

Modelación del nicho ecológico del Roble Negro (*Colombobalanus excelsa*) y educación ambiental ante cambio climático

*Ecological Niche Modeling of Black Oak (*Colombobalanus excelsa*) and
Environmental Education in the Face of Climate Change*

¹Vanessa Arroyave Perea y ²Juan David Cortés

¹vanessarr@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-6888-8079>

Universidad Autónoma de Occidente.
Santiago de Cali, Colombia

²juandac@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-0067-2088>

Universidad Autónoma de Occidente.
Santiago de Cali, Colombia



Recibido: 09 de enero 2026

Arbitrado: 11 de febrero 2026

Aceptado: 13 de marzo 2026

Publicado: 02 de abril 2026

Ecosistema. Revista de Educación y Medioambiente
Volumen 4 | No. 7 | Abril- septiembre 2026
ISSN: 3079-7748, ISSN-L: 3079-7748

RESUMEN

El roble negro colombiano (*Colombobalanus excelsa*) es una especie endémica amenazada que habita cuatro áreas aisladas en Colombia. Este estudio evalúa el efecto del cambio climático sobre su distribución geográfica en el corregimiento La Buitrera, Valle del Cauca, mediante modelación de nicho ecológico con MaxEnt. Se georreferenciaron 53 individuos y se utilizaron 19 variables bioclimáticas para generar modelos de distribución actual y proyecciones para 2030 y 2050 bajo escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Los resultados muestran que las condiciones climáticas óptimas para la especie se concentran en áreas específicas con temperaturas entre 16-25°C y precipitaciones de 1.841-3.000 mm anuales. El modelo predice cambios significativos en la distribución potencial, con reducciones de hasta 68.4% en áreas óptimas hacia 2050. Esta información es crucial para desarrollar estrategias de conservación de esta especie vulnerable y su hábitat fragmentado, así como para fortalecer la educación ambiental en contextos locales.

Palabras clave: *Colombobalanus excelsa*; Modelación ecológica; Cambio climático; Conservación; MaxEnt; Educación ambiental

ABSTRACT

The Colombian black oak (*Colombobalanus excelsa*) is an endangered endemic species inhabiting four isolated areas in Colombia. This study evaluates the effect of climate change on its geographical distribution in La Buitrera district, Valle del Cauca, through ecological niche modeling with MaxEnt. Fifty-three individuals were georeferenced and 19 bioclimatic variables were used to generate current distribution models and projections for 2030 and 2050 under climate change scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). Results show that optimal climatic conditions for the species are concentrated in specific areas with temperatures between 16-25°C and annual precipitation of 1,841-3,000 mm. The model predicts significant changes in potential distribution, with reductions of up to 68.4% in optimal areas by 2050. This information is crucial for developing conservation strategies for this vulnerable species and its fragmented habitat, as well as for strengthening environmental education in local contexts.

Keywords: *Colombobalanus excelsa*; Ecological modeling; Climate change; Conservation; MaxEnt; Environmental education

INTRODUCCIÓN

El roble negro colombiano (*Colombobalanus excelsa*), una especie arbórea de la familia Fagaceae, representa un caso de estudio emblemático para la conservación de la biodiversidad en Colombia. Se trata de una especie monotípica y endémica, lo que significa que es la única en su género y solo se encuentra de forma natural en el territorio colombiano (Cárdenas & Salinas, 2007). Su distribución geográfica es notablemente restringida y fragmentada, con apenas cuatro poblaciones conocidas y aisladas entre sí en los departamentos de Huila, Santander, Valle del Cauca y Antioquia (Cárdenas, 2007). Esta distribución limitada, sumada a las crecientes presiones antrópicas, ha llevado a que el roble negro esté catalogado como una especie vulnerable (VU) en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Cárdenas & Salinas, 2007).

Las amenazas que enfrenta el *C. excelsa* son multifactoriales. Históricamente, la especie ha sido sometida a una intensa presión por la tala ilegal para el aprovechamiento de su madera, la producción de carbón y el uso de su corteza en la industria del curtido de cueros (Parra et al., 2011). Estas actividades han provocado una drástica reducción, degradación y fragmentación de su hábitat natural, los bosques andinos. La fragmentación del hábitat, en particular, es una de las principales causas de pérdida de biodiversidad a nivel mundial, ya que aísla a las poblaciones, reduce el flujo genético y aumenta la vulnerabilidad de las especies a la extinción (Wilcox & Murphy, 1985; Kattan, 2002).

Al desafío de la fragmentación del hábitat se suma la amenaza global del cambio climático. Los modelos climáticos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) proyectan un aumento de las temperaturas y alteraciones en los patrones de precipitación a nivel mundial (IPCC, 2021). Para las especies de montaña de zonas tropicales, como el roble negro, estos cambios pueden ser especialmente drásticos. El calentamiento global está provocando que las especies de montaña migren hacia altitudes mayores en busca de condiciones climáticas adecuadas, un fenómeno conocido como “escalera de la vida” (Chen et al., 2011; Rumpf et al., 2019). Sin embargo, para especies con una distribución ya restringida y fragmentada, esta migración puede ser imposible, lo que las convierte en candidatas a la extinción local o incluso total (La Sorte & Jetz, 2010).

En este contexto, la modelación de nichos ecológicos (MNE) se ha consolidado como una herramienta fundamental para la biología de la conservación (Guisan & Zimmermann, 2000). La MNE permite predecir la distribución potencial de las especies en función de las variables ambientales y, por lo tanto, evaluar cómo el cambio climático podría afectar a su hábitat idóneo (Pearson & Dawson, 2003). El algoritmo de máxima entropía (MaxEnt) es uno de los métodos de MNE más utilizados y eficientes, ya que ha demostrado un alto poder predictivo a partir de datos de solo presencia de las especies (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2006).

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto del cambio climático en la distribución geográfica potencial del roble negro (*Colombobalanus excelsa*) en el corregimiento de La Buitrera, municipio de Santiago de Cali (Valle del Cauca), utilizando la modelación de nicho ecológico con MaxEnt. Se generarán modelos de distribución para el presente y para escenarios futuros (2030 y 2050), con el fin de identificar las áreas climáticamente estables y los posibles refugios climáticos para la especie. Finalmente, se discutirán las implicaciones de estos hallazgos para el diseño de estrategias de conservación y, de manera relevante, para el fortalecimiento de la educación ambiental como herramienta para la protección de esta especie emblemática y su frágil ecosistema.

