

# Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental

## Risk to cocoa cultivation due to changes in the potential distribution of the phytopathogen *Moniliophthora perniciosa* under climate change scenarios in continental Ecuador

Yarelys Ferrer-Sánchez<sup>1</sup>, Ayda Amelita Mafaldo-Sajami<sup>1</sup>,  
Alexis Herminio Plasencia-Vázquez<sup>2†</sup> y Juan Pablo Urdánigo-Zambrano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigaciones Históricas y Sociales. Avenida Agustín Melgar s/n, colonia Buenavista. 24039 Campeche, Campeche, México.

† Autor para correspondencia (ahplasen@uacam.mx)

Editor de Sección: Dr. Fernando Abasolo Pacheco

### RESUMEN

Ecuador es un país privilegiado por sus condiciones geográficas y climáticas, que le permiten ser uno de los mayores productores de cacao fino y de aroma a escala mundial. Una de las limitantes más importantes para su cultivo son las enfermedades fungosas, como el fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa*, que causa grandes pérdidas en la producción cacaotera. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el riesgo del cultivo de cacao ante los cambios de distribución geográfica potencial de *M. perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. Se obtuvieron datos de presencia del patógeno de la literatura científica y Niche Toolbox, y con variables bioclimáticas, seleccionadas de acuerdo con su ecología, se modeló su distribución potencial con MaxEnt. Con los mapas binarios del fitopatógeno y la capa de uso del suelo para el cultivo de cacao, se determinaron los sitios donde ambas especies coinciden espacialmente. El modelo de *M. perniciosa* fue transferido a Ecuador continental en el presente y a diferentes escenarios de cambios climático. El área de distribución del patógeno fue comparada entre los escenarios actuales y futuros

para identificar las pérdidas, ampliaciones y estabilidad. El mayor rango de ampliación y contracción se da en el escenario extremo RCP 8.5 2070, con 10 392 km<sup>2</sup> y 540 km<sup>2</sup> respectivamente. Hay un mayor rango de estabilidad durante los escenarios futuros RCP 4.5 2050 con 30 929 km<sup>2</sup> y 2070 con 30 908 km<sup>2</sup>. Actualmente, el fitopatógeno se distribuye de manera potencial en el 74 % del área ocupada por plantaciones de cacao y en el futuro todos los escenarios indican un aumento. Las medidas de prevención, manejo y control deben incrementarse para mantener estable la producción de cacao y no afectar la economía a nivel nacional, ni de las familias de los productores.

**Palabras clave:** hongo fitopatógeno, MaxEnt, modelo de nicho ecológico, plantaciones comerciales, *Theobroma cacao*.

### SUMMARY

Ecuador is a privileged country due to their geographical and climatic conditions, which allow it to be one of the largest producers of fine cocoa and aroma on a global scale. One of the most important limitations

#### Cita recomendada:

Ferrer-Sánchez, Y., Mafaldo-Sajami, A. A., Plasencia-Vázquez, A. H. y Urdánigo-Zambrano, J. P. (2022). Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-10. e1338. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>

Recibido: 10 de enero de 2022. Aceptado: 21 de marzo de 2022.  
Artículo. Volumen 40, octubre de 2022.

for its cultivation are fungal diseases, such as the pernicious phytopathogen *Moniliophthora perniciosa*, which causes large losses in cocoa production. This research aimed to assess the risk of cocoa in the face of potential geographical distribution changes of *M. perniciosa* under climate change scenarios in continental Ecuador. Pathogen presence data were obtained from the scientific literature and Niche Toolbox, and with bioclimatic variables, selected according to their ecology, and potential distribution was modeled with MaxEnt. With binary maps of the phytopathogen and the land use layer for cocoa cultivation, the sites where both species coincide spatially were determined. Model of *M. perniciosa* was transferred to continental Ecuador at present and to different climate change scenarios. The pathogen range was purchased between current and future scenarios to identify losses, extensions and stability. The highest range of expansion and contraction occurs in the extreme stage RCP 8.5 2070, with 10 392 km<sup>2</sup> and 540 km<sup>2</sup> respectively. There is a greater stability range during future scenarios RCP 4.5 2050 with 30 929 km<sup>2</sup> and 2070 with 30 908 km<sup>2</sup>. Currently, phytopathogen is potentially distributed in 74% of the area occupied by cocoa plantations and in the future all scenarios indicate an increase. Prevention, management, and control measures must be increased to keep cocoa production stable and not affect the economy at the national level, nor of the families of producers.

**Index words:** *phytopathogenic fungi, MaxEnt, ecological niche model, commercial plantations, Theobroma cacao.*

## INTRODUCCIÓN

Ecuador ha sido considerado uno de los mayores productores y exportadores de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el mundo, convirtiéndose en uno de los principales productos agrícolas del país (Aguirre-Cobos, 2019<sup>1</sup>). El cacao ha tenido un rol importante en la economía ecuatoriana y constituye la base para el sustento de muchas familias. Sin embargo, la productividad del cultivo de *T. cacao* se ha visto afectada por el manejo inadecuado de diferentes enfermedades, entre ellas las fúngicas. Una de las más peligrosas es la escoba de bruja, transmitida por

el hongo *Moniliophthora perniciosa*, el cual afecta los tejidos en crecimiento y los cojinetes florales, debilitando la planta y provocando daño directo al fruto (Bravo-Menéndez, 2019<sup>2</sup>). Este fitopatógeno se originó en Brasil y es endémico y originario de Sudamérica tropical (Másmela-Mendoza, 2019). Esta especie se asocia a zonas con rangos estrechos de temperatura diurna (entre 0 y 4 °C) y a temperaturas mínimas del mes más frío cercanas o mayores a los 22 °C (Meinhardt *et al.*, 2008). Las lluvias son muy importantes para su desarrollo, ya que pueden inducir la formación de basidiocarpos por condiciones de humedad y las gotas de agua activan la liberación de las basidiosporas (Evans, 2016).

