

POTENCIALES ÁREAS CULTIVABLES DE PASIFLORAS EN UNA REGIÓN TROPICAL CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO



POTENTIAL SUITABLE AREAS FOR PASSIFLORAS CROPS IN A TROPICAL REGION CONSIDERING CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Munar, Andrés Mauricio; Rodríguez Carlosama, Adalberto; Muñoz España, Jorge Luis

 Andrés Mauricio Munar

mauriciomunar4@gmail.com

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia [CEPASS], Neiva, Colombia, Colombia

 Adalberto Rodríguez Carlosama

adalberto.rodriguez@cepass.org

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia [CEPASS], Neiva, Colombia, Colombia

 Jorge Luis Muñoz España

jorge.munoz@cepass.org

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia [CEPASS], Neiva, Colombia, Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

ISSN: 2145-6097

ISSN-e: 2145-6453

Periodicidad: Semestral

vol. 13, núm. 1, 2022

riaa@unad.edu.co

Recepción: 17 Abril 2021

Aprobación: 06 Julio 2021

Publicación: 21 Diciembre 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1302674008/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4637>

Financiamiento

Fuente: Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación [Minciencias] y al Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, Tecnología y la Innovación “Francisco José de Caldas”
N° de contrato: Minciencias Convocatoria 848/2019
Beneficiario: POTENCIALES ÁREAS CULTIVABLES DE PASIFLORAS EN UNA REGIÓN TROPICAL

Resumen: **Contextualización:** El cambio climático y las actividades antrópicas sobre los recursos naturales se constituyen como los principales causantes de la pérdida de biodiversidad y la redistribución de las especies.

Vacío de conocimiento: Sin embargo, los efectos a nivel de comunidades y ecosistemas, así como los impactos en cultivos agrícolas en escala regional, son poco estudiados. Los modelos de distribución de especies se han convertido, por lo tanto, en valiosas herramientas para la predicción de áreas potencialmente aptas para especies cultivables, su gestión y planificación.

Propósito: Este estudio consistió en la predicción de potenciales áreas cultivables de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener), granadilla (*Passiflora ligularis* Juss), y cholupa (*Passiflora maliformis* L.) en una región tropical, a través del modelo MaxEnt, en escenarios de cambio climático.

Metodología: Se utilizaron como datos de entrada (para el modelo MaxEnt) registros de presencia de las especies analizadas, obtenidos a partir de sus coordenadas geográficas. En total, fueron usados 141 registros de presencia de maracuyá, 256 registros de granadilla y 40 registros de cholupa, así como 12 variables bioclimáticas para las proyecciones actuales y futuras en los periodos 2050 y 2070, considerando así dos escenarios RCPs (*Representative Concentration Pathways*) del *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) (RCP 4.5 y RCP 8.5).

Resultados y conclusiones: Los resultados revelan que las potenciales áreas cultivables para las especies analizadas podrían pronosticarse a través de MaxEnt utilizando registros de presencia en campo y variables bioclimáticas. Así mismo, las simulaciones indicaron que las áreas de ocurrencia potencial para las especies analizadas podrían disminuir en el futuro dependiendo de los escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5) para los periodos 2050 y 2070. Para los cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa, las mayores reducciones en las áreas de ocurrencia potencial corresponden al 23 %, 25 % y 31 % respectivamente, y se presentarían en el período 2070 en un escenario pesimista (RCP 8.5). Este es el primer estudio que pronostica las potenciales áreas cultivables de pasifloras

CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Munar, A., Rodríguez, A. y Muñoz, J. (2022). Potenciales áreas cultivables de pasifloras en una región tropical bajo escenarios de cambio climático. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 109 - 129. <https://doi.org/10.22490/21456453.4637>

utilizando el modelo Maxent y escenarios de cambio climático en escala regional en una región tropical. El abordaje propuesto puede proveer importantes herramientas para la gestión y aprovechamiento sostenible de las especies estudiadas.

Palabras clave: *Passiflora edulis* var *flavicarpa* Degener, *Passiflora ligularis* Juss, *Passiflora maliformis* L, MaxEnt.

Abstract: Contextualization: Climate change and anthropic activities on natural resources are the main causes of the biodiversity loss and the species redistribution.

Knowledge gap: However, the effects at the community and ecosystem levels, as well as the impacts on agricultural crops on a regional scale, are little studied. Species distribution models have become valuable tools for the prediction of areas potentially suitable for cultivable species, their management and planning.

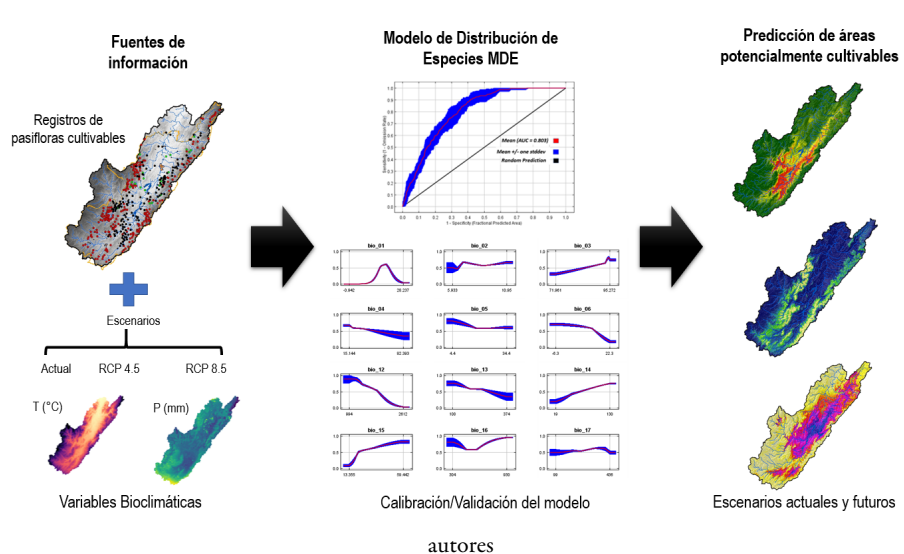
Purpose: This research pretends predict the potential of cultivable areas for passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener), grenadina (*Passiflora ligularis* Juss), and sweet calabash (*Passiflora maliformis* L.), in a tropical region, using the MaxEnt model and considering climate change scenarios.

Methodology: Occurrence records of the analyzed species, obtained from their geographic coordinates, were used as input data for the MaxEnt model. In total, 141 occurrence records of passion fruit, 256 records of grenadina and 40 records of sweet calabash were used for the MaxEnt model, as well as 12 bioclimatic variables for the current and future projections in the 2050 and 2070 periods, considering two *Representative Concentration Pathways* RCPs from the CMIP5 (RCP 4.5 and RCP 8.5).

Results and conclusions: The results revealed that the potential suitable areas for the analysed species could be predicted from the MaxEnt model, using field records and bioclimatic variables. Likewise, the simulations indicated that the areas of potential occurrence for the analysed species could decrease in the future, considering climatic scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) for the periods 2050 and 2070. For the passion fruit, grenadina and sweet calabash crops, the greatest reductions in the potential suitable areas correspond to 23 %, 25 % and 31 % respectively, and would occur in the 2070 period in a pessimistic scenario (RCP 8.5). This is the first study that predicts the potential suitable areas for passiflora's crops, using the MaxEnt model and contemplating climate change scenarios on a regional scale in a tropical region. The proposed approach can provide important tools for the management and sustainable use of the species studied.

Keywords: *Passiflora edulis* var *flavicarpa* Degener, *Passiflora ligularis* Juss, *Passiflora maliformis* L, Maxent.

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad hoy en día es el cambio climático, el cual tiene impacto en los ecosistemas, la sociedad y la economía. Los impactos del cambio climático y los cambios en el uso/cobertura del suelo son dos de los principales causantes de la pérdida de biodiversidad, redistribución geográfica de las especies y disminución de la producción agrícola en gran escala (Pecl et al., 2017; Pareek, et al., 2020; Giannini et al., 2013). Sin embargo, los impactos del cambio climático a nivel de ecosistemas y comunidades, así como los efectos en cultivos agrícolas en pequeña escala, son poco estudiados.