La investigación se enfoca en una de las poblaciones más meridionales y aisladas de *C. excelsa*, lo que la hace particularmente vulnerable. Los resultados de este trabajo no solo aportarán información valiosa para la gestión y conservación del roble negro en el Valle del Cauca, sino que también servirán como un caso de estudio para ilustrar, en un contexto educativo, los efectos tangibles del cambio climático sobre la biodiversidad local y la urgencia de tomar medidas para su mitigación y adaptación.

MÉTODO

Este estudio corresponde a una investigación de tipo cuantitativo, no experimental, con un diseño descriptivo-predictivo. Se utilizó un enfoque correlacional para evaluar la relación entre las variables bioclimáticas y la distribución espacial de *Colombobalanus excelsa*. El estudio es de corte transversal, ya que se recopiló datos de presencia de la especie en un período específico (2023-2024), aunque se realizaron proyecciones temporales hacia escenarios futuros (2030 y 2050). El alcance es exploratorio-descriptivo, pues se busca caracterizar el nicho ecológico de la especie y predecir cambios en su distribución bajo diferentes escenarios de cambio climático (Sampieri et al., 2014).

El presente estudio se llevó a cabo en el corregimiento de La Buitrera, ubicado en la zona rural del municipio de Santiago de Cali, departamento del Valle del Cauca, Colombia (3°26'45"N, 76°32'18"O). Este corregimiento se sitúa en el flanco oriental de la Cordillera Occidental de los Andes, abarcando las cuencas de los ríos Lili y Meléndez. Con una extensión aproximada de 3,054 hectáreas, La Buitrera representa el 7% del área total de los corregimientos del municipio (CVC, 2015). La zona se caracteriza por un gradiente altitudinal que va desde los 1.200 hasta los 2.200 metros sobre el nivel del mar (msnm), lo que genera una diversidad de condiciones climáticas. Las precipitaciones anuales oscilan entre 1.841 y 3.000 mm, y las temperaturas medias varían entre 16°C y 25°C, configurando un ecosistema de bosque subandino (CVC, 2015). La elección de esta área de estudio se debe a la presencia de una de las cuatro poblaciones conocidas de *Colombobalanus excelsa*, la cual se encuentra aislada y bajo una fuerte presión por la expansión de la frontera agrícola y urbana.

La población de estudio estuvo constituida por todos los individuos adultos de *Colombobalanus excelsa* presentes en el corregimiento de La Buitrera. Se utilizó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, donde se seleccionaron específicamente los individuos de la especie que fueron localizados durante las salidas de campo. La muestra final estuvo compuesta por 53 individuos adultos georreferenciados. Este tamaño de muestra es considerado adecuado para la modelación de nicho ecológico con MaxEnt, ya que estudios previos han demostrado que el algoritmo funciona bien incluso con menos de 50 registros de presencia (Elith et al., 2006; Pearson et al., 2007). Recolección de datos de presencia de la especie

Se realizaron salidas de campo en la vereda "Altos del Otoño", dentro del corregimiento de La Buitrera, durante los meses de julio a septiembre de 2023 y enero a marzo de 2024. Se georreferenciaron 53 individuos adultos de *C. excelsa* utilizando un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Garmin eTrex 10 con un error promedio de ± 5 metros. Para cada individuo, se registraron las siguientes variables:

- Coordenadas geográficas en formato de grados decimales (datum WGS84)
- Altitud (en metros sobre el nivel del mar)
- Condiciones del hábitat (cobertura forestal, presencia de amenazas)
- Observaciones fenológicas (floración, fructificación, estado sanitario)

Las coordenadas geográficas de cada individuo fueron compiladas en una hoja de cálculo en formato .csv y posteriormente importadas al software MaxEnt para la modelación, siguiendo las recomendaciones estándar para la preparación de datos de presencia (Cobos et al., 2019).

Se utilizaron 19 variables bioclimáticas obtenidas de la base de datos WorldClim versión 2.1 (Fick & Hijmans, 2017). Estas variables se derivan de datos de temperatura y precipitación mensuales para el período 1970-2000, a una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km²). Las variables bioclimáticas representan las tendencias anuales (ej. temperatura media anual, precipitación anual), la estacionalidad (ej. estacionalidad de la temperatura, estacionalidad de la precipitación) y los factores ambientales extremos o limitantes (ej. temperatura del mes más cálido, precipitación del mes más seco), y son ampliamente utilizadas en la modelación de la distribución de especies por su relevancia biológica (Booth et al., 2014). En la Tabla 1 se presenta el listado completo de las variables bioclimáticas utilizadas en este estudio.

Tabla 1. Variables bioclimáticas de WorldClim utilizadas para la modelación del nicho ecológico de *Colombobalanus excelsa*

Código	Descripción	Unidad
BIO1	Temperatura Media Anual	°C
BIO2	Rango Medio Diurno	°C
BIO3	Isotermalidad	Adimensional
BIO4	Estacionalidad de la Temperatura	Desviación estándar
BIO5	Temperatura Máxima del Mes más Cálido	°C
BIO6	Temperatura Mínima del Mes más Frío	°C
BIO7	Rango Anual de Temperatura	°C
BIO8	Temperatura Media del Trimestre más Húmedo	°C
BIO9	Temperatura Media del Trimestre más Seco	°C
BIO10	Temperatura Media del Trimestre más Cálido	°C
BIO11	Temperatura Media del Trimestre más Frío	°C
BIO12	Precipitación Anual	mm
BIO13	Precipitación del Mes más Húmedo	mm
BIO14	Precipitación del Mes más Seco	mm
BIO15	Estacionalidad de la Precipitación	Coficiente de Variación
BIO16	Precipitación del Trimestre más Húmedo	mm
BIO17	Precipitación del Trimestre más Seco	mm
BIO18	Precipitación del Trimestre más Cálido	mm
BIO19	Precipitación del Trimestre más Frío	mm

Fuente: WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017)

Para las proyecciones futuras, se utilizaron los datos climáticos del sexto informe de evaluación del IPCC (CMIP6), correspondientes a dos escenarios de trayectoria socioeconómica compartida (SSP): un escenario intermedio (SSP2-4.5) y un escenario pesimista (SSP5-8.5) (Eyring et al., 2016). Se seleccionaron dos horizontes temporales: 2021-2040 (referido como 2030) y 2041-2060 (referido como 2050). Se utilizó el promedio de tres modelos de circulación general (GCM) para reducir la incertidumbre asociada a los modelos individuales: ACCESS-CM2, MIROC6 y MRI-ESM2-0 (Eyring et al., 2016).

