens of tree crops*. In R. Watling, J. C. Frank, A. M. Ainsworth, S. Isaac, & C. H. Robinson (Eds.). *Tropical mycology* (pp. 83-112). Wallingford, United Kingdom: CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851995434.00>

- Evans, H. C., Holmes K. A., & Reid, A. P. (2003). Phylogeny of the frosty pod rot pathogen of cocoa. *Plant Pathology*, 52(4), 476-485. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00867.x>
- Fachin, G., Pinedo, K., Vázquez, J., Flores, E., Doria, M., Alvarado, J., ... Bellido, J. (2019). Factores ambientales y su relación con la incidencia de *Carmentia foraseminis* (Busck) Eichlin (Lepidoptera: Sesiidae) en frutos de *Theobroma cacao* "cacao" en San Martín, Perú. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 23(2), 133-145. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.2.6>
- Fourcade, Y., Engler, J. O., Rödder, D., & Secondi, J. (2014). Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLoS One*, 9(5), e97122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122>
- Gottlieb, D. (1950). The physiology of spore germination in fungi. *The Botanical Review*, 16(5), 229 - 257.
- Gunathilaka, R. P. D., Smart, J. C. R., & Fleming, C. M. (2018). Adaptation to climate change in perennial cropping systems: Options, barriers and policy implications. *Environmental Science & Policy*, 82, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.011>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. J., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: IPCC
- Jaimés, Y., Aránzazu, F., Rodríguez, E., & Martínez, N. (2011). Behavior of introduced regional clones of *Theobroma cacao* toward the infection *Moniliophthora roreri* in three different regions of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 29(2), 361-371.
- Johnson, J., Bonilla, J., & Agüero, L. (2008). *Manual de manejo y producción del cacaotero* (40 pp.). Leon, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., ... Torquebiau, E. F (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4(12), 1068–1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P., & Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3), 385 - 389.
- Liu, C., White, M., & Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778 - 789. <https://doi.org/10.1111/jbi.12058>
- López-Báez, O., Ramírez-González, S. I., Espinosa-Zaragoza, S., Moreno-Martínez, J. L., Ruiz-Bello, C., Villarreal-Fuentes, J. M., & González-Mejía, O. (2014). Comportamiento de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* (Cif. y Par.) en Tapachula, Chiapas, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 1(1), 16-23.
- Machovina, B., & Feeley, K. J. (2013). Climate change driven shifts in the extent and location of areas suitable for export banana production. *Ecological Economics*, 95, 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.08.004>
- Másmela-Mendoza, J. E. (2019). Distribución potencial y nicho fundamental de *Moniliophthora* spp en cacao de América y África. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 659-679. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35038>
- Melo, B. L. B., De Souza, J. T., Santos, R. M. F., Rehner, S. A., Solis, K. H., Suarez, C., ... Gramacho, K. P. (2014). Development of microsatellites for the cacao frosty pod rot pathogen, *Moniliophthora roreri*. *Forest Pathology*, 44(4), 320-324. <https://doi.org/10.1111/efp.12103>
- Merchán, V. M. (1981). Avances de la investigación de la moniliasis del cacao en Colombia. *El cacaotero Colombiano*, 16, 26-41.
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., Da Silva e Mota, J. W., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). *PLoS One*, 3(10), e3311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Pilalao-David, W., Alvarado-Aguayo, A., Pérez-Vaca, D., & Torres-Sánchez, S. (2021). Manejo agroecológico de la Moniliasis en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) mediante la utilización de biofungicidas y podas fitosanitarias en el cantón La Troncal. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(15), 453-468. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.129>
- Ochoa-Fonseca, L. E., Ramírez-González, S. I., López-Báez, O., Moreno-Martínez, J. L., & Espinosa-Zaragoza, S. (2015). Efecto de preparados minerales sobre el crecimiento y desarrollo in vitro de *Moniliophthora roreri* (Cif. & Par.) Evans. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1065-1075.
- Ogata, N. (2007). El cacao. *Biodiversitas*, 72(3), 2-5.