En las próximas décadas se tiene previsto que el cambio climático podría impactar drásticamente la distribución de especies, especialmente en los bordes de las ecoregiones, causando fragmentación, acelerando la pérdida de biodiversidad (Werneck et al., 2011; Scanes, 2018), afectando directamente cultivos agrícolas (Lobell et al., 2011, Polce et al., 2014, Rosenzweig et al., 2014) y polinizadores (Bartomeus et al., 2013; Burkle et al., 2013; Vanbergen & the Insect Pollinators Initiative, 2013; Elias et al., 2017). Así mismo, los cambios significativos en los patrones de las principales variables meteorológicas (p. ej., temperatura y precipitación) que se prevén para el final del siglo XXI (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013a), conllevan a la necesidad de proponer herramientas de gestión que ayuden a la conservación de los ecosistemas frente a diferentes usos, y que permitan el entendimiento de la dinámica, estructura, funcionamiento y monitoreo.

En los últimos años, se han desarrollado modelos de distribución de especies (MDE) para proyectar las pasadas, presentes y futuras condiciones climáticas, así como estudiar la distribución geográfica de diversas especies, lo que permite identificar áreas de estabilidad climática y predecir los impactos del cambio climático sobre la diversidad de especies (Thuiller et al., 2004; Collevatti et al., 2011; Espíndola et al., 2012; Collevatti et al., 2014). Dentro de los MDE más utilizados se incluyen los modelos GARP (Stockwell, 1999), BIOCLIM (Nix, 1986), CLIMEX (Sutherst & Maywald, 1985) y Máxima Entropía [Maxent] (Phillips et al., 2006), siendo este último, uno de los modelos que presenta más ventajas, entre ellas: (1) Los datos de las especies de entrada pueden ser datos de solo presencia; (2) se puede producir directamente un mapa de ocurrencia de hábitat de la especie analizada; (3) se puede evaluar la importancia de las variables ambientales de manera individual a través de la prueba de Jackknife; (4) se pueden utilizar datos continuos y categóricos como variables de entrada.

Recientes estudios han empleado el modelo MaxEnt y escenarios del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (IPCC, 2013b) para investigar el efecto del cambio climático en cultivos agrícolas en gran escala (Khubaib et al., 2021; Läderach et al., 2017; Shukla et al., 2020; Su et al., 2021). Estos estudios han sido de gran interés para determinar la redistribución geográfica de especies agrícolas, especialmente aquellas más vulnerables al cambio climático y a las condiciones ambientales como las pasifloras (Fernandes et al., 2019; Scherer, 2014; Giannini, et al., 2013). Las pasifloras comprenden alrededor de 520 especies (Wohlmuth et al., 2010) que se encuentran predominantemente en regiones tropicales y subtropicales (Araújo et al., 2017) y su distribución geográfica depende directamente de la temperatura y la precipitación (Scherer, 2014).

Colombia posee la mayor diversidad de especies de la familia *Passifloraceae* en el mundo, registrando 170 especies (Ocampo et al., 2007; Ocampo, 2013a), siendo las más cultivadas: maracuyá (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa Degener*), granadilla (*Passiflora ligularis* Juss), gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims), curuba (*Passiflora tripartita* var. *mollissima*) y cholupa (*Passiflora maliformis* L.) (Fischer & Miranda, 2021). El país es el tercer mayor productor mundial de maracuyá (~5%) por detrás de India (~9%) y Brasil (~60%) (United States Agency for International Development [USAID], 2014).

Especies cultivables de pasifloras, como el maracuyá, la granadilla y la cholupa, se han visto fuertemente amenazadas por el cambio climático (Bezerra et al., 2019; Loaiza y Mesa, 2019; Kjølhl et al., 2011; Burkle et al., 2013; Vanbergen y The Insect Pollinators Initiative, 2013; Polce et al., 2014; Settele et al., 2016; Bejarano y Ibarra, 2018; Montero y Laiton, 2016), lo que impacta la polinización natural y disminuye su rendimiento. Sin embargo, en la escala regional existen muy pocos estudios que determinen las condiciones climáticas futuras y la redistribución geográfica de estas especies cultivables, por medio de modelos de distribución, contemplando escenarios de cambio climático. Teniendo en cuenta esto, el objetivo de este estudio fue estimar las potenciales áreas cultivables actuales y futuras de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa Degener*), granadilla (*Passiflora ligularis* Juss), y cholupa (*Passiflora maliformis* L.) en una región tropical, usando el modelo MaxEnt, considerando escenarios de cambio climático (Representative Concentration Pathway [RCP 4.5 y RCP 8.5]).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área seleccionada para el estudio fue la cuenca alta del río Magdalena (1°29' y 3°52' N, 74°23' y 76°39' W), Colombia (Fig. 1), que abarca el departamento del Huila. La selección de la cuenca se debió a que el departamento del Huila es el responsable del 45 % de la producción nacional de maracuyá, del 50 % de la producción de granadilla en el país y además lidera la producción nacional de cholupa (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [Minagricultura], 2018). Para la delimitación de la cuenca se utilizó el modelo digital de elevación MDE derivado de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Farr et al., 2007), que cuenta con una resolución espacial de 90m (United States Geological Survey [USGS], 2005).

A partir del MDE se realizaron operaciones de geoprocésamiento utilizando el software ArcGIS 10.2. La secuencia de operaciones fue la siguiente:

- ✓ Relleno de fallas del modelo digital de elevación, cuyo objetivo fue corregir valores nulos en la matriz y zonas muertas de flujo.
 - ✓ Determinación de la dirección de flujo para estimar el camino más probable para la red de drenaje a partir de una evaluación de declividad de cada píxel.
 - ✓ Mapeo del flujo acumulado para determinar el área drenada por cada píxel.
 - ✓ Definición del área de drenaje de la cuenca.
 - ✓ Definición de la red de drenaje.

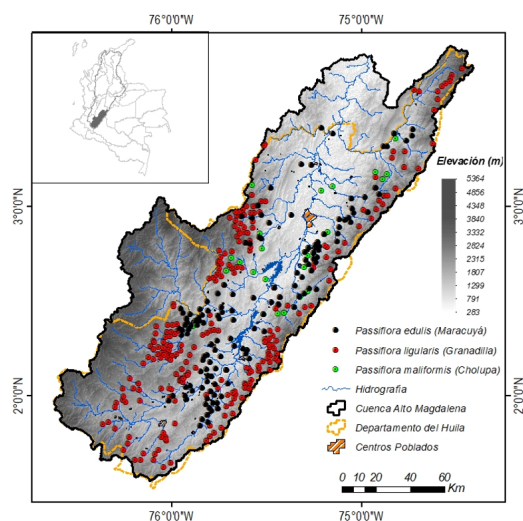


FIGURA 1
Distribución espacial de registros de presencia de cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa en la cuenca alta del río Magdalena.
autores

La cuenca alta del río Magdalena presenta un relieve variado, con altitudes máximas de 5364 m.s.n.m y mínimas de 283 m.s.n.m. En la cuenca alta, nace el río Magdalena, el mayor sistema fluvial de Colombia (área aproximada ~257.000 km²). Así mismo, en la cuenca del río Magdalena se encuentran las principales ciudades del país (Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla) y se concentra aproximadamente el 80% de la población colombiana (Restrepo & Syvitski, 2006).

2.2 Datos bióticos

Los registros de presencia de cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa, y su distribución espacial a partir de sus coordenadas geográficas, se obtuvieron de la base de datos de la Evaluación Agropecuaria del Huila (Gobernación del Huila, 2020). En total, se analizaron 141 registros de presencia de maracuyá, 256 registros de granadilla y 40 registros de cholupa distribuidos en la cuenca alta del río Magdalena (Fig. 1). Todos los registros de presencia se importaron a Microsoft Excel y se guardaron en formato "CSV" para utilizarse como datos de entrada para el modelo de distribución de especies MDE.

2.3 Datos bioclimáticos

Los datos de variables bioclimáticas, utilizadas como entrada para el modelo MaxEnt, se obtuvieron en resolución de 30 segundos (~1 km²) desde la plataforma *WorldClim* (Version 2.0,) para el período actual (Fick & Hijmans, 2017). En la base de datos de Worldclim, el "período actual" se definió entre los años 1970 a 2000 (estos datos se han utilizado ampliamente en la creación de modelos de distribución de especies). En total, se utilizaron 19 variables bioclimáticas de temperatura y precipitación para este período. Es de anotar que las variables bioclimáticas se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar variables más significativas desde el punto de vista ecológico. Estas variables representan tendencias anuales (p. ej., temperatura media anual, precipitación anual), estacionalidad (p. ej., rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (p. ej., temperatura y precipitación del mes más frío y del más cálido).