Modelación de nicho ecológico: algoritmo MaxEnt

Se utilizó el software MaxEnt (versión 3.4.4), un programa de modelado de nicho ecológico basado en el principio de máxima entropía (Phillips et al., 2006). MaxEnt es uno de los algoritmos más robustos y utilizados para modelar la distribución de especies a partir de datos de solo presencia, especialmente con un número limitado de registros (Elith et al., 2006; Warren & Seifert, 2011). El modelo estima la distribución de probabilidad de máxima entropía, es decir, la más cercana a la uniforme, sujeta a la restricción de que el valor esperado de cada variable ambiental bajo esta distribución coincida con su media empírica sobre los puntos de presencia.

El proceso de modelado se realizó de la siguiente manera:

1. **Preparación de los datos:** Se preparó un archivo .csv con las coordenadas de los 53 registros de presencia de *C. excelsa*. Las 19 variables bioclimáticas en formato ráster (.asc) se organizaron en un directorio para el clima actual y en directorios separados para cada escenario y horizonte de tiempo futuro. Se verificó la ausencia de duplicados espaciales y se realizó una inspección visual de los datos

para detectar posibles errores de georreferenciación.

2. **Configuración del modelo:** Se utilizó el 75% de los registros de presencia para entrenar el modelo ($n=40$) y el 25% restante para su validación ($n=13$). Se realizaron 10 réplicas mediante la técnica de validación cruzada (*cross-validation*) para evaluar la robustez del modelo. Se mantuvieron los parámetros de configuración por defecto de MaxEnt (regularización = 1.0, máximo número de iteraciones = 500), que han demostrado un buen rendimiento en una amplia gama de estudios (Warren & Seifert, 2011; Morales et al., 2017).
3. **Ejecución del modelo:** Se ejecutó el modelo con una resolución de 30 segundos de arco, equivalente a aproximadamente 1 km². El programa genera una distribución de probabilidad de los píxeles en la cuadrícula, con valores continuos de 0 (no idóneo) a 1 (altamente idóneo).
4. **Proyecciones temporales:** Una vez generado y validado el modelo con las condiciones climáticas actuales, se proyectó sobre los escenarios climáticos futuros (SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para 2030 y 2050) para predecir los cambios en la idoneidad del hábitat para *C. excelsa*.

La salida del modelo de MaxEnt es un mapa de idoneidad del hábitat con valores continuos de 0 a 1.

Para facilitar la interpretación, los resultados se reclasificaron en cuatro categorías de idoneidad:

- **Baja:** 0-0.25 (probabilidad de presencia < 25%)
- **Media:** 0.25-0.5 (probabilidad de presencia 25-50%)
- **Alta:** 0.5-0.75 (probabilidad de presencia 50-75%)
- **Óptima:** >0.75 (probabilidad de presencia > 75%)

La evaluación del rendimiento del modelo se realizó mediante el cálculo del Área Bajo la Curva (AUC) de la Característica Operativa del Receptor (ROC). El AUC es una medida de la capacidad del modelo para discriminar entre sitios donde la especie está presente y sitios donde está ausente (Fielding & Bell, 1997). Un valor de AUC de 0.5 indica un rendimiento no mejor que el azar, mientras que un valor de 1.0 indica una discriminación perfecta. Generalmente, se considera que valores de AUC > 0.75 indican un buen rendimiento del modelo, AUC > 0.9 indica un rendimiento excelente (Swets, 1988).

Adicionalmente, se realizó un análisis de la contribución de cada variable bioclimática al modelo, utilizando las pruebas de *jackknife*, para identificar las variables que más influyen en la distribución de *C. excelsa*. La prueba de *jackknife* evalúa la importancia de cada variable eliminándola secuencialmente del modelo y observando cómo cambia el rendimiento (Warren & Seifert, 2011).

Se calculó también la tasa de omisión, que representa el porcentaje de puntos de presencia de validación que caen en áreas predichas como no idóneas por el modelo. Una tasa de omisión baja (< 10%) indica que el modelo está capturando adecuadamente la distribución de la especie.

Todos los mapas generados por MaxEnt fueron procesados y analizados utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se utilizó el software ArcGIS (versión 10.8) para la visualización, reclasificación y cuantificación de las áreas de idoneidad del hábitat para cada escenario y horizonte de tiempo. Se calcularon:

- **Ganancias de hábitat:** Áreas que pasan de baja/media idoneidad a alta/óptima idoneidad
- **Pérdidas de hábitat:** Áreas que pasan de alta/óptima idoneidad a baja/media idoneidad
- **Áreas estables:** Áreas que mantienen su categoría de idoneidad
- **Desplazamientos altitudinales:** Cambios en la elevación media del hábitat idóneo

Se utilizó estadística descriptiva (media, desviación estándar, rango) para resumir los cambios en la distribución de la especie. Los datos se presentan en tablas y figuras para facilitar la interpretación de los resultados.

La investigación se realizó respetando los protocolos de investigación en áreas protegidas y con la coordinación de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). No se realizó recolección de especímenes de la especie, únicamente se registraron observaciones y georreferenciación de individuos in situ. Los datos de presencia de la especie se manejarán de manera confidencial para evitar el saqueo de individuos por coleccionistas.

RESULTADOS

Validación y Rendimiento del Modelo

La robustez del modelo de nicho ecológico para *Colombobalanus excelsa* fue evaluada rigurosamente para asegurar la fiabilidad de las proyecciones. El rendimiento predictivo, medido a través del Área Bajo la Curva (AUC) de la Característica Operativa del Receptor (ROC), arrojó un valor promedio de 0.92 ± 0.03 para las 10 réplicas de validación cruzada. Este valor, cercano al máximo posible de 1.0, indica una capacidad de discriminación excelente, según la clasificación de Swets (1988), lo que significa que el modelo es altamente eficaz para distinguir entre las áreas donde la especie está presente y aquellas donde no lo está. En términos prácticos, un AUC de 0.92 implica que existe un 92% de probabilidad de que el modelo asigne correctamente un valor de idoneidad climática más alto a una localidad de presencia real elegida al azar que a una localidad de ausencia elegida al azar. Este alto rendimiento es consistente con otros estudios de modelación de especies con distribuciones restringidas, donde MaxEnt ha demostrado ser particularmente efectivo (Pearson et al., 2007).