La amenaza del cambio climático a nivel global ha causado gran preocupación entre los científicos por diversas razones. Entre ellas, la producción de diferentes cultivos podría verse severamente afectada, por cambios en las variables climáticas que juegan un papel fundamental en su desarrollo (Beck, 2013). Se ha predicho una reducción del 17% de la producción agrícola a nivel mundial para 2050, en un escenario con un clima invariable (Nelson *et al.*, 2014). Además, ciertas partes de África, Europa y Asia meridional y oriental se verían particularmente afectadas de manera negativa por el cambio climático, mientras que Europa nororiental, entre otras regiones, pueden esperar condiciones más favorables para la agricultura (Beck, 2013). En el caso de América Latina, las predicciones apuntan a que la productividad se mantendrá o incluso se incrementará ligeramente para mediados de siglo en el sureste de América del Sur, mientras que en centroamérica esta caerá en los próximos años, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de las poblaciones más pobres (Olsson *et al.*, 2014). Conjuntamente, se podría comprometer la seguridad alimentaria por el incremento de ciertas enfermedades a nivel local y mundial (Kogo, Kumar y Koech, 2021). Por ello, adaptar los sistemas agrícolas al cambio climático resulta particularmente difícil para cultivos perennes como el cacao, ya que se requiere de mucho tiempo de espera antes que los agricultores se beneficien plenamente de sus decisiones de manejo (Altieri y Nicholls, 2013).

En muchas comunidades ecuatorianas, las actividades agrícolas dependen directamente de las

<sup>1</sup> Aguirre-Cobos, G. X. (2019). *Caracterización molecular de Moniliophthora roreri causante de la vaina helada (moniliasis) en el cacao en tres provincias del Ecuador*. Tesis para obtener el grado de magister en Microbiología. Universidad San Francisco de Quito. Disponible en <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7780>

<sup>2</sup> Bravo-Menéndez, J. A. (2019). *Evaluación in vitro de la actividad biocida de diferentes fungicidas sobre el crecimiento radial de Moniliophthora roreri, Moniliophthora perniciosa y Phytophthora palmivora, agentes causales de enfermedades en cacao*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Disponible en <https://repositorio.uteg.edu.ec/handle/43000/3620>

condiciones ambientales, y las plantaciones como la del cacao podrían comenzar a sufrir los impactos del cambio climático, debido a las variaciones que se esperan en la temperatura y las precipitaciones. Además, algunos suelos dejan de ser aptos para muchos cultivos y a la par se vuelven más susceptibles a la presencia de diversos patógenos que se desarrollan libres de competidores (Bravo-Menéndez, 2019<sup>2</sup>). La capacidad adaptativa de estos patógenos en sinergia con el cambio climático, podría favorecer la ampliación de su distribución geográfica en el futuro.

Actualmente, Ecuador carece de información sobre las afectaciones que pudiera provocar *M. perniciosa* en el cultivo de cacao bajo escenarios de cambio climático, donde cada escenario es una imagen alternativa de cómo el futuro podría mostrarse bajo determinadas condiciones en un tiempo dado (Armenta-Porras, Villa y Jácome, 2016). La mayoría de los trabajos existentes reportan la presencia del patógeno, pero no se enfocan en particularizar sobre sus áreas de distribución (Bravo-Menéndez, 2019<sup>2</sup>). Por ello, es importante identificar áreas apropiadas para el crecimiento del cacao, donde las condiciones ambientales sean apropiadas y el impacto de estos patógenos sea menor. Estas áreas se pueden identificar utilizando la modelación de nicho ecológico (MNE), ya que se ha convertido en una herramienta poderosa para caracterizar la distribución ambiental, geográfica y potencial de especies patógenas (Peterson *et al.*, 2011; Ireland y Kriticos, 2019; Chaloner, Gurr y Bebbler, 2021). En el caso de *M. perniciosa*, hay antecedentes del uso de modelos de distribución potencial en América y África, que refieren una mayor probabilidad de presencia de la especie en los estados de Bahía y Acre en Brasil y un riesgo potencial de invasión en los cultivos africanos de cacao (Másmela-Mendoza, 2019).

Dado que Ecuador se enfrenta a una alta tasa de crecimiento demográfico y una rápida urbanización, los sistemas de producción de cultivos y seguridad alimentaria deben adaptarse más rápido a medida que aumenta la incertidumbre y la variabilidad por el cambio climático proyectado. Por estas razones, a través de este trabajo se evaluó el riesgo del cultivo de cacao (*T. cacao*) ante los cambios en la distribución geográfica potencial del patógeno *M. perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. Se espera que *M. perniciosa* esté mejor representada en regiones húmedas, con temperaturas estables, principalmente en los sitios donde en la actualidad existen plantaciones de

cacao. Con el apoyo de estos modelos, se podrán tomar medidas eficientes que contribuyan a la prevención y control de este patógeno, y de esta manera enfocar los esfuerzos de manejo, teniendo en cuenta una base científica que garantice mejores resultados a futuro. Con esta línea base, se proporcionará a los tomadores de decisiones y a las partes interesadas una evaluación detallada de los impactos climáticos que permitirían el diseño de estrategias de adaptación orientadas a mejorar la producción de cultivos de cacao y a la seguridad alimentaria.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El Ecuador continental está situado al noroeste de América del Sur, entre los 01° 28' N y 05° 01' S y desde los 75° 11' en la planicie Amazónica hasta los 81° 01' O. Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el océano Pacífico (Farfán, 2018). El territorio del Ecuador continental está dividido en tres regiones naturales claramente diferenciadas entre sí, por su topografía, clima, vegetación y población. Las tres regiones son: costa o litoral, sierra o región andina, y el oriente o amazonia.