Las proyecciones para las condiciones climáticas futuras se obtuvieron con base en los cambios climáticos previstos para los períodos 2050 (*average for 2041-2060*) y 2070 (*average for 2061-2080*), teniendo en cuenta los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway) desarrollados por Hadley Center Global Environmental Model (HadGEM2-ES) (Collins et al., 2011) y siguiendo la metodología sugerida por Bezerra et al. (2019). Según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) (IPCC, 2013b), cada escenario RCP representa un "Camino Representativo de Concentración" de Gases Efecto Invernadero

[GEI] y de aerosoles en la atmósfera. Los RCP se describen por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100, siendo 4.5 y 8.5 vatios por metro cuadrado (W/m^2) los escenarios analizados en este estudio y que corresponden a los escenarios moderado y pesimista, respectivamente.

2.4 Modelo de distribución de especies [MDE]

En esta investigación se utilizó el modelo MaxEnt (Phillips et al., 2006) obtenido de manera gratuita desde <http://www.cs.princeton.edu/>. Este modelo determina patrones de distribución para los datos ingresados y luego selecciona los de configuración más probable basado en la maximización de entropía de Shannon (Merow et al., 2013, Phillips et al., 2006). El modelo MaxEnt utiliza el principio de máxima entropía para estimar, a partir de los registros de presencia de las especies analizadas y presentes en las capas bioclimáticas, una distribución de probabilidad (variando entre 0 y 100%) que puede denominarse como índice de ocurrencia de la especie que se está modelando (Phillips et al., 2006; Phillips et al., 2017).

2.5 Análisis estadístico y medidas de desempeño

Para seleccionar las variables bioclimáticas más representativas se realizó un análisis de componentes principales (ACP), considerando como criterios de selección las variables de mayor correlación ($R^2 \geq 0.75$) y el porcentaje de varianza explicado por autovalores ($> 5\%$) (ver Anexo 1). El ACP fue realizado en el software ArcGIS 10.2, siguiendo la metodología propuesta por Moya et al., (2017). A partir de las 19 variables bioclimáticas de temperatura y precipitación analizadas, se seleccionaron 12 variables bioclimáticas de acuerdo con los resultados del ACP (Tabla 1, Anexo 1). Las variables de menor contribución se excluyeron del modelo final para evitar la multicolinealidad de los modelos.

TABLA 1
Variables bioclimáticas seleccionadas como datos de entrada para el modelo Maxent de acuerdo con el ACP.

Código de la variable bioclimática	Descripción
BIO_01	Temperatura media anual
BIO_02	Rango diurno medio de temperatura
BIO_03	Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)
BIO_04	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)
BIO_05	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO_06	Temperatura mínima del mes más frío
BIO_12	Precipitación anual
BIO_13	Precipitación del mes más húmedo
BIO_14	Precipitación del mes más seco
BIO_15	Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)
BIO_16	Precipitación del período más húmedo.
BIO_17	Precipitación del trimestre más seco

autores

El 75 % de los registros de presencia de cada especie, seleccionados al azar, se utilizaron para la etapa de calibración del modelo y el 25 % restante se utilizó para la etapa de validación. Para evaluar el rendimiento del modelo se calcularon las curvas de disponibilidad de hábitat de cada variable y se calcularon las contribuciones de cada una, utilizando la prueba de *Jackknife*. Esta prueba se empleó para medir los factores climáticos dominantes que determinan la distribución potencial de las especies, identificando así las variables bioclimáticas con la mayor contribución (Moratelli et al., 2011).

Para evaluar el desempeño del modelo MaxEnt se utilizaron la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y el área bajo la curva ROC (*Area Under Curve [AUC]*), a través de la plataforma Niche Toolbox (Niche toolbox, 2016; Peterson et al., 2008), lo que permite evaluar las predicciones del modelo que

presentan errores de omisión inferiores al 10%. El desempeño del modelo se clasificó según los valores de AUC, siendo fallido ($0.5 \leq AUC < 0.6$), pobre ($0.6 \leq AUC < 0.7$), razonable ($0.7 \leq AUC < 0.8$), bueno ($0.8 \leq AUC < 0.9$) y excelente ($0.9 \leq AUC \leq 1.0$) (Swets, 1988).

A partir del modelo MaxEnt calibrado/validado se proyectaron las distribuciones actuales y futuras para los períodos 2050 y 2070 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Fig. 2). Las distribuciones fueron basadas en el promedio logístico de 10 réplicas siguiendo la metodología sugerida por Wei et al. (2018), para estimar los índices de ocurrencias que varían entre 0 % (no es probable que ocurra) y 100 % (es más probable que ocurra) (Phillips et al., 2006).

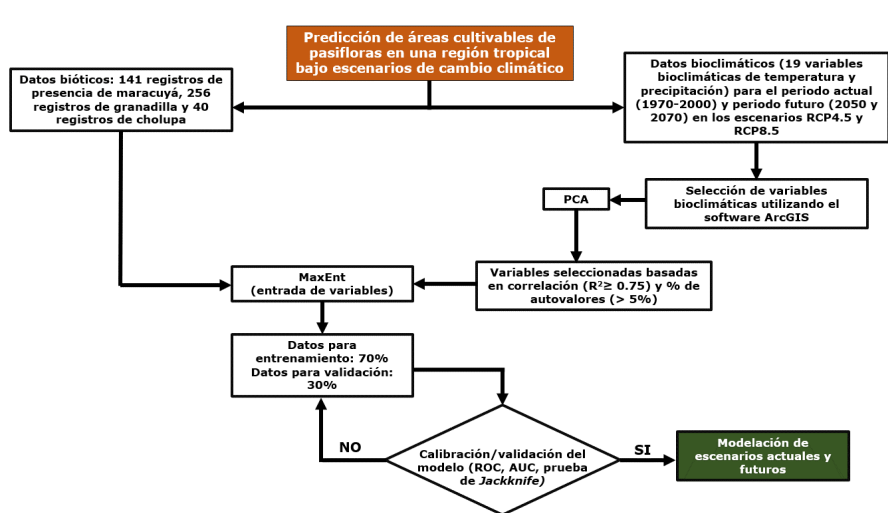


FIGURA 2

Diagrama de flujo para la predicción de áreas cultivables de pasifloras en una región tropical utilizando el modelo MaxEnt considerando escenarios de cambio climático.
autores

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desempeño del modelo MaxEnt: contribución e importancia de las variables bioclimáticas

Los resultados revelan una buena predicción del modelo MaxEnt para las especies de pasifloras: maracuyá, granadilla y cholupa, en la cuenca alta del río Magdalena, con valores de AUC de 0.844; 0.803 y 0.742 respectivamente (Fig. 3).

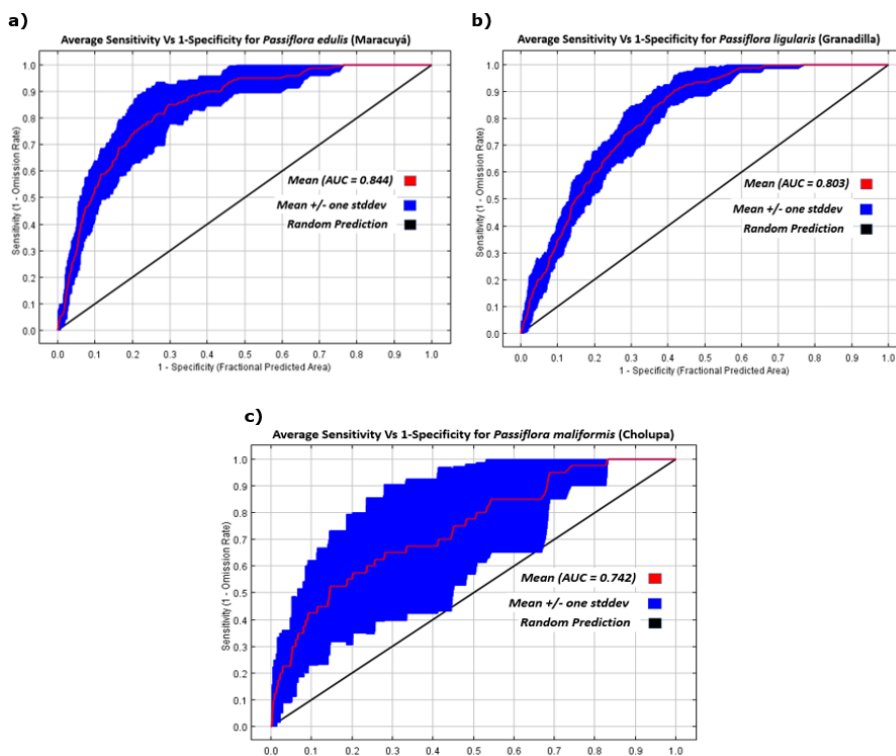


FIGURA 3
 Curvas ROC y valores de AUC para el período actual (10 réplicas) para a) maracuyá, b) granadilla, y c) cholupa.
 autores

Estos resultados fueron consistentes con estudios similares aplicando el modelo Maxent para predecir la distribución potencial de maracuyá (Bezerra et al., 2019; Giannini et al., 2013; Elias et al., 2017; Ocampo et al., 2013) y especies forestales (Wei et al., 2018; Yuan et al., 2015; Remya et al., 2015; Yi et al., 2016; Sharma et al., 2018). Para el cultivo de cholupa, los resultados fueron razonables $0.7 < \text{AUC} < 0.8$. Este comportamiento puede ser debido al número bajo de registros de presencia de la especie (40 registros) utilizados para la calibración del modelo MaxEnt y a las variables bioclimáticas empleadas, que pueden superar del rango de registros observados de la especie (Kumar, 2012).