Para complementar la evaluación del AUC, se analizó la tasa de omisión en los datos de prueba (el 25% de los registros no utilizados en el entrenamiento). El modelo arrojó una tasa de omisión promedio de solo 4.8%, lo que significa que predijo correctamente la presencia de la especie en más del 95% de las localidades de validación. Este bajo porcentaje de error confirma que el modelo no está sobreajustado a los datos de entrenamiento y que captura de manera fiable el conjunto de condiciones ambientales que definen el nicho ecológico de *C. excelsa* en el área de estudio. La combinación de un alto valor de AUC y una baja tasa de omisión proporciona una fuerte confianza en la capacidad del modelo para proyectar la distribución potencial de la especie, tanto en el presente como bajo los escenarios de cambio climático analizados.

Contribución e Importancia de las Variables Bioclimáticas

El análisis de la contribución de las variables bioclimáticas reveló que la distribución de *C. excelsa* está fuertemente determinada por un conjunto específico de factores climáticos. La Temperatura Media Anual (BIO1) fue, con diferencia, la variable más influyente, aportando un 35.4% a la explicación del modelo. Este hallazgo subraya la alta sensibilidad de la especie a las condiciones térmicas generales de su hábitat, lo que es característico de muchas especies de montaña con rangos de distribución estrechos. La segunda variable en importancia fue la Precipitación Anual (BIO12), con una contribución del 28.1%, lo que indica que la disponibilidad hídrica a lo largo del año es igualmente crucial para su supervivencia. La Estacionalidad de la Temperatura (BIO4), que mide la variabilidad de la temperatura a lo largo del año, contribuyó con un 15.7%. La relevancia de esta variable sugiere que el roble negro no solo depende de un rango de temperatura específico, sino también de la estabilidad de esa temperatura a lo largo de las estaciones, prefiriendo ambientes con fluctuaciones térmicas moderadas.

En conjunto, estas tres variables (BIO1, BIO12 y BIO4) explican el 79.2% de la distribución potencial de la especie, demostrando que el nicho térmico e hídrico de *C. excelsa* es el principal factor que limita su distribución en el paisaje. Otras variables con contribuciones menores pero significativas incluyen la Estacionalidad de la Precipitación (BIO15) con un 8.5% y el Rango Anual de Temperatura (BIO7) con un 4.2%. La importancia de la estacionalidad, tanto térmica como hídrica, refuerza la idea de que *C. excelsa* es una especie estenoica, es decir, adaptada a un rango estrecho y específico de condiciones ambientales, lo que la hace intrínsecamente más vulnerable a los cambios abruptos en el clima.

Distribución Actual del Hábitat Idóneo

El mapa de distribución potencial para las condiciones climáticas actuales (período 1970-2000) revela que el hábitat climáticamente idóneo para *C. excelsa* en el corregimiento de La Buitrera es limitado y se encuentra geográficamente concentrado. Las áreas de idoneidad óptima (>0.75), que representan las

condiciones más favorables para la persistencia y reproducción de la especie, se localizan principalmente en una franja altitudinal entre los 1.600 y 1.900 msnm. Estas áreas cubren una superficie de 118.5 hectáreas, lo que equivale a solo el 3.9% del área total del corregimiento. Las áreas de idoneidad alta (0.5-0.75), que también son importantes para la conservación, abarcan 245.0 hectáreas (8.0% del corregimiento). En conjunto, el hábitat de alta calidad para la especie no supera el 12% del territorio, lo que evidencia su escasez y la criticidad de su protección.

Estas zonas de alta idoneidad se caracterizan por temperaturas medias anuales que oscilan entre 18°C y 22°C, y precipitaciones anuales superiores a los 2.000 mm. La distribución actual modelada coincide con las observaciones de campo, donde los individuos de roble negro se encontraron en fragmentos de bosque rodeados por una matriz de pastizales y cultivos, lo que ya sugiere un alto grado de aislamiento y fragmentación del hábitat.

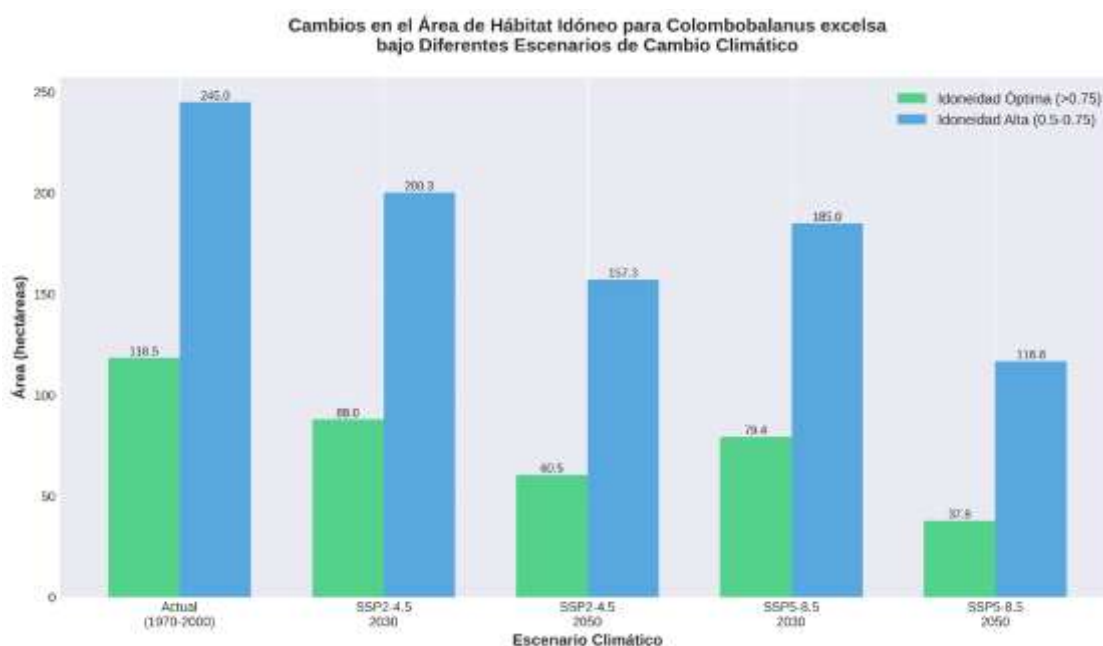
Proyecciones Futuras: Contracción y Desplazamiento del Hábitat