### Compilación y Limpieza de Registros de Presencia

Para obtener registros de presencia, se recopilaron datos del fitopatógeno *M. perniciosa* en la base global biodiversity information facility (GBIF), en la literatura científica y en proyectos de investigación. Todos los registros obtenidos se filtraron para eliminar aquellos puntos sin información geográfica, con coordenadas incompletas o ubicaciones en el océano. Además, se eliminaron todos los que presentaban discrepancias entre los datos y las coordenadas, así como los que aparecían repetidos dentro de un mismo píxel o a una distancia menor de 1 km. Se ubicaron todos los registros de presencia de *M. perniciosa* sobre un mapa global, y de esta manera visualizar todos los países donde la especie estaba representada según los registros de presencia obtenidos. En total se obtuvieron 37 registros de presencia, y después de la limpieza quedaron 28 registros que se emplearon para la modelación. La limpieza de los registros se realizó con el paquete Niche Toolbox en R (Osorio-Olvera *et al.*, 2020).

## Variables Climáticas

Para la MNE se usaron los registros de presencia del fitopatógeno y 15 de las 19 variables bioclimáticas disponibles en la base worldclim 1.4, con una resolución de 30 arco-segundos (~1 km) (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005). Estas variables se derivaron de la interpolación de los datos de precipitación y temperatura mensual promedio, obtenidos de las estaciones meteorológicas durante 1950 - 2000. Las variables climáticas BIO 8, BIO 9, BIO 18 y BIO 19 no se tomaron en cuenta porque son producto de artificios espaciales conocidos que no se relacionan con la especie en estudio (Escobar, Lira, Medina y Peterson, 2014), lo cual no sucede con las restantes 15 variables bioclimáticas. La información climática se extrajo de cada registro de presencia del hongo con el uso del ArcGIS released 10.1 (Esri, 2011). Así mismo, en la herramienta *spatial analyst tool* de ArcGis, se usaron los registros de presencia del patógeno *M. pernicioso* y las 15 variables climáticas para realizar el proceso de extracción de valores múltiples a puntos.

Para la selección de las variables que se utilizaron en la modelación, se combinaron diferentes métodos. En primer lugar, se hizo una revisión de la ecología de la especie, para determinar las variables que aparecen descritas como importantes para el desarrollo del fitopatógeno (Jeschke y Strayer, 2008). Además, se revisó en la literatura científica aquellos trabajos donde se hubiera modelado con anterioridad la distribución potencial de la especie y así comprobar cuáles variables ambientales habían sido más importantes en el modelo (Jeschke y Strayer, 2008). También, se realizó un análisis de correlación bivariada entre las 15 variables climáticas. Con este procedimiento se pudo ver cuáles variables estuvieron más correlacionadas, mostrando las que podrían resumir el nicho ecológico de acuerdo con un umbral de  $r = 0.8$ . Por último, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), donde se usó el peso de cada variable en relación con los componentes, para identificar su relevancia. En este análisis se consideraron como relevantes las variables que tenían un peso  $> 0.7$ . Se eliminaron las variables menos contribuyentes en todos los métodos, quedando solo las más contribuyentes desde el punto de vista ecológico y estadístico.

## Modelación del Nicho Ecológico

Para modelar el nicho climático del fitopatógeno, se usó el algoritmo de máxima entropía MaxEnt 3.4.0 (Phillips *et al.*, 2017). Este es un método correlativo que sólo requiere de información sobre la presencia de las especies y una serie de variables ambientales para generar un modelo de las condiciones que favorecen la presencia de una especie en particular (Phillips *et al.*, 2017). El modelo obtenido se proyecta al espacio geográfico para generar un mapa que representa la distribución de las condiciones favorables para la especie, o su distribución potencial (Phillips, Anderson, Dudík, Schapire y Blair, 2017). Se utilizaron las asociaciones entre los registros de presencia y las variables ambientales (Phillips, Anderson y Schapire, 2006) para reconstruir el nicho ecológico del fitopatógeno. Se seleccionó un área accesible (M en el diagrama BAM) (Soberon y Peterson, 2005), que incluía la región continental de Ecuador, que fue el área de interés de este estudio. Se mantuvieron los parámetros por default en el programa, los cuales son conservativos y permiten al algoritmo llegar cerca de la convergencia (Phillips *et al.*, 2017). Para la calibración del modelo, se realizó una validación cruzada mediante la asignación aleatoria (sin reemplazo) de datos de ubicación. El 80% de los datos de presencia se utilizaron para calibrar el modelo y el otro 20% para validarlo.

Se transformaron los mapas continuos de adecuación a mapas binarios de presencia (1) / ausencia (0), utilizando como umbral de corte el décimo percentil de los datos de calibración para evitar problemas con el sobreajuste de los modelos (Peterson, Papeş y Eaton, 2007). El modelo fue evaluado con la prueba ROCparcial (Peterson *et al.*, 2011) en el programa 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).