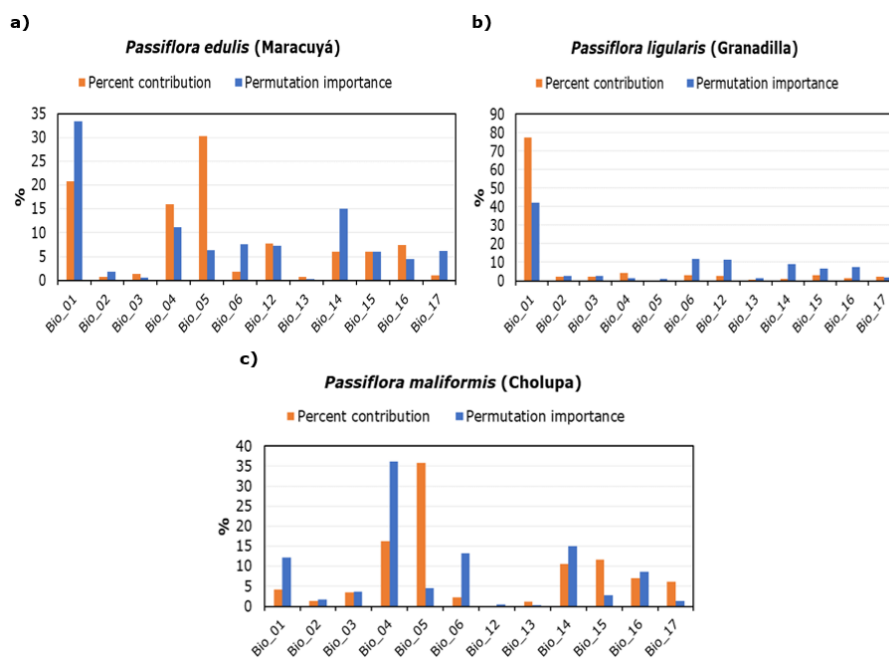


FIGURA 4

Contribución e importancia de permutación de cada variable analizada en el período actual (10 réplicas) para a) maracuyá, b) granadilla y c) cholupa. autores.

Las variables bioclimáticas seleccionadas a partir del ACP describieron bien la distribución actual de maracuyá, granadilla ($0.8 \leq AUC < 0.9$), y de manera razonable la distribución de cholupa ($0.7 \leq AUC < 0.8$). Entre las 12 variables bioclimáticas (Fig. 4), las variables que más contribuyen en los pronósticos de las especies analizadas fueron BIO_05 (Temperatura máxima del mes más cálido y BIO_01 (Temperatura media anual), mientras que las variables de mayor importancia en la permutación corresponden a BIO_01 (Temperatura media anual) y BIO_04 (Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)). Dentro de las variables de precipitación, la variable BIO_14 (Precipitación del mes más seco) es la que más tiene importancia en la permutación con relación a las otras variables analizadas. Este comportamiento puede darse debido a que las especies analizadas son sensibles a los cambios drásticos de temperatura y precipitación, lo que puede afectar su crecimiento, desarrollo y producción (Fischer & Miranda, 2021; Melgarejo, 2015).

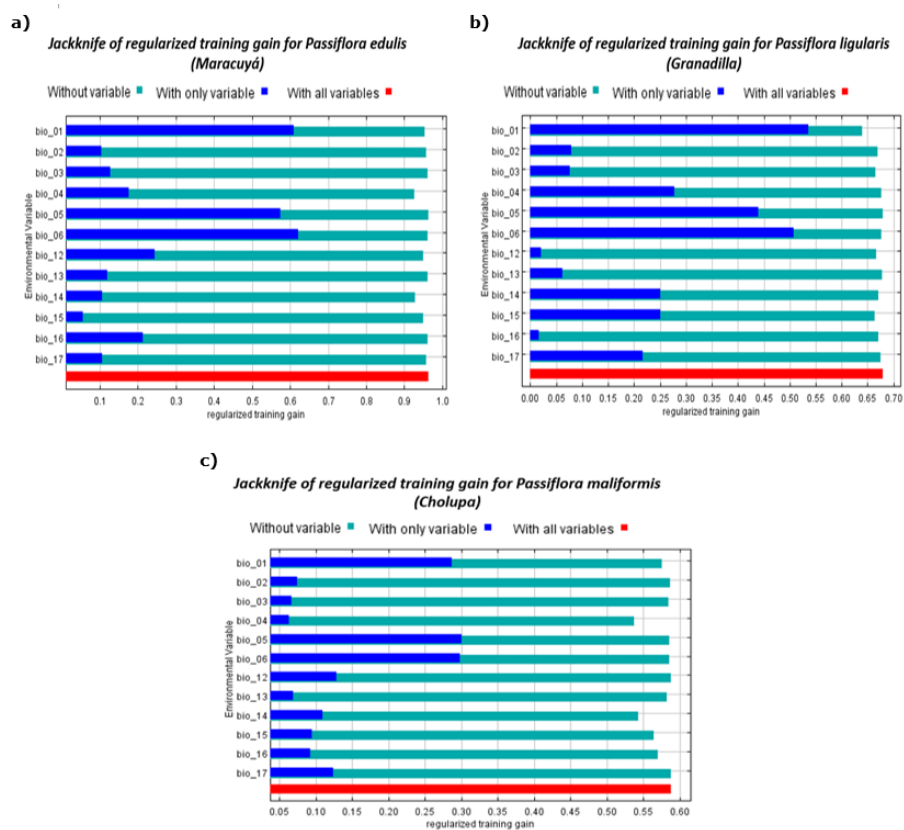


FIGURA 5

Test de Jackknife de la importancia de cada variable en el período actual (10 réplicas) para a) maracuyá, b) granadilla y c) cholupa.
autores

Los resultados de la prueba de Jackknife (Fig. 5) corroboran que las variables BIO_01 y BIO_05 son las de mayor contribución e importancia de permutación. Sin embargo, la variable bioclimática BIO_06 (Temperatura mínima del mes más frío) también reveló significativamente alta ganancia y contribución en los resultados obtenidos para los pronósticos de la distribución actual de las especies analizadas, en comparación con las otras variables utilizadas. Esta variable es importante, debido a que las especies analizadas son altamente sensibles a las heladas y esto puede causar daños severos en los cultivos cuando la temperatura se reduce hasta -2° C (Fischer et al., 2009).

En la Tabla 2 se presentan los valores medios de AUC de las 3 especies analizadas en los períodos futuros (2050 y 2070), de acuerdo con los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados revelan un buen desempeño del modelo, especialmente para maracuyá (AUC > 0.85) y granadilla (AUC > 0.81). Para la especie cholupa, el desempeño del modelo fue bueno para el período 2050 (AUC > 0.81) y razonable para el período 2070 (AUC > 0.74).

TABLA 2
Desempeño del modelo MaxEnt en la distribución de maracuyá, granadilla y cholupa, a partir de dos escenarios diferentes de RCP (4.5 y 8.5) en dos períodos futuros (2050 y 2070).

Especie	Período	RCP	AUCpromedio	AUCpromedio desviación estándar	
Maracuyá	2050	RCP 4.5	0.850	0.034	
		RCP 8.5	0.855	0.033	
	2070	RCP 4.5	0.852	0.035	
		RCP 8.5	0.855	0.042	
	Granadilla	2050	RCP 4.5	0.815	0.024
			RCP 8.5	0.818	0.019
2070		RCP 4.5	0.817	0.016	
		RCP 8.5	0.815	0.042	
Cholupa		2050	RCP 4.5	0.814	0.044
			RCP 8.5	0.821	0.059
	2070	RCP 4.5	0.798	0.049	
		RCP 8.5	0.745	0.085	

autores.