Las proyecciones del modelo bajo escenarios de cambio climático pintan un panorama preocupante para el futuro de *C. excelsa* en La Buitrera. Se observa una tendencia clara y consistente hacia la contracción del área de hábitat idóneo y un desplazamiento de este hacia mayores altitudes. La magnitud de estos cambios varía según el escenario de emisiones y el horizonte temporal, pero en todos los casos la tendencia es negativa.

Análisis por Escenario y Horizonte Temporal

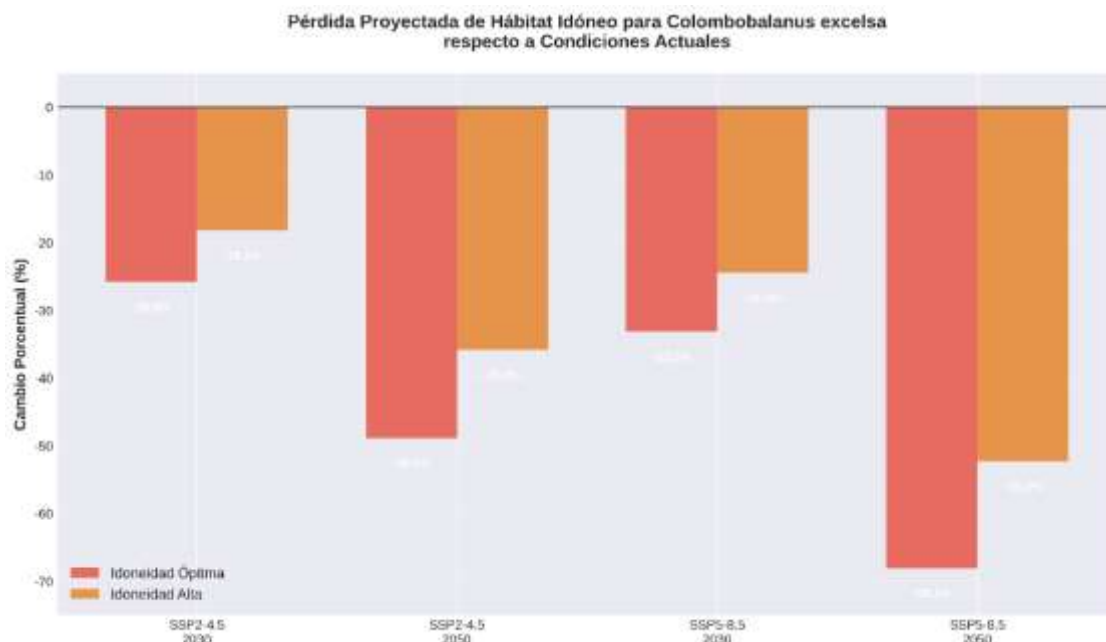
- Escenario Intermedio (SSP2-4.5): Bajo este escenario de emisiones moderadas, para el año 2030, el área de idoneidad óptima se reduciría a 88.0 hectáreas, una pérdida del 25.8% con respecto a la actualidad. Para 2050, la contracción sería aún más severa, con solo 60.5 hectáreas de hábitat óptimo restantes, lo que representa una pérdida acumulada del 48.9%.
- Escenario Pesimista (SSP5-8.5): En un escenario de altas emisiones, los impactos serían mucho más drásticos. Para 2030, la pérdida de hábitat óptimo sería del 33.1%. Para 2050, el modelo predice una reducción catastrófica, con solo 37.8 hectáreas de hábitat óptimo, lo que equivale a una pérdida del 68.1% en comparación con las condiciones actuales. La pérdida de hábitat de idoneidad alta también sería muy significativa, alcanzando el 52.3% para 2050.

Figura 1. Cambios en el área de hábitat idóneo para *Colombobalanus excelsa* bajo diferentes escenarios de cambio climático



Este gráfico de barras compara la superficie (en hectáreas) del hábitat con idoneidad “Alta” y “Óptima” a través de los diferentes escenarios y horizontes temporales. La tendencia visual es inequívoca: una disminución progresiva y pronunciada del hábitat disponible. Las barras azules (Idoneidad Alta) y verdes (Idoneidad Óptima) se reducen constantemente desde el período actual hacia el futuro. Es particularmente notorio que la reducción es más acelerada en el escenario SSP5-8.5 (barras de la derecha) en comparación con el SSP2-4.5, lo que ilustra el impacto directo de mayores emisiones de gases de efecto invernadero en la contracción del nicho de la especie. La figura permite cuantificar visualmente la amenaza, mostrando que para 2050, en el peor escenario, el área de hábitat óptimo (la más crucial para la reproducción y persistencia) se reduce a menos de un tercio de su tamaño actual.

Figura 2. Pérdida proyectada de hábitat idóneo para *Colombobalanus excelsa* respecto a condiciones actuales