## Ampliaciones, Pérdidas o Estabilidad en la Distribución Geográfica Potencial del Patógeno entre el Presente y los Escenarios de Cambio Climático

Para conocer el potencial invasivo actual y futuro de *M. pernicioso* en Ecuador continental, cada modelo fue proyectado a un escenario climático actual para el



país (1950-2000, a una resolución de ~1 km). En el caso de los escenarios climáticos futuros, se obtuvieron las capas (variables) del modelo de circulación general GISS-E2-R (NASA Goddard Institute for Space Studies, USA) para cada vía de concentración representativa (RCP), para cada período de tiempo. Se eligieron dos periodos, uno con su centro en 2050 (2041-2060) y otro lejano centrado en 2070 (2061-2080), bajo dos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, uno moderado (RCP 4.5) donde las emisiones alcanzan su punto máximo y otro extremo (RCP 8.5) donde las emisiones seguirán aumentando durante el siglo veintiuno (Ward, Morh, Myres y Nel, 2012). De esta manera, se tuvo en cuenta las posibles influencias del cambio climático en ambos escenarios y en dos momentos diferentes.

Con el propósito de identificar las zonas con mayor vulnerabilidad respecto a la distribución potencial del fitopatógeno, se usaron los mapas binarios de presencia/ausencia. Se comparó la distribución actual y futura para identificar ampliaciones (Rango de ampliación), estabilidad o pérdida en la distribución geográfica potencial de la especie (Rango de pérdida), usando la herramienta SDMtoolbox 2.4 en ArcGis 10.5. (Esri, 2011). A partir de este análisis, se obtuvo la extensión del área (km<sup>2</sup>) para cada escenario y se visualizó el rango de expansión, contracción o si la especie no presentaba cambios hacia el futuro.

### Identificación de las Zonas de Siembra de Cacao Susceptibles al Patógeno

Para analizar las posibles afectaciones de *M. perniciosa* al cultivo de cacao, se obtuvo la capa de uso de suelo a nivel nacional, de la cual se extrajo la categoría de cultivos perennes y subcategoría cacao. Esta capa de cultivos de cacao se superpuso con los mapas de distribución potencial del fitopatógeno en el presente y en los diferentes escenarios de cambio climático. De esta manera, se identificaron las áreas con siembra de cacao que son y serán susceptibles a la presencia o aparición del patógeno en los diferentes escenarios analizados. Este análisis se realizó empleando la herramienta *Extract by mask* en el programa ArcGis 10.5. (Esri, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

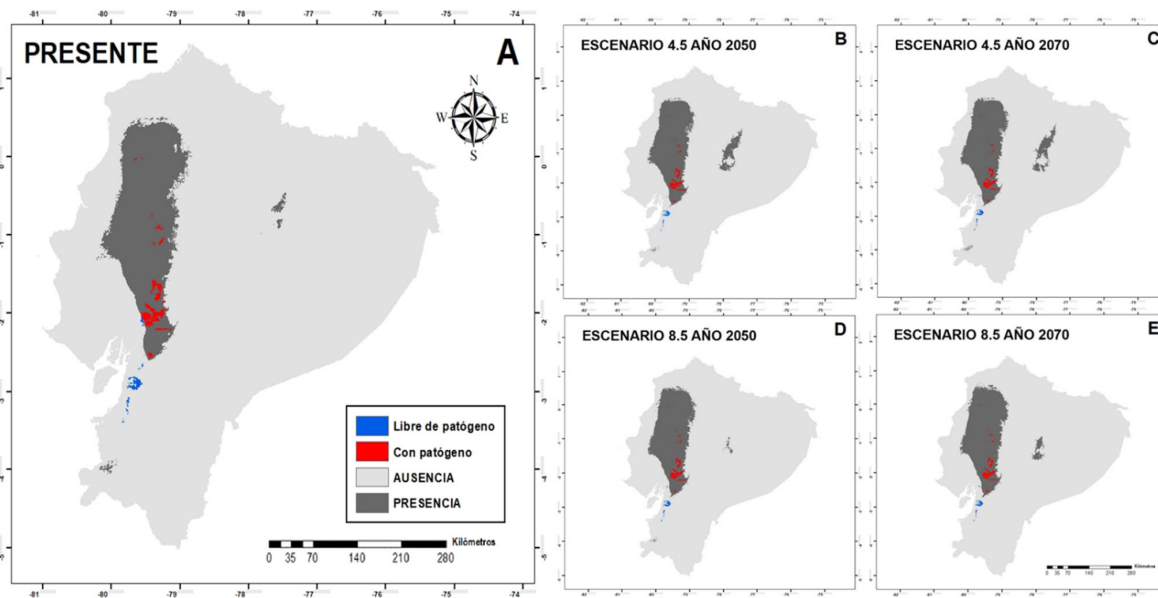
El rendimiento del modelo de *M. perniciosa* fue alto, con un AUC = 0.96 para los datos de calibración

del modelo y AUC = 0.87 para los datos de validación. El AUCparcial tuvo un promedio de  $1.72 \pm 0.1$  (1.32 - 1.89), por lo cual el modelo obtenido es diferente a uno aleatorio e indica que tuvo una buena capacidad predictiva.

La estacionalidad de la precipitación fue la variable que más aportó al modelo de este fitopatógeno (57.5%), seguido de la precipitación del cuatrimestre más lluvioso (37.7%). Tan solo estas dos variables acumulan el 95.2% de aporte al modelo, lo cual indica que las precipitaciones son importantes para el desarrollo de *M. perniciosa*. Esto coincide con los aspectos ecológicos descritos en la literatura para este fitopatógeno (Campuzano, 1980; Másmela-Mendoza, 2019). En las regiones donde las lluvias son constantes durante todo el año, se ha comprobado que la probabilidad de presencia de este fitopatógeno es alta, lo cual puede estar relacionado con el ambiente óptimo para la germinación de sus esporas, que requieren condiciones de humedad relativa entre 80-100% y temperaturas en un rango de 20-28 °C (Campuzano, 1980).