3.2 Modelación de escenarios actuales y futuros con MaxEnt

La distribución potencial en los escenarios actuales y futuros de las potenciales áreas cultivables de maracuyá, granadilla y cholupa en la cuenca alta del río Magdalena se realizó considerando las salidas de la modelación con MaxEnt, con el apoyo del software ArcGIS 10.2. La estimación de pérdida de áreas de ocurrencia se hizo comparando el escenario actual y los escenarios moderado (RCP 4.5) y pesimista (RCP 8.5) para las 3 especies analizadas.

Para el caso del cultivo de maracuyá (Fig. 6), los pronósticos del modelo revelan una pérdida de las áreas de ocurrencia (mayor en la parte baja de la cuenca), especialmente en las regiones comprendidas entre los 400 y 1100 m. s. n. m., donde el porcentaje de ocurrencia esperado de la especie es bajo. Por otro lado, los resultados revelan áreas con mayor porcentaje de ocurrencia (> 60 %) de la especie en la parte alta de la cuenca en los escenarios futuros, donde se espera una redistribución geográfica de la especie en zonas con altitudes comprendidas entre 1100 y 1600 m. s. n. m. Los resultados revelan que para el período 2070, en el escenario pesimista (RCP 8.5), se pronostican las mayores pérdidas en las áreas de ocurrencia con valores superiores al 23 % (Tabla 3), mientras que en el escenario moderado (RCP 4.5) se podrían presentar pérdidas en las áreas de ocurrencia con valores máximos del 6.3 % y mínimos del 4.95 %. Estos resultados se han observado previamente en ambientes similares (Bezerra et al, 2019; Giannini et al., 2013), donde se evidencia una disminución en las áreas de ocurrencia de la especie y de sus polinizadores debido al cambio climático. Así mismo, a partir de los resultados obtenidos, se observa una redistribución de la especie a zonas potenciales de mayor altitud, principalmente debidas al aumento en la temperatura, disminución en la precipitación (menor disponibilidad de agua) y nuevas características fisicoquímicas del suelo. En estas

nuevas zonas de redistribución será necesario la implementación de nuevas prácticas agronómicas, debido a los posibles cambios en la fisiología de la especie (Ocampo et al., 2013).

Con relación al cultivo de granadilla (Fig. 7, Tabla 3), los resultados obtenidos indican pérdidas en las áreas de ocurrencia ligeramente mayores a las pronosticadas en el cultivo de maracuyá. La redistribución geográfica de las áreas potenciales para el cultivo presenta un porcentaje mayor de ocurrencia (>70 %) en zonas con altitudes comprendidas entre 1300 y 2300 m. s. n. m., coincidiendo con lo reportado previamente por Osorio et al. (2020). Así mismo, los resultados revelan que las pérdidas esperadas en las áreas de ocurrencia para el período 2070 son del orden de 4.95 % para el escenario moderado (RCP 4.5) y cercanas al 25 % en el escenario pesimista (RCP 8.5).

Los resultados obtenidos para el cultivo de cholupa revelan la mayor pérdida en las áreas de ocurrencia pronosticadas por MaxEnt, en comparación con las demás especies analizadas (Fig. 8, Tabla 3). El mayor porcentaje de pérdida en las áreas de ocurrencia se pronostica para las zonas con altitudes bajas comprendidas entre 400 y 1000 m. s. n. m. Los pronósticos muestran que las mayores pérdidas en las áreas de ocurrencia en el escenario pesimista (RCP 8.5) son superiores al 31% para el período 2070, mientras que las menores pérdidas se pronostican en el escenario moderado (RCP 4.5) para el período 2050 con pérdidas del orden del 6 % en las áreas de ocurrencia. Sin embargo, la información existente sobre la especie es limitada, siendo en la mayoría de los casos extrapolada de información proveniente del cultivo de maracuyá (Ocampo et al., 2015).

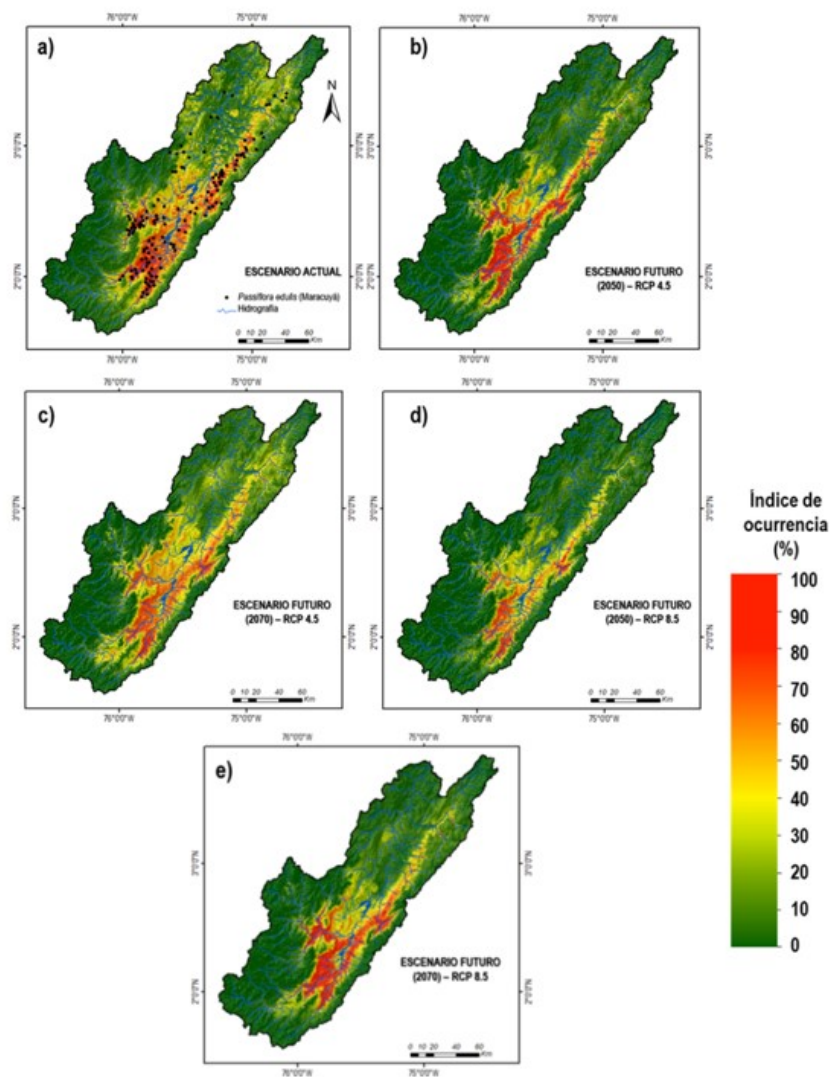


FIGURA 6

Áreas de distribución del cultivo de maracuyá en la cuenca alta del río Magdalena para el periodo actual (1970 a 2000) y dos periodos futuros (2050 y 2070) contemplando escenarios diferentes de RCP (4.5 y 8.5).
autores