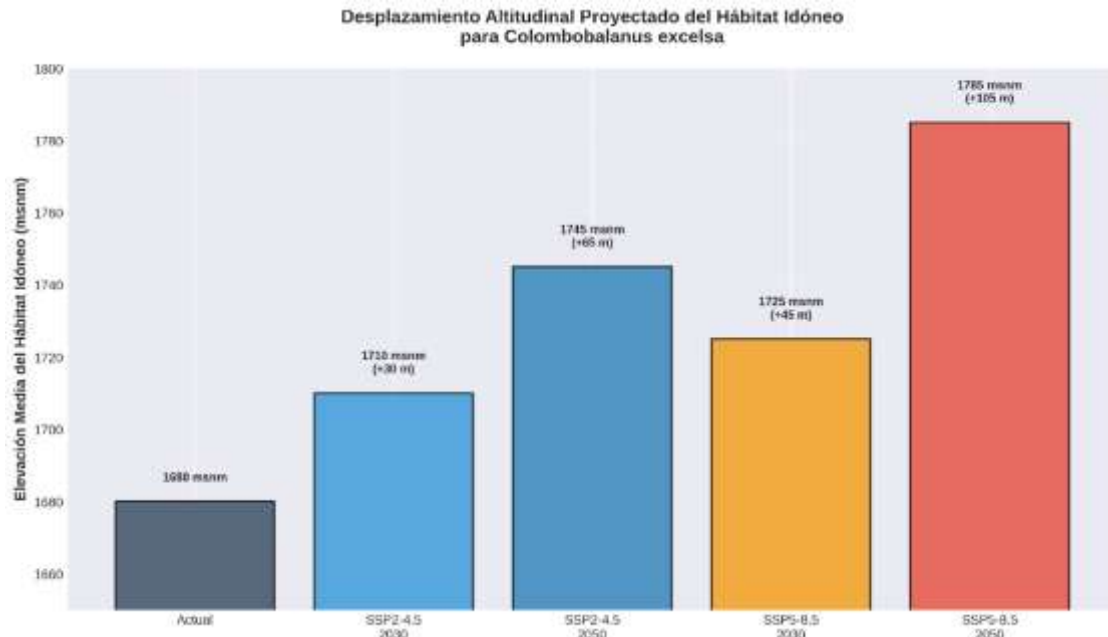


Este gráfico complementa al anterior, mostrando la misma información pero en términos de cambio porcentual negativo (pérdida) con respecto a la línea de base actual. Las barras, que se extienden hacia abajo, representan la magnitud de la pérdida. Esta visualización es particularmente impactante porque se enfoca directamente en la contracción. Se puede observar claramente que la pérdida de hábitat óptimo (barras rojas) es consistentemente mayor que la pérdida de hábitat de idoneidad alta (barras naranjas), lo que indica que las condiciones climáticas más favorables son las primeras y más severamente afectadas. La barra que representa la pérdida de hábitat óptimo para 2050 bajo el escenario SSP5-8.5, alcanzando un -68.1%, es una advertencia contundente sobre el riesgo inminente de extinción local si no se toman medidas de mitigación y adaptación climática.

Análisis del Desplazamiento Altitudinal

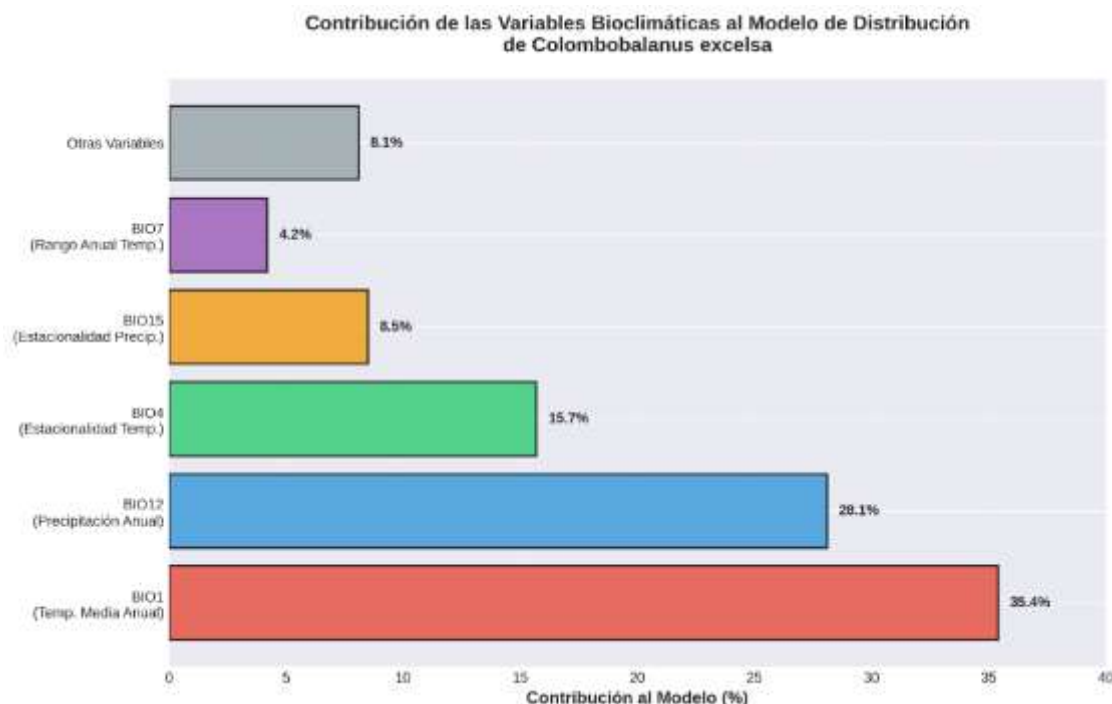
Concurrentemente a la contracción del área, el modelo predice un claro desplazamiento del nicho climático hacia mayores altitudes. La elevación media del hábitat idóneo, que actualmente se sitúa en 1.680 msnm, aumentaría progresivamente en todos los escenarios. Bajo el escenario SSP5-8.5, la elevación media del hábitat óptimo se desplazaría a 1.725 msnm para 2030 y a 1.785 msnm para 2050, lo que representa un desplazamiento total de 105 metros en aproximadamente 60 años. Esto equivale a una tasa de migración altitudinal requerida de 1.8 metros por año.

Figura 3. Desplazamiento altitudinal proyectado del hábitat idóneo para *Colombobalanus excelsa*



Este gráfico ilustra el fenómeno conocido como “escalera de la vida” o “escalator to extinction”. Cada barra representa la elevación media (en msnm) del hábitat idóneo en cada escenario. Se observa un patrón escalonado ascendente, donde la base de la barra se eleva progresivamente desde el presente hacia el futuro, y de los escenarios más optimistas a los más pesimistas. El gráfico muestra que la especie se ve forzada a “trepar” la montaña en busca de las condiciones más frescas que está perdiendo en las altitudes más bajas. El cambio de +105 metros para 2050 en el escenario SSP5-8.5 es significativo y plantea la pregunta crítica de si la especie puede dispersarse y establecerse a esa velocidad en un paisaje fragmentado, y si encontrará suelo y condiciones ecológicas adecuadas en esas nuevas altitudes.