Para el presente, se obtuvo un área de 31 177 km<sup>2</sup> con condiciones climáticas adecuadas para la distribución potencial de *M. perniciosa* y 259 329 km<sup>2</sup> donde no podría desarrollarse (Figura 1A). La proyección para el 2050, bajo un escenario moderado RPC 4.5, mostró un incremento del área potencial con condiciones adecuadas, la cual abarcó 39 295 km<sup>2</sup> (Figura 1B). La proyección para el año 2070, bajo un escenario moderado RPC 4.5, mostró un incremento mayor del área con condiciones adecuadas, la cual alcanzó los 41 791 km<sup>2</sup> (Figura 1C). En su mayoría, las zonas con condiciones adecuadas para el presente y estos escenarios incluyen la región costera del país.

En cuanto a la proyección para el año 2050, bajo un escenario extremo RPC 8.5, se encontró un área de 39 098 km<sup>2</sup> con condiciones climáticas adecuadas para la presencia potencial de *M. perniciosa* y las zonas sin condiciones adecuadas abarcan 251 408 km<sup>2</sup> (Figura 1D). En la proyección para el año 2070, bajo un escenario extremo (RPC 8.5), se alcanzaron los mayores valores del área con condiciones adecuadas para el desarrollo del fitopatógeno, la cual abarcó 41 029 km<sup>2</sup> (Figura 1E). Se mantuvo el mismo patrón en relación con una mejor representatividad de la región costa del país en las áreas con condiciones adecuadas para el desarrollo de *M. perniciosa*.



**Figura 1.** Distribución geográfica potencial del patógeno *Moniliophthora perniciosa* en Ecuador continental y su relación con las zonas de cultivo de cacao en Ecuador continental en el presente (A) y bajo los escenarios RCP 4.5 para 2050 (B) y 2070 (C), y RCP 8.5 para 2050 (D) y 2070 (E) sobre la capa de uso de suelo de cultivo de cacao. En rojo los cultivos de cacao que coinciden con zonas de presencia potencial del fitopatógeno y en azul las que están en zonas sin patógeno. En gris oscuro las zonas de presencia del fitopatógeno y en gris claro las de ausencia.

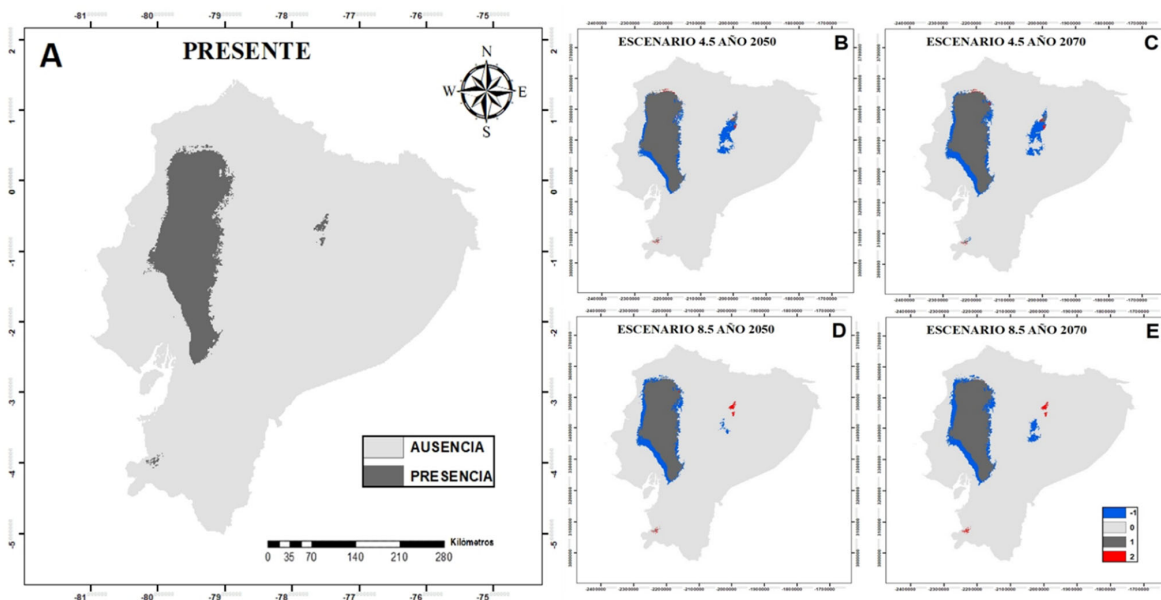
**Figure 1.** Potential geographical distribution of the pathogen *Moniliophthora perniciosa* in continental Ecuador and its relationship between cocoa cultivation areas in continental Ecuador for present (A) and scenarios RCP 4.5 for 2050 (B) and 2070 (C), and RCP 8.5 for 2050 (D) and 2070 (E), on the land use layer of cocoa cultivation. In red cocoa crops that coincide with areas of potential presence of the phytopathogen and in blue those that are in areas without pathogen. In dark gray the zones of presence of the phytopathogen and in light gray absence areas.