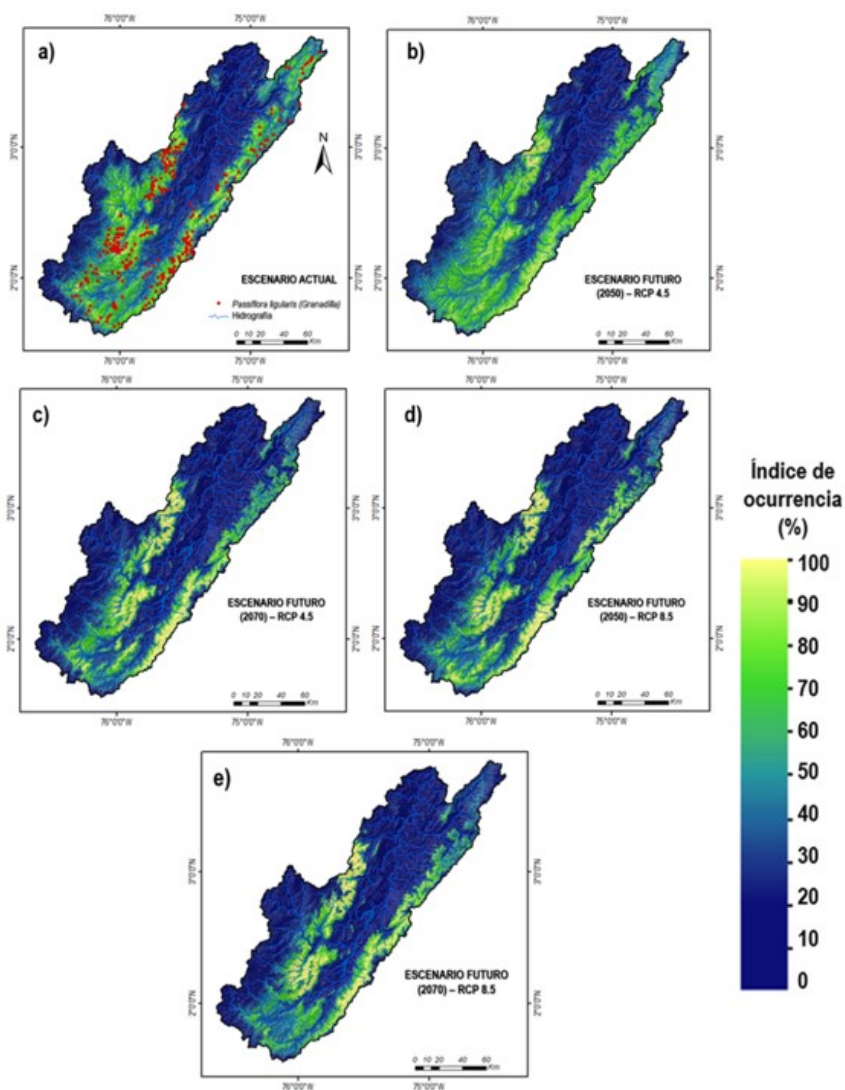


FIGURA 7

Áreas de distribución del cultivo de granadilla en la cuenca alta del río Magdalena para el periodo actual (1970 a 2000) y dos periodos futuros (2050 y 2070), teniendo en cuenta escenarios diferentes de RCP (4.5 y 8.5).
autores

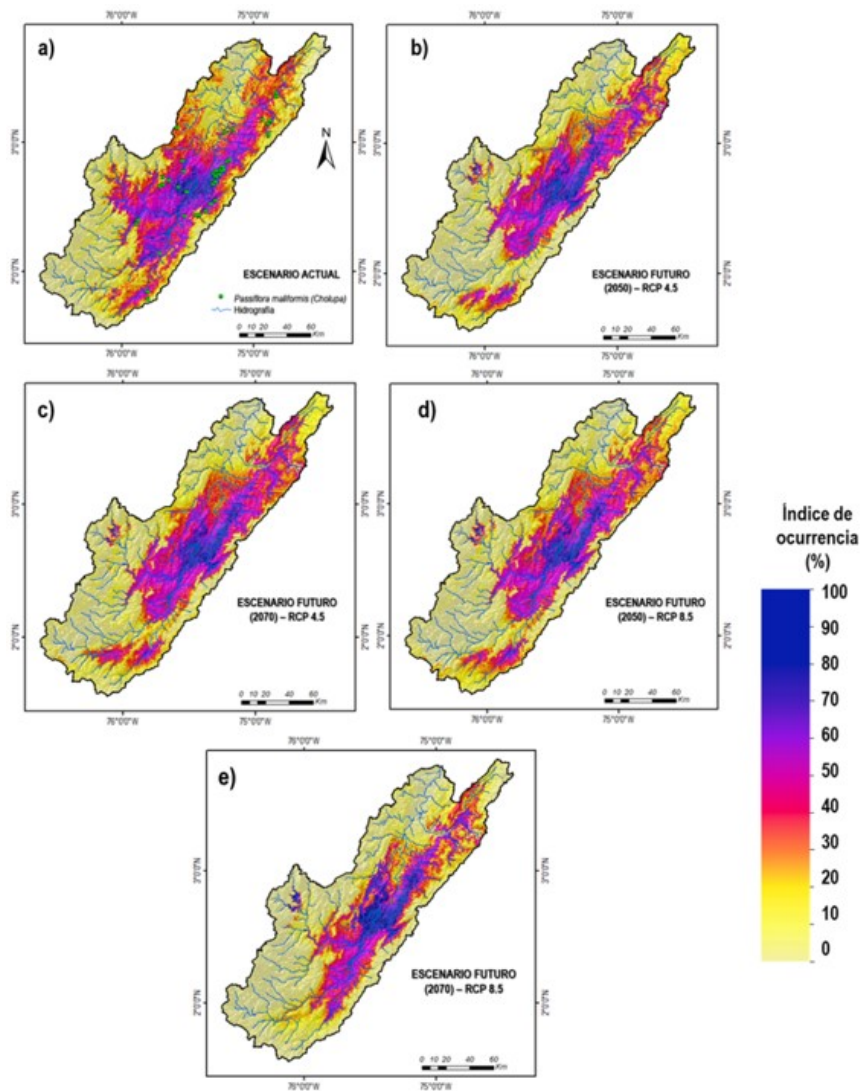


FIGURA 8

Áreas de distribución del cultivo de cholupa en la cuenca alta del río Magdalena para el periodo actual (1970 a 2000) y dos periodos futuros (2050 y 2070) considerando escenarios diferentes de RCP (4.5 y 8.5).
autores

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los pronósticos del modelo MaxEnt con la estimación de las áreas de ocurrencia potencial, pérdidas de áreas estimadas en el escenario actual y pérdidas de área estimadas en futuros escenarios (RCP 4.5, 2050;2070 y RCP 8.5, 2050;2070) para los cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa en la cuenca alta del río Magdalena.

TABLA 3
 Áreas de ocurrencia potencial y pérdidas de áreas en el escenario actual y los futuros escenarios (RCP 4.5, 2050;2070 y RCP 8.5, 2050;2070) para los cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa en la cuenca alta del río Magdalena.

Especie	Escenario	Áreas de ocurrencia potencial (ha)	Potencial pérdida de área	
			(ha)	(%)
Maracuyá	Actual Vs RCP 4.5 (2050)	64.242,00	3.182,00	4,95%
	Actual Vs RCP 4.5 (2070)	64.242,00	4.042,00	6,29%
	Actual Vs RCP 8.5 (2050)	64.242,00	4.902,00	7,63%
	Actual Vs RCP 8.5 (2070)	64.242,00	15.050,00	23,43%
Granadilla	Actual Vs RCP 4.5 (2050)	52.116,00	1.548,00	2,97%
	Actual Vs RCP 4.5 (2070)	52.116,00	2.580,00	4,95%
	Actual Vs RCP 8.5 (2050)	52.116,00	3.956,00	7,59%
	Actual Vs RCP 8.5 (2070)	52.116,00	12.986,00	24,92%
Cholupa	Actual Vs RCP 4.5 (2050)	44.376,00	2.666,00	6,01%
	Actual Vs RCP 4.5 (2070)	44.376,00	5.246,00	11,82%
	Actual Vs RCP 8.5 (2050)	44.376,00	6.966,00	15,70%
	Actual Vs RCP 8.5 (2070)	44.376,00	13.846,00	31,20%

autores

Las potenciales áreas de ocurrencia cultivables para las 3 especies analizadas sugieren que las especies pueden cambiar su actual área de ocurrencia hacia nuevas áreas, especialmente aquellas localizadas en la parte alta de la cuenca del río Magdalena. Las predicciones a partir del modelo MaxEnt indican que las pérdidas en las áreas de ocurrencia potencial tendrían un aumento gradual (2070 > 2050 > período actual), siendo mayores en el escenario pesimista (RCP 8.5) que en el moderado (RCP 4.5), como se ha encontrado en previos estudios Donoghue & Edwards, 2014; Petitpierre et al., 2016). La reducción en las áreas de ocurrencia de las especies analizadas podría generar que la polinización resulte afectada, así como la productividad de los cultivos y, por consiguiente, la economía de las regiones (Settele et al., 2016). Así mismo, los impactos del cambio climático en las áreas de ocurrencia pueden afectar directamente la fenología de algunas especies de plantas y las interacciones planta-polinizador, que se volverían más vulnerables en paisajes modificados (Kjøhl, et al., 2011; Burkle et al., 2013; Vanbergen & the Insect Pollinators Initiative, 2013; Polce et al., 2014, Settele et al., 2016).