- Ortega-Andrade, S., Páez, G. T., Feria, T. P., & Muñoz, J. (2017). Climate change and the risk of spread of the fungus from the high mortality of *Theobroma* en América Latina. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 30-40. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1266072>
- Osorio-Olvera L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Peterson, A. T., Falconi, M., Contreras-Díaz, R. G., ... Barve, N. (2020). NTBOX: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(10), 1199-1206. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>
- Owens, H. L., Campbell L. P., Dornak L. L., Saupé E. E., Barve N., Soberón J., ... Peterson A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>
- Paterson, R. R. M. (2021). Future scenarios for Fusarium wilt disease and mortality of oil palm in Nigeria, Ghana and Cameroon, extrapolated to Malaysia and Indonesia. *European Journal of Plant Pathology*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02389-3>
- Parker, L. E., McElrone, A. J., Ostojka, S. M., & Forrester, E. J. (2020). Extreme heat effects on perennial crops and strategies for sustaining future production. *Plant Science*, 295, 110397. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110397>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Eaton, M. (2007). Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 30(4), 550-60. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.05102.x>
- Peterson A. T., Papeş, M., & Soberon, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>

- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo-Bastos, M. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49)*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press. ISBN: 978-1-4008-4067-0
- Phillips-Mora, W., Ortiz, C. F., & Aime, M. C. (2006). *Fifty years of frosty pod rot in Central America: Chronology of its spread and impact from Panama to Mexico*. Consultado el 10 de septiembre, 2021, desde https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/philips2006.pdf
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-75. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips-Mora, W., & Wilkinson, M. J. (2007). Frosty pod of cacao: a disease with a limited geographic range but unlimited potential for damage. *Phytopathology*, 97(12), 1644-1647. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1644>
- Portalanza, D., Barral, M. P., Villa-Cox, G., Ferreira-Estafanous, S., Herrera, P., Durigon, A., & Ferraz, S. (2019). Mapping ecosystem services in a rural landscape dominated by cacao crop: A case study for Los Rios province, Ecuador. *Ecological Indicators*, 107, 105593. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105593>
- Portilla-Farfan, F. (2018). *Agroclimatología del Ecuador* (647 pp.). Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala. ISBN: 978-9978-10-310-4
- Raghavan, R. K., Peterson, A. T., Cobos, M. E., Ganta, R., & Foley, D. (2019). Current and future distribution of the lone star tick, *Amblyomma americanum* (L.) (Acari: Ixodidae) in North America. *PLoS ONE*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209082>
- Ramírez-Gonzalez, S. I. (2008). La moniliasis un desafío para lograr la sostenibilidad del sistema cacao en México. *Tecnología en Marcha*, 21(1), 97-110.
- Reyes, H., & Capriles de Reyes, L. (2000). *El Cacao en Venezuela, Caracas, Venezuela. Moderna Tecnología para su cultivo*. Caracas, Venezuela: El Rey. ISBN: 9789800761892
- Reyer, C., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales-Trujillo, N., ... Thonicke, K. (2017). Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 17(6), 1601-1621. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0854-6>
- Ruheili, A. M. A., Boluwade, A., & Subhi, A. M. A. (2021). Assessing the impact of climate change on the distribution of Lime (16srrii-B) and Alfalfa (16srrii-D) phytoplasma disease using MaxEnt. *Plants*, 10(3), 1-15. <https://doi.org/10.3390/plants10030460>
- Sánchez, L., Gamboa, E., & Rincón, J. (2003). Control químico y cultural de la moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) del cacao (*Theobroma cacao* L) en el estado Barinas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20(2), 188-194.
- Sánchez-Mora, F. D., & Garcés-Fiallos, F. R. (2012). *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al. en el cultivo de cacao. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 249-258.
- Seng, J., Herrera, G., Vaughan, C. S., & McCoy, M. B. (2014). Use of Trichoderma fungi in spray solutions to reduce *Moniliophthora roreri* infection of *Theobroma cacao* fruits in Northeastern Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 899-907.
- Soberón, J., & Peterson A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Solís-Bonilla, J. L., Zamarripa-Colmenero, A., Pecina-Quintero, V., Garrido-Ramírez, E., & Hernández-Gómez, E. (2015). Evaluación agronómica de híbridos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para selección de alto rendimiento y resistencia en campo a moniliasis. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 71-82.
- Suárez, G. M., Bacallao-Florido, F., Carreño-Soto, F., & Núñez-Caballero, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 30-37.
- Syfert, M. M., Smith, M. J., & Coomes, D. A. (2013). The effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models. *PLoS ONE*, 8(2), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055158>
- Thuiller, W., Richardson, D. M., Pyšek, P., Midgley, G. F., Hughes, G. O., & Rouget, M. (2005). Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biology*, 11(12), 2234 - 2250. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001018.x>
- Urquart, D. H. (1963). *Cacao*. Turrialba, Costa Rica: Editorial S.I.C. N° 13.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Villamil-Carbajal, J. E., Blanco-Valbuena, J. O., & Viteri-Rosero, S. (2012). In vitro evaluation of native microorganisms for their antagonism against *Moniliophthora roreri* Cif & Parin Coccoa (*Theobroma cacao* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6305-6315.
- Villavicencio-Vásquez, M., Espinoza-Lozano, R. F., Pérez-Martínez, S., & Sosa del Castillo, D. (2018). Foliar endophyte fungi as candidate for biocontrol against *Moniliophthora* spp. of *Theobroma cacao* (Malvaceae) in Ecuador. *Acta Biológica Colombiana*, 23(3), 235-241. <https://doi.org/10.15446/abc.v23n3.69455>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(34), 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Wood, G., & Lass, R. A. (1985). *Cocoa* (620 pp.). London, England: Blackwell Science Books.
- Zhang, L., Cao, B., Bai, C., Li, G., & Mao, M. (2016). Predicting suitable cultivation regions of medicinal plants with Maxent modeling and fuzzy logics: a case study of *Scutellaria baicalensis* in China. *Environmental Earth Sciences*, 75(5), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5133-9>