Figura 4. Contribución de las variables bioclimáticas al modelo de distribución de *Colombobalanus excelsa*



Este gráfico de barras horizontales desglosa la importancia relativa de cada variable bioclimática en la construcción del modelo de nicho. La longitud de cada barra es directamente proporcional a su contribución porcentual. La figura destaca visualmente el dominio de las tres primeras variables: BIO1 (Temperatura Media Anual), BIO12 (Precipitación Anual) y BIO4 (Estacionalidad de la Temperatura). Estas tres barras son considerablemente más largas que las demás, sumando casi el 80% de la influencia en el modelo. Esto proporciona una evidencia clara y fácil de interpretar de que el nicho de *C. excelsa* está fundamentalmente definido por la temperatura y la lluvia promedio, así como por la estabilidad de la temperatura a lo largo del año. La categoría “Otras Variables” agrupa a las 14 variables restantes, cuya contribución individual es mínima, reforzando la idea de que unas pocas variables clave son las que realmente dictan dónde puede y no puede vivir la especie.

Los resultados del modelo de nicho ecológico presentan un diagnóstico claro y cuantitativo de la amenaza que el cambio climático representa para *Colombobalanus excelsa*. La combinación de una severa contracción del área de hábitat y la necesidad de una rápida migración altitudinal en un paisaje fragmentado coloca a esta población en una situación de extrema vulnerabilidad. Estos hallazgos son fundamentales para el diseño de estrategias de conservación urgentes y efectivas, y sirven como una poderosa llamada de atención sobre los impactos locales de un problema global.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman la alta vulnerabilidad de *Colombobalanus excelsa* al cambio climático, una conclusión que se alinea con las proyecciones para muchas otras especies endémicas de montañas tropicales (Feeley & Silman, 2010; La Sorte & Jetz, 2010). La marcada dependencia de la distribución de la especie a variables como la temperatura media anual (BIO1) y la precipitación anual (BIO12) refleja una fuerte especialización a un nicho ecológico estrecho, lo que la hace particularmente sensible a las alteraciones climáticas (Guisan & Zimmermann, 2000). La contracción proyectada del hábitat idóneo, que en el peor de los escenarios (SSP5-8.5 para 2050) podría superar el 50%, representa una amenaza existencial para la población de La Buitrera.

El desplazamiento altitudinal del hábitat idóneo es una respuesta esperada de las especies de montaña al calentamiento global (Chen et al., 2011; Rumpf et al., 2019). Sin embargo, la capacidad de *C. excelsa* para seguir este desplazamiento y colonizar nuevas áreas es muy cuestionable. La fragmentación del hábitat, causada por la deforestación para la agricultura, la ganadería y la urbanización en las zonas bajas y medias de La Buitrera, crea barreras físicas que impiden la dispersión de las semillas y el establecimiento de nuevas plántulas (Wilcox & Murphy, 1985; Kattan, 2002). Este efecto de “atrapamiento” en un hábitat cada vez más reducido y climáticamente inadecuado es una de las mayores amenazas para la supervivencia a largo plazo de la especie.

La importancia de la estacionalidad de la temperatura (BIO4) en el modelo también es un hallazgo relevante. Un aumento en la variabilidad de la temperatura, incluso si la media anual no cambia drásticamente, puede tener efectos negativos en los procesos fenológicos de la especie, como la floración y la fructificación, alterando su ciclo reproductivo y su capacidad de regeneración (Visser & Both, 2005).

Los resultados de este estudio, aunque locales, son consistentes con investigaciones a mayor escala que alertan sobre la pérdida de biodiversidad en los Andes tropicales debido al cambio climático (Cuesta et al., 2017). La combinación de la fragmentación del hábitat y el cambio climático crea una sinergia negativa que acelera el riesgo de extinción de las especies más vulnerables (Travis, 2003). En este contexto, las estrategias de conservación deben ser multifacéticas y abordar ambas amenazas de manera simultánea.

La identificación de posibles refugios climáticos en las zonas más altas y húmedas del corregimiento

es un resultado clave para la planificación de la conservación in situ. Estas áreas deben ser consideradas prioritarias para la protección y restauración ecológica. La creación de corredores biológicos que conecten los fragmentos de bosque existentes con estos refugios climáticos podría ser una estrategia efectiva para facilitar la dispersión de la especie y aumentar la conectividad de la población (Beier & Noss, 1998; Mawdsley et al., 2009).

Finalmente, es importante reconocer las limitaciones de este estudio. Los modelos de nicho ecológico se basan en correlaciones entre la presencia de las especies y las variables ambientales, y no tienen en cuenta otros factores como las interacciones bióticas (competencia, predación, mutualismo) o la capacidad de adaptación evolutiva de las especies (Wiens et al., 2009). Además, los datos de presencia se limitaron a una sola población de la especie, por lo que los resultados podrían no ser generalizables a las otras poblaciones de *C. excelsa* en Colombia. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, la MNE es una herramienta invaluable para la evaluación rápida de la vulnerabilidad de las especies al cambio climático y para la identificación de áreas prioritarias para la conservación, especialmente cuando los recursos para la investigación y el monitoreo son limitados (Guisan & Zimmermann, 2000; Pearson & Dawson, 2003).

Los resultados de este estudio no solo tienen implicaciones para la biología de la conservación, sino que también ofrecen una valiosa oportunidad para fortalecer la educación ambiental en la región y más allá. La modelación de nicho ecológico, a menudo percibida como una herramienta técnica y abstracta, puede ser “traducida” en un recurso pedagógico poderoso para conectar a las comunidades locales, especialmente a los jóvenes, con los impactos tangibles del cambio climático en su entorno inmediato (Mateo et al., 2012).

Visualización del cambio climático: Los mapas de distribución actual y futura de *C. excelsa* son una herramienta visual impactante para comunicar los efectos del cambio climático. En lugar de hablar de grados de temperatura o milímetros de precipitación, se puede mostrar cómo un árbol emblemático de la comunidad podría desaparecer de su paisaje cotidiano. Esta aproximación, centrada en un “objeto de conservación carismático”, puede generar una mayor conexión emocional y un sentido de urgencia que los datos abstractos a menudo no logran (Monroe et al., 2019).