3.3 Capacidades del modelo MaxEnt y limitaciones

Los resultados obtenidos a partir del modelo MaxEnt, para la predicción de potenciales áreas cultivables de maracuyá, granadilla y cholupa en la cuenca alta del río Magdalena, muestran que el desempeño del modelo es satisfactorio para representar los patrones de distribución actual y potencial de las especies analizadas considerando escenarios de cambio climático. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por gestores y

diseñadores de políticas para la selección del tipo de estrategia que debería implementarse para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Dentro de las limitaciones o incertezas en los resultados obtenidos pueden incluirse:

i. En la modelación con MaxEnt se utilizaron variables bioclimáticas (temperatura y precipitación) excluyendo factores abióticos (p.ej., tipo de suelo, hidro-geología, altitud), que pueden ser variables significativas para la distribución de especies (Zhang et al., 2018). Los factores abióticos no se consideraron debido a que la altitud es una variable proxy que podría generar correlaciones con las variables de temperatura y precipitación, las cuales son suficientes para determinar los límites espaciales de tolerancia climática de las especies (Kogo et al., 2019; Sun et al., 2013; Woodward, 1987).

ii. Baja resolución espacial de los datos bioclimáticos derivados de la plataforma Worldclim con relación a la cuenca alta del río Magdalena, lo que podría afectar el desempeño del modelo MaxEnt (Kumar, 2012)

iii. Los patrones de distribución actual y potencial derivados de Maxent para las 3 especies analizadas se obtuvieron mediante la extrapolación del modelo, es decir, el modelo MaxEnt se utilizó para hacer predicciones a partir de las variables bioclimáticas que pueden superar el rango de los registros utilizados para calibrar el modelo.

4. CONCLUSIONES

Este estudio consistió en la predicción de potenciales áreas cultivables de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener), granadilla (*Passiflora ligularis* Juss), y cholupa (*Passiflora maliformis* L.), en una región tropical a través del modelo MaxEnt, considerando escenarios de cambio climático. Los resultados revelan que las áreas de ocurrencia potencial para las especies estudiadas disminuirían gradualmente en el futuro, teniendo en cuenta los escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5) para los períodos 2050 y 2070. Las mayores reducciones en las áreas de ocurrencia potencial se presentarían en el período 2070 para el escenario pesimista (RCP 8.5), con reducciones superiores al 23 % para el cultivo de maracuyá, 25 % para el cultivo de granadilla y superiores al 31 % para el cultivo de cholupa. Los potenciales impactos del cambio climático podrían afectar la fisiología de las especies analizadas siendo necesario de la implementación de nuevas prácticas agronómicas.

Este es el primer estudio que contempla el pronóstico de áreas potencialmente cultivables utilizando el modelo Maxent y escenarios de cambio climático en escala regional en una región tropical, contribuyendo a un mejor entendimiento de los patrones de distribución de pasifloras cultivables y de los potenciales impactos del cambio climático. El marco metodológico propuesto puede proveer importantes herramientas para la gestión y aprovechamiento sostenible de los cultivos de maracuyá, granadilla y cholupa en regiones tropicales para enfrentar los desafíos del cambio climático.

MATERIALES SUPLEMENTARIOS

Anexo (pdf)

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación [Minciencias] y al Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, Tecnología y la Innovación “Francisco José de Caldas” por financiar la estancia postdoctoral de A. M. Munar desarrollada en la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia [CEPASS]. Este estudio se deriva de la investigación postdoctoral: “Potenciales impactos del cambio climático en la dinámica hidrológica y en los patrones de distribución de Passifloras en

la cuenca alta del río Magdalena, utilizando modelación hidrológica/modelación de distribución de especies, dados in-situ, técnicas de percepción remota y proyecciones de cambio climático AR5 – IPCC” aprobada por Minciencias en la Convocatoria 848/2019.

LITERATURA CITADA

- Araújo, M. H., Silva, I. C., Oliveira, P. F., Barreto, A. R. R., Konno, T. U. P., Esteves, F. A., Barth, T., Aguiar, F., Lopes, N., Dermenjian, R. K., Guimarães, D. O., Leal, I. C. R., Lasunskia, E. B. & Muzitano, M. F. (2017). Biological activities and phytochemical profile of *Passifloramucronata* from the Brazilian Restinga. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 27(6), 702-710. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2017.07.005>
- Bartomeus, I., Park, M. G., Gibbs, J., Danforth, B. N., Lakso, A. N. & Winfree, R. (2013). Biodiversity ensures plant–pollinator phenological synchrony against climate change. *Ecology letters*, 16(11), 1331-1338. <https://doi.org/10.1111/ele.12170>
- Bejarano, P. A. D. y Ibarra, F. D. M. M. (2018). Impacto de la variabilidad climática y de los sistemas agrarios en el cultivo de granadilla (*Passiflora ligularis* Juss) de Oxapampa, Pasco, Perú. *Biotempo*, 15(1), 41-48.
- Bezerra, A. D. M., Pacheco, A. J., Bomfim, I. G. A., Smagghe, G. & Freitas, B. M. (2019). Agricultural area losses and pollinator mismatch due to climate changes endanger passion fruit production in the Neotropics. *Agricultural systems*, 169, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.002>
- Burkle, L. A., Marlin, J. C. & Knight, T. M. (2013). Plant-Pollinator Interactions over 120 years: Loss of species, Co-Occurrence, and Function. *Science*, 339(6127), 1611–1615. <https://doi.org/10.1126/science.1232728>
- Collevatti, R. G., Nabout, J. C. & Diniz-Filho, J. A. F. (2011). Range shift and loss of genetic diversity under climate change in *Caryocar brasiliense*, a Neotropical tree species. *Tree Genetics & Genomes*, 7(6), 1237-1247. <https://doi.org/10.1007/s11295-011-0409-z>
- Collevatti R. G., Lima-Ribeiro M. S., Terribile L. C., Guedes L. B. S., Rosa F. F. & Telles M. P. C. (2014). Recovering species demographic history from multi-model inference: the case of a Neotropical savanna tree species. *BMC Evolutionary Biology* 14(213). <https://doi.org/10.1186/s12862-014-0213-0>
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., Connor, F. O., Rae, J., Senior, C., Sitch, C., Toterdel, I., Wilthshire, A & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051-1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- Donoghue, M. J. & Edwards, E. J. (2014). Biome Shifts and Niche Evolution in Plants. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 547-572. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091905>
- Elias, M. A. S., Borges, F. J. A., Bergamini, L. L., Franceschinelli, E. V. & Sujii, E. R. (2017). Climate change threatens pollination services in tomato crops in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.026>
- Espíndola, A., Pellissier, L., Maiorano, L., Hordijk, W., Guisan, A. & Alvarez, N. (2012). Predicting present and future intra - specific genetic structure through niche hindcasting across 24 millennia. *Ecology Letters*, 15(7), 649-657. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01779.x>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodríguez, E., Roth Ladislav, Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fernandes, F. F., Esposito, M. P., Gonçalves, M. R., Cardoso-Gustavson, P., Furlan, C. M., Hoshika, Y., Carrari, E., Magni, G., Domingos, M. & Paoletti, E. (2019). The passion fruit liana (*Passiflora edulis* Sims, *Passifloraceae*) is tolerant to ozone. *Science of The Total Environment*, 656, 1091-1101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.425>
- Fick, S. E. & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 - km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Fischer, G., Casierra-Posada, F. y Piedrahíta, W. (2009). Ecofisiología de las especies pasifloráceas cultivadas en Colombia. En D. Miranda, G. Fischer, C. Carranza, S. Magnitskiy, F. Casierra-Posada, W. Piedrahíta, L. E. Flórez (Eds.). *Cultivo, poscosecha y comercialización de las pasifloráceas en Colombia: maracuyá, granadilla, gulupa y curuba* (pp. 45-67). Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas.
- Fischer, G. & Miranda, D. (2021). Review on the ecophysiology of important Andean fruits: Passiflora L. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2), 9471-9481. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91828>
- Giannini, T. C., Acosta, A. L., Silva, C. I., Alves, P. E., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Saraiva, A. M. (2013). Identifying the areas to preserve passion fruit pollination service in Brazilian Tropical Savannas under climate change. *Agriculture, ecosystems & environment*, 171, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.003>
- Gobernación del Huila. (2020). *Evaluación Agropecuaria del Huila 2019*. <https://www.huila.gov.co/agricultura-y-mineria/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013a). *Climate Change 2013: the physical basis*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013b). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Khubaib, N., Asad, S. A., Khalil, T., Baig, A., Atif, S., Umar, M., Kropp, J., Pradhan, P. & Baig, S. (2021). Predicting areas suitable for wheat and maize cultivation under future climate change scenarios in Pakistan. *Climate Research*, 83, 15-25. <https://doi.org/10.3354/cr01631>
- Kjøhl, M., Nielsen, A. & Stenseth, N. C. (2011). *Potential effects of climate change on crop pollination*. <http://www.fao.org/3/i2242e/i2242e00.pdf>
- Kogo, B. K., Kumar, L., Koech, R. & Kariyawasam, C. S. (2019). Modelling Climate Suitability for Rainfed Maize Cultivation in Kenya Using a Maximum Entropy (MaxENT) Approach. *Agronomy*, 9(11), 727. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110727>
- Kumar, P. (2012). Assessment of impact of climate change on Rhododendrons in Sikkim Himalayas using Maxent modelling: limitations and challenges. *Biodiversity and Conservation*, 21(5), 1251-1266. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0279-1>
- Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez-Valle, A. & Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, 141(1), 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- Loaiza, I. D. y Mesa, N. (2019). Evaluación de déficit hídrico en variantes somaclonales de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa* Deneger), usando mediciones morfométricas. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(31), 56-60. <https://www.revistaaccb.org/r/index.php/accb/article/view/182/171>
- Lobell, D.B., Schlenker, W. & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Cadena de pasifloras 2018*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2018-09-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Melgarejo, L. M. (2015). *Granadilla (Passiflora ligularis Juss): Caracterización ecofisiológica del cultivo*. Universidad Nacional de Colombia
- Merow, C., Smith, M. J. & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Montero, M. U. y Laiton, R. (2016). *Zonificación Ambiental para un Sistema Agroforestal en la Producción de maracuyá (Passiflora edulis Sims) y cholupa (Passiflora maliformis L.) en dos zonas del departamento de Huila, Colombia: escala 1:100.000* [Tesis de pregrado, Universidad distrital]. Repositorio institucional.
- Moratelli, R., De Andreazzi, C. S., De Oliveira, J. A. & Cordeiro, J. L. P. (2011). Current and potential distribution of *Myotis simus* (Chiroptera, Vespertilionidae). *Mammalia*, 75(3), 227-234. <https://doi.org/10.1515/MAMM.2011.028>