La distribución geográfica potencial de *M. perniciosa* en Ecuador continental abarcó la mayoría de las zonas con presencia de plantaciones de cacao en la actualidad, según la capa de uso de suelos dedicados a las plantaciones de cacao. Esto constituye un gran problema para mantener un desarrollo exitoso de este cultivo en el país. Se ha comprobado que los hábitats idóneos para el establecimiento de este fitopatógeno poseen una mayor estacionalidad de la precipitación (Másmela-Mendoza, 2019), condición que se puede encontrar en las zonas donde actualmente se localiza este cultivo. En la región costa de Ecuador se localizó la mayor parte del área de distribución potencial de *M. perniciosa* y coincide con la zona donde se concentran la mayoría de las áreas productoras de cacao en el país, lo cual evidencia la estrecha relación patógeno/hospedero. Este solapamiento entre las zonas con presencia de cacao y del fitopatógeno responde a las similitudes en cuanto a los requerimientos bioclimáticos para su establecimiento. La región costa ecuatoriana se

caracteriza por temperaturas cálidas y por una elevada humedad, factores que en su conjunto propician el crecimiento exitoso del cacao, pero también de *M. perniciosa* (Paredes-Solis, 2016<sup>3</sup>).

Los diferentes escenarios climáticos con los cuales se trabajó no son alentadores, ya que reflejan que en un futuro *M. perniciosa* tendrá las condiciones bioclimáticas adecuadas para expandirse por nuevas áreas. El modelo indica un incremento en las áreas de distribución potencial del patógeno en comparación con la distribución actual de la especie (Cuadro 1, Figura 2). El mayor rango de ampliación se identificó bajo el escenario moderado RCP 4.5 para el 2070 con 10 883 km<sup>2</sup> y la menor ampliación en este mismo escenario para el 2050 con 8 356 km<sup>2</sup> (Cuadro 1, Figura 2). Sin embargo, hubo un mayor rango de estabilidad durante los escenarios futuros RCP 4.5 para el 2050 (moderado) con 30 929 km<sup>2</sup> y RCP 8.5 para el 2070 con 250 929 km<sup>2</sup> respectivamente (Cuadro 1, Figura 2). Las ampliaciones del rango de distribución se observaron

<sup>3</sup> Paredes-Solis, M. O. (2016). *El manejo fitosanitario del cultivo de cacao nacional (Theobroma cacao L.) y el rendimiento del mismo, en la Asociación Kallari*. Tesis para obtener el grado de Magister en Agroecología y Ambiente. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Técnica de Ambato. Disponible en <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/22069>



**Figura 2.** Mapas de cambios en el área geográfica potencial de *Moniliophthora perniciosa* en Ecuador continental, tomando como referencia el presente y comparando con cuatro escenarios futuros, dos para los años 2050 (moderado RCP 4.5 y extremo RCP 8.5) y dos para 2070 (moderado RCP 4.5 y extremo RCP 8.5). Rangos: -1: Ampliación, 0: Estabilidad, 1: Sin cambios y 2: Pérdida.

**Figure 2.** Maps of changes in the potential geographical area in continental Ecuador of *Moniliophthora perniciosa* taking as a reference the present and comparing with four future scenarios, two for 2050 (moderate RCP 4.5 and extreme RCP 8.5) and two for 2070 (moderate RCP 4.5 and extreme RCP 8.5). Ranges: -1: Expansion, 0: Stability, 1: No changes and 2: Loss.

hacia la región costa, hacia la zona de la región sierra y en la región amazónica (Figura 2). En el escenario 4.5 de ambos periodos fue donde se observaron las mayores ampliaciones de rango en la región amazónica. Esta expansión implicaría que, de mantenerse las mismas plantaciones de cacao, muchas de estas se verían afectadas por el fitopatógeno, lo cual puede determinar disminuciones drásticas en la producción cacaotera en el país y afectaciones directas a la economía de los productores.

Para el presente, *M. perniciosa* ocupó un área de distribución potencial de 31 177 km<sup>2</sup> y las plantaciones de cacao en Ecuador continental ocupan un área de 1 482 km<sup>2</sup>. De este total de áreas de cultivo, el 74% (1 097 km<sup>2</sup>) coincide con áreas de condiciones adecuadas para el fitopatógeno y solo 385 km<sup>2</sup> están libres de la presencia de condiciones adecuadas para el mismo (Figura 1A). Para la proyección del 2050 bajo un escenario moderado (RPC 4.5), se obtuvo un área de 39 295 km<sup>2</sup> con distribución potencial de *M. perniciosa*, y 1 149 km<sup>2</sup> coinciden con las zonas plantadas con cacao actualmente, lo que representa el 77.5% de la extensión de cultivos (Figura 1B). En el 2070, bajo

este mismo escenario, un área de 41 791 km<sup>2</sup> tiene condiciones climáticas adecuadas para la distribución potencial de *M. perniciosa*, de las cuales 1 157 km<sup>2</sup> coinciden con áreas de cultivo de cacao (78% del área de cultivos de cacao) (Figura 1C). Para el escenario extremo RPC 8.5 la situación se mantiene similar. Para el 2050, los resultados del modelo mostraron un área de 39 098 km<sup>2</sup> con condiciones climáticas adecuadas para *M. perniciosa*, y de estos 1 157 km<sup>2</sup> coinciden con los terrenos ocupados por las plantaciones de cacao en la actualidad (78% de áreas de cultivo, Figura 1D). En la proyección para el 2070, bajo este mismo escenario extremo RCP 8.5, el área con condiciones climáticas adecuadas para *M. perniciosa* es de 41 029 km<sup>2</sup>, y coincide con el 78% (1 158 km<sup>2</sup>) de terrenos ocupados por plantaciones de cacao (Figura 1E).