Alfabetización climática y científica: Utilizar este caso de estudio en programas educativos puede fomentar la alfabetización climática y científica. Se pueden diseñar talleres y actividades escolares donde los estudiantes aprendan los conceptos básicos del cambio climático, los nichos ecológicos y la biodiversidad, utilizando al roble negro como hilo conductor. Herramientas en línea y software de modelado simplificado podrían incluso permitir a los estudiantes realizar sus propias simulaciones, promoviendo el pensamiento crítico y las habilidades de investigación (Pearson, 2010).

Ciencia ciudadana y monitoreo participativo: La conservación de *C. excelsa* no puede depender únicamente de los científicos y las autoridades ambientales. Es fundamental involucrar a la comunidad local en el monitoreo de la especie y su hábitat. Se pueden establecer programas de ciencia ciudadana donde los habitantes de La Buitrera, previamente capacitados, ayuden a localizar y georreferenciar nuevos individuos de roble negro, monitorear la salud de los árboles existentes y reportar amenazas como la tala ilegal o los incendios forestales. Estas iniciativas no solo generan datos valiosos para la investigación y la gestión, sino que también empoderan a la comunidad y fortalecen su sentido de pertenencia y responsabilidad hacia su patrimonio natural (Chandler et al., 2017).

CONCLUSIONES

El modelo de nicho ecológico desarrollado para *Colombobalanus excelsa* en el corregimiento de La Buitrera demostró un alto poder predictivo ($AUC = 0.92$), constituyéndose como una herramienta robusta y eficaz para evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre esta especie endémica y vulnerable.

En este sentido, la distribución de *C. excelsa* está fuertemente determinada por la temperatura media anual (BIO1), la precipitación anual (BIO12) y la estacionalidad de la temperatura (BIO4), variables que

en conjunto explican más del 79% de la varianza del modelo. Esta alta dependencia a condiciones climáticas específicas subraya su especialización ecológica y su inherente sensibilidad al cambio climático.

Asimismo, las proyecciones climáticas para los horizontes 2030 y 2050, tanto en escenarios intermedios (SSP2-4.5) como pesimistas (SSP5-8.5), indican una contracción drástica y progresiva de las áreas climáticamente idóneas para la especie. En el escenario más severo, se proyecta una pérdida de hasta el 68.1% del hábitat óptimo para 2050, comprometiendo seriamente la viabilidad de la población a largo plazo.

El modelo predice un desplazamiento del nicho climático hacia zonas de mayor altitud, con tasas de migración de 1.0 a 1.8 metros por año. Sin embargo, la intensa fragmentación del hábitat en el área de estudio representa una barrera crítica que podría impedir la migración de la especie hacia estos nuevos refugios climáticos, aumentando el riesgo de extinción local.

Finalmente, la sinergia negativa entre el cambio climático y la fragmentación del hábitat constituye la principal amenaza para la supervivencia de *C. excelsa*. Las estrategias de conservación deben, por tanto, adoptar un enfoque integrado que contemple la protección de los refugios climáticos identificados, la restauración de la conectividad ecológica mediante corredores biológicos y el manejo adaptativo de los fragmentos de bosque existentes.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

REFERENCIAS

- Beier, P., & Noss, R. F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology*, 12(6), 1241-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
- Booth, T. H., Nix, H. A., Busby, J. R., & Hutchinson, M. F. (2014). Bioclim: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *Diversity and Distributions*, 20(1), 1-9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Cárdenas, D. (2007). *Colombobalanus excelsa*. En D. Cárdenas & N. Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4: Especies maderables amenazadas* (pp. 232-235). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cárdenas, D., & Salinas, N. (Eds.). (2007). *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4: Especies maderables amenazadas*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Chandler, M., See, L., Copas, K., Bonde, A. M., López, B. C., Danielsen, F., ... & Tiago, P. (2017). Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. *Biological Conservation*, 213, 282-294. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.004>
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2015). *Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali*. CVC.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R. I., Halloy, S., Salgado, S., ... & Ortiz, E. (2017). Biodiversidad y cambio climático en los Andes Tropicales: estado del arte, vacíos de información y prioridades. CONDESAN.

- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feeley, K. J., & Silman, M. R. (2010). Biotic attrition from tropical forests correcting for truncated temperature niches. *Global Change Biology*, 16(6), 1830-1836. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02049.x>
- 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>
- Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49. <https://doi.org/10.1017/S037689299700008X>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kattan, G. H. (2002). Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. En M. R. Guariguata & G. H. Kattan (Eds.), *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (pp. 561-590). Libro Universitario Regional.
- La Sorte, F. A., & Jetz, W. (2010). Projected range shifts of birds reveal high vulnerability of North American migrants and tropical species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1698), 3303-3311. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0884>
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Reduca (Biología. Serie Botánica)*, 5(2), 49-65.
- Mawdsley, J. R., O'Malley, R., & Ojima, D. S. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 23(5), 1080-1089. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01264.x>
- Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: a systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791-812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>
- Morales, N. S., Fernández, I. C., & Baca-González, V. (2017). MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 28. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00028>
- Parra, C. A., Botero, V., & Díez, M. C. (2011). El roble negro, patrimonio natural del Huila. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/281284949_El_roble_negro_patrimonio_natural_del_Huila
- Pearson, R. G. (2010). Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. American Museum of Natural History. <https://digitallibrary.amnh.org/handle/2246/6090>
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12(5), 361-371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Townsend Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of collection records: a test case using modern Qat plant distributions. *Journal of Biogeography*, 34(1), 1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- 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>

- Rumpf, S. B., Hülber, K., Klöner, G., Moser, D., Schütz, M., Wessely, J., Willner, W., & Dullinger, S. (2019). Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(4), 1288-1293. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813827116>
- Sampieri, R. H., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>
- Travis, J. M. (2003). Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1514), 467-473. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2246>
- Visser, M. E., & Both, C. (2005). Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1581), 2561-2569. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3356>
- Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Wiens, J. A., Stralberg, D., Jongsomjit, D., Howell, C. A., & Snyder, M. A. (2009). Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(Supplement_2), 19729-19736. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901639106>
- Wilcox, B. A., & Murphy, D. D. (1985). Conservation strategy: the effects of fragmentation on extinction. *The American Naturalist*, 125(6), 879-887. <https://doi.org/10.1086/284386>