- Moya, W., Jacome, G. & Yoo, C. (2017). Past, current, and future trends of red spiny lobster based on PCA with MaxEnt model in Galapagos Islands, Ecuador. *Ecology and Evolution*, 7(13), 4881-4890. <https://doi.org/10.1002/ece3.3054>
- Nichetoolbox (2016). Welcome to NicheToolBox. <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>
- Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of Australian *elapid* snakes. En R. Longmore. (Ed.). *Atlas of Elapid Snakes of Australia* (pp. 4– 15). Australian Government Publishing Service.
- Ocampo, J., Coppens, G., Restrepo, M., Jarvis, A., Salazar, M. & Caetano, C. (2007). Diversity of Colombian Passifloraceae: biogeography and an updated list for conservation. *Biota Colombiana*, 8(1), 1-45. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49180101>
- Ocampo, J. (2013). Diversity and Distribution of Passifloraceae in the Department of Huila in Colombia. *Acta biológica colombiana*, 18(3), 511-516.
- Ocampo, J., Urrea, R., Salazar, M., Hernández, J. & Posada, P. (2013). *Avances de investigación en el cultivo de maracuyá (Passiflora edulis f. flavicarpa Degener)*. En C. Carranza y J. Ocampo. (Eds.). *Congreso Latinoamericano de Pasifloras* (pp. 36-44). Corporación Cepas.
- Ocampo, J. A., Rodríguez, A., Puentes, A., Molano, Z. y Parra, M. (2015). *El cultivo de la Cholupa (Passiflora maliformis L.): Una alternativa para la fruticultura colombiana*. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia.
- Osoario, J. A., Martínez, E. P., Clímaco, J., Aguirre, J. E., Vergara, J. A., Luque, N. Y., Rojas, E. D. y Cruz, G. N. (2020). *Caracterización sanitaria de los cultivos de granadilla, gulupa y maracuyá en Colombia, con especial referencia a la secadera causada por Fusarium solani f. sp. passiflorae*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigation.7403381>
- Peterson, A. T., Papes, M. & Soberón, 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>
- Pareek, A., Dhankher, O. P. & Foyer, C. H. (2020). Mitigating the impact of climate change on plant productivity and ecosystem sustainability. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 451–456. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz518>
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengard, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., García, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S ... & Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332). <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A. & Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains? *Ecological Applications*, 26(2), 530-544. <https://doi.org/10.1890/14-1871>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E. & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Polce, C., Garratt, M. P., Termansen, M., Ramirez - Villegas, J., Challinor, A. J., Lappage, M. G., Boatman, N. D., Crowe, A., Endalew, A., Potts, S. G., Somerwill, K. E. & Biesmeijer, J. C. (2014). Climate - driven spatial mismatches between British orchards and their pollinators: increased risks of pollination deficits. *Global change biology*, 20(9), 2815-2828. <https://doi.org/10.1111/gcb.12577>
- Restrepo, J. D. & Syvitski, J. P. M. (2006). Assessing the effect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean River: the Magdalena drainage basin, Colombia. *Ambio*, 35(2), 65-74. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[65:ATEONC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[65:ATEONC]2.0.CO;2)
- Remya, K., Ramachandran, A. & Jayakumar, S. (2015). Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India. *Ecological engineering*, 82, 184-188. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.053>

- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H. & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268-3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Scanes, C. G. (2018). Human activity and habitat loss: destruction, fragmentation, and degradation. En C. G. Scanes y S. R. Toukhsati. (Eds.). *Animals and human society* (pp. 451-482). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805247-1.00026-5>
- Scherer, C. C. (2014). *Conservação filogenética de nicho climático para espécies do gênero Passiflora L. (Passifloraceae) com ocorrência no Brasil* [Tesis de maestría, Universidad Federal de Paraná]. Biblioteca digital: Teses & Dissertações.
- Settele, J., Bishop, J. & Potts, S. G. (2016). Climate change impacts on pollination. *Nature Plants*, 2(16092), 1-3. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.92>
- Sharma, S., Arunachalam, K., Bhavsar, D. & Kala, R. (2018). Modeling habitat suitability of *Perilla frutescens* with MaxEnt in Uttarakhand—A conservation approach. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 10, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.02.003>
- Shukla, P. K., Baradevanal, G., Rajan, S. & Fatima, T. (2020). MaxEnt prediction for potential risk of mango wilt caused by *Ceratocystis fimbriata* Ellis and Halst under different climate change scenarios in India. *Journal of Plant Pathology*, 102, 765-773. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00502-9>
- Stockwell, D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13(2), 143-158. <https://doi.org/10.1080/136588199241391>
- Su, P., Zhang, A., Wang, R., Wang, J., Gao, Y. & Liu, F. (2021). Prediction of Future Natural Suitable Areas for Rice under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Sustainability*, 13(3), 1580. <https://doi.org/10.3390/su13031580>
- Sun, J., Cheng, G. W. & Li, W. P. (2013). Meta-analysis of relationships between environmental factors and above ground biomass in the alpine grassland on the Tibetan Plateau. *Biogeosciences*, 10, 1707-1715. <https://doi.org/10.5194/bg-10-1707-2013>
- Sutherst, R. W. & Maywald, G. F. (1985). A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 13(3-4), 281-299. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0167-8809(85)90016-7)
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>
- Thuiller, W., Brotons, L., Araújo, M. B. & Lavorel, S. (2004). Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distributions. *Ecography*, 27, 165-172. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03673.x>
- United States Agency for International Development. (2014). *The US market for passion fruit*. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00KP21.pdf
- United States Geological Survey. (2005). *Shuttle Radar Topography Mission*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm>
- Vanbergen, A. J., & the Insect Pollinators Initiative. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), 251-259. <https://doi.org/10.1890/120126>
- Yi, Y., Cheng, X., Yang, Z. & Zhang, S. (2016). Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H. riparia* Lour) in Yunnan, China. *Ecological Engineering*, 92, 260-269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.04.010>
- Yuan, H., Wei, Y., & Wang, X. (2015). Maxent modeling for predicting the potential distribution of Sanghuang, an important group of medicinal fungi in China. *Fungal Ecology*, 17, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2015.06.001>
- Wei, B., Wang, R., Hou, K., Wang, X., & Wu, W. (2018). Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 16, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00477>

- Werneck, F. P., Costa, G. C., Colli, G. R., Prado, D. E., & Sites J. W. (2011). Revisiting the historical distribution of Seasonally Dry Tropical Forests: new insights based on palaeodistribution modelling and palynological evidence. *Global Ecology and Biogeography*, 20(2), 272-288. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00596.x>
- Wohlmuth, H., Penman, K. G., Pearson, T., & Lehmann, R. P. (2010). Pharmacognosy and chemotypes of passionflower (*Passiflora incarnata* L.). *Biological and Pharmaceutical bulletin*, 33(6), 1015-1018. <https://doi.org/10.1248/bpb.33.1015>
- Woodward, F. I. (1987). *Climate & Plant Distribution*. Cambridge University Press.
- Zhang, X., Li, G., & Du, S. (2018). Simulating the potential distribution of *Elaeagnus angustifolia* L. based on climatic constraints in China. *Ecological Engineering*, 113, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.009>

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/4637> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/4637/5262> (pdf)