De manera general, en la mayoría de las plantaciones actuales de cacao en Ecuador continental, el modelo predice que pudieran estar infectadas por *M. perniciosa*. Si se establecen nuevas plantaciones de cacao, sin antes determinar cuáles pudieran ser las áreas más propicias para su cultivo, se correría el riesgo de que estas no fueran rentables a largo plazo por el

**Cuadro 1. Variaciones en la extensión (km<sup>2</sup>) del área potencial de la especie *Moniliophthora perniciosa* en Ecuador continental en diferentes escenarios de cambio climático, RCP 4.5 para los años 2050 y 2070 y RCP 8.5 para los años 2050 y 2070, en comparación con su distribución potencial actual.**

**Table 1. Variations in the extension (km<sup>2</sup>) of the potential area of the *Moniliophthora perniciosa* species in continental Ecuador in different climate change scenarios, RCP 4.5 for the years 2050 and 2070 and RCP 8.5 for the years 2050 and 2070, compared to its current potential distribution.**

Escala	Descripción	Escenario 4.5 2050	Escenario 4.5 2070	Escenario 8.5 2050	Escenario 8.5 2070
- - - - - área (km <sup>2</sup> ) - - - - -					
-1	Rango de ampliación †	8 356	10 883	8 400	10 392
0	Estabilidad †	250 973	248 446	250 929	248 937
1	Sin cambios †	30 929	30 908	30 698	30 637
2	Rango de pérdida †	238	269	479	540

† Estos cálculos se realizaron tomando como punto de comparación un área de presencia potencial de *Moniliophthora perniciosa* de 31 177 km<sup>2</sup> y un área de ausencia potencial de 259 329 km<sup>2</sup>.

† These calculations were made taking as a point of comparison an area of potential presence of *Moniliophthora perniciosa* of 31 177 km<sup>2</sup> and an area of potential absence of 259 329 km<sup>2</sup>.

impacto negativo de enfermedades como la provocada por *M. perniciosa*, lo cual implicaría grandes pérdidas para los productores. Se ha demostrado mediante inoculaciones cruzadas de cepas de *M. perniciosa* en distintos materiales vegetales de cacao y en zonas geográficas alejadas, que la especie posee un alto grado de adaptación y de patogenicidad (Gramacho *et al.*, 2016; Másmela-Mendoza, 2019). Estas condiciones bioclimáticas presentes en la región costa de Ecuador, donde se cultiva la mayor parte del cacao, son propicias para el desarrollo de otro fitopatógeno de gran importancia para este cultivo, el hongo *Moniliophthora roreri*, el cual puede desarrollarse a la par de *M. perniciosa* (Evans, 2016). La coexistencia de estos dos fitopatógenos en áreas de cultivo de cacao pudiera conllevar a consecuencias catastróficas para la industria cacaotera ecuatoriana.

Los antecedentes sobre las afectaciones de *M. perniciosa* en plantaciones de cacao en otros países sugieren que la prevención es el arma más fuerte para combatir esta enfermedad. Una vez que este fitoparásito ataca, es muy poco probable que las plantaciones de cacao tengan una recuperación exitosa, ya que al atacar todos los puntos de crecimiento activos de la planta es muy difícil protegerla (Evans, 2016). Además, es muy complicado proteger de la infección las áreas con grandes extensiones de cacao contiguas, por las dificultades logísticas y financieras que implica (Evans, 2016).

No obstante, existen medidas de control integral para contrarrestar el patógeno, donde el control

de la enfermedad depende de un buen manejo agroecológico, en forma sistemática y tecnificada en el agroecosistema cacao. De esta manera, disminuye la incidencia del patógeno *M. perniciosa*, y se incrementa el número de frutos por planta, peso promedio del fruto y los rendimientos para su productividad (Hernández-Villegas, 2016). Otra estrategia de control que se ha venido estableciendo es la utilización de agentes biológicos, como hongos y bacterias, pertenecientes al género *Bacillus* sp., que coexisten como comunidad microbiana asociada al cultivo de cacao, y que pueden actuar como antagonistas naturales (Tirado-Gallego, Lopera y Ríos, 2016). Estas bacterias son formadoras de endosporas, pueden producir enzimas líticas que degradan la pared celular e inhiben el crecimiento de patógenos de cacao, y tienen la habilidad para colonizar los cultivos y persistir en ellos mientras suprimen la enfermedad (Tirado-Gallego *et al.*, 2016).

Por estas razones, si se expanden las áreas del cultivo de cacao en el futuro, se debe tener como base estudios como el que se presenta en esta investigación, que demuestran la necesidad de elegir aquellos sitios donde la probabilidad de presencia de patógenos sea baja o nula y existan condiciones óptimas para el desarrollo de *T. cacao*. De esta manera no solo se estaría apoyando a una industria que destaca como una de las de mayor prestigio en Ecuador, sino que se estaría garantizando el bienestar de muchas familias que dependen económicamente de las plantaciones cacaoteras. Además, se contribuiría a la conservación de la biodiversidad en el país, pues las plantaciones de



cacao generalmente se consideran entre los sistemas manejados biológicamente más ricos y se supone que son un hábitat alternativo importante para varias especies de aves, murciélagos, insectos y epifitas (Haro-Carrión, Lozada, Navarrete y de Koning, 2009; Morales-Linares, García, Flores, Krömer y Toledo, 2020).

## CONCLUSIONES

De manera general, las áreas potenciales con condiciones adecuadas para el desarrollo de *M. pernicioso* se localizan en la región costa de Ecuador. Las variables climáticas que más influyeron en el modelo fueron la estacionalidad de la precipitación y la precipitación del cuatrimestre más lluvioso, lo cual coincide con la ecología de la especie. En comparación con el modelo para el presente, hubo variaciones entre los diferentes escenarios de cambio climático y se observaron ampliaciones del rango en todos los períodos y escenarios. Para el presente, el fitopatógeno se distribuye de manera potencial en 1 097 km<sup>2</sup> (74%) del área ocupada por plantaciones de cacao. Para el escenario moderado RPC 4.5 para los años 2050 y 2070 el patógeno ocupa 1 149 km<sup>2</sup> (78%) y 1 157 km<sup>2</sup> (78%) respectivamente. Para el escenario extremo RCP 8.5 en 2050 y 2070, el patógeno ocupa 1 157 km<sup>2</sup> (78%) y 1 158 km<sup>2</sup> (78 %), respectivamente. *Moniliophthora pernicioso* constituye un gran riesgo para el desarrollo exitoso del cultivo de cacao en Ecuador continental y de no tomarse medidas preventivas en la actualidad, el impacto negativo a futuro afectará la economía a nivel de país y de las familias productoras.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

La mayoría de los datos generados o analizados durante este estudio se incluyen en este artículo publicado. Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio, que no aparecen en este artículo, están disponibles con el autor correspondiente a solicitud razonable.

## 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 roreri* y *Moniliophthora pernicioso* 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: Y.F.S., A.A.M.S., A.H.P.V. y J.P.U.Z.; Administración de proyecto y recursos: Y.F.S.; Procesamiento y edición de datos: Y.F.S. y A.A.M.S.; Redacción del documento: Y.F.S., A.A.M.S. y A.H.P.V.; Revisión final del manuscrito: Y.F.S., A.H.P.V. y J.P.U.Z.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a la coordinación de la carrera Ingeniería Ambiental.

## LITERATURA CITADA

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7-20.
- Armenta-Porrás, 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 17 de diciembre, 2021, desde <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf>
- Beck, J. (2013). Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses?. *Climatic Change*, 116, 177-189. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0481-x>
- Campuzano, H. (1980). La moniliasis del cacao. *El Cacaotero Colombiano*, 13, 21-24.
- Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebbler, D. P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11(8), 710-715. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01104-8>
- Esri (2011). *ArcGis User's Guide. Released 10.1*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.

- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Peterson, A. T. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221-229. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- Evans, H. C. (2016). Witches' Broom Disease (*Moniliophthora perniciosa*): History and Biology. In B. A. Bailey, & L. W. Meinhardt (Eds.). *Cacao Diseases* (pp. 137-177). Cham, Switzerland: Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_5)
- Farfán, F. P. (2018). *Agroclimatología del Ecuador*. Quito, Ecuador: Editorial Abya-Yala. ISBN: 978-9978-10-310-4
- Gramacho, K. P., Luz, E. D. M. N., da Silva, F. S., Lopes, U. V., Pires, J. L., & Pereira, L. (2016). Pathogenic variability of *Moniliophthora perniciosa* in three agroecological zones of the cacao region of Bahia, Brazil. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16(1), 7-13. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n1a2>
- Haro-Carrión, X., Lozada, T., Navarrete, H., & de Koning, G. H. J. 2009. Conservation of vascular epiphyte diversity in shade cacao plantations in the Chocó Region of Ecuador. *Biotropica*, 41(4), 520-529. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00510.x>
- Hernández-Villegas, J. J. (2016). Incidencia de la escoba de bruja (*Crinipellis perniciosa*) sobre el rendimiento de dos agroecosistemas de cacao con diferentes condiciones de manejo. *Bioagro*, 28(1), 059-064.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Ireland, K. B., & Kriticos, D. J. (2019). Why are plant pathogens under-represented in eco-climatic niche modelling? *International Journal of Pest Management*, 65(3), 207-216. <https://doi.org/10.1080/09670874.2018.1543910>
- Jeschke, J. M., & Strayer, D. L. (2008). Usefulness of Bioclimatic Models for Studying Climate Change and Invasive Species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 1-24. <http://doi.org/10.1196/annals.1439.002>
- Kogo, B. K., Kumar, L., & Koech, R. (2021). Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. *Environment Development and Sustainability*, 23, 23-43. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00589-1>
- 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.
- Meinhardt, L. W., Rincones, J., Bailey, B. A., Aime, M. C., Griffith, G. W., Zhang, D., & Pereira, G. A. G. (2008). *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom disease of cacao: what's new from this old foe?. *Molecular Plant Pathology*, 9, 577-588.
- Morales-Linares, J., García-Franco, J. G., Flores-Palacios, A., Krömer, T., & Toledo-Aceves, T. (2020). The role of shaded cocoa plantations in the maintenance of epiphytic orchids and their interactions with phorophytes. *Journal of Plant Ecology*, 13(1), 27-35. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtz052>
- Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlik, P., Ahammad, H., Deryng, D., ... Willenbockel, D. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3274-3279. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>
- Olsson, L., Opondo, M., Tschakert, P., Agrawal, A., Eriksen, S., Ma, S., ... Zakeldeen, S. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 793-832). New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Osorio-Olvera, L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Townsend-Peterson, A., 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, 1199-1206. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>
- 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, T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49)*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 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. <http://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Soberon, 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>
- Tirado-Gallego, P. A., Lopera-Álvarez, A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Estrategia de control de *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en *Theobroma cacao* L.: revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 417-430. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num3\\_art:517](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:517)
- Ward, J. D., Morh, S. H., Myres, B. R., & Nel, W. P. (2012). High estimates of supply constrained emissions scenarios for long-term climate risk assessment. *Energy Policy*, 51, 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.003>