

Artículo original

## Área climática adecuada para tres especies de *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) en Cuba: distribución potencial y áreas prioritarias para la conservación

### Suitable climatic area for three species of *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) in Cuba: potential distribution and priority areas for conservation

✉ Ramón Salazar-Quevedo\*, ✉ Asiel Cabrera-Guerrero, ✉ Rogelio Roberto Muñoz-Li,  
✉ Abdiel Jover-Capote

Departamento de Biología y Geografía, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

#### Resumen

El cambio climático constituye una amenaza para la biodiversidad. La distribución geográfica y la dimensión de sus efectos sobre los individuos y ecosistemas son inciertas, siendo los montañosos los más sensibles al clima. En la presente investigación se determinó el área climática potencial adecuada para *Phlegmariurus acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus*, especies que habitan en bosques subtropicales húmedos y muy húmedos y ostentan alguna categoría de amenaza debido a la fragmentación del hábitat y la disminución continua de sus poblaciones. Se elaboraron modelos de nicho climático con el programa MaxEnt empleando datos de ocurrencia y variables bioclimáticas. Los modelos resultantes fueron proyectados geográficamente de acuerdo con las condiciones climáticas actuales. Las proyecciones evidenciaron que las condiciones climáticas adecuadas para las especies se distribuyen en las montañas de Cuba oriental. El nicho climático potencial tuvo una probabilidad de presencia alta, así: de 250,66 km<sup>2</sup> para *P. acerosus*, 393,42 km<sup>2</sup> para *P. taxifolius*, y 232,40 km<sup>2</sup> para *P. reflexus*. Las áreas protegidas consideradas prioritarias para la conservación son nueve para *P. acerosus* y *P. reflexus*, y cinco para *P. taxifolius*. Las proyecciones realizadas se determinaron a partir de la elevación y la temperatura estacional. A su vez, las áreas prioritarias para la conservación de las especies correspondieron a las áreas protegidas en los macizos montañosos de Nipe-Sagua-Baracoa y la Sierra Maestra, siendo este último el de mayor importancia para los taxones.

**Palabras claves:** Pteridofitas; Clima; Modelación de nicho climático; Distribución; Especies amenazadas.

#### Abstract

Climate change constitutes a threat to biodiversity. The geographical distribution and dimension of the effects of climate change on individuals and ecosystems are uncertain, being the mountainous ecosystems more sensitive to climate. In this study, we determined the suitable potential climatic area for *Phlegmariurus acerosus*, *P. taxifolius*, and *P. reflexus*, which inhabit humid and very humid subtropical forests and have some category of threat due to habitat fragmentation and the continuous decrease in populations. We developed climate niche models in the MaxEnt software using occurrence data and bioclimatic variables. We projected the resulting models geographically according to current climatic conditions. The projections showed that the climatic conditions suitable for the species are distributed in the mountains of eastern Cuba. The potential climatic niche has a high probability of presence: 250.66 km<sup>2</sup> for *P. acerosus*, 393.42 km<sup>2</sup> for *P. taxifolius*, and 232.40 km<sup>2</sup> for *P. reflexus*. The protected areas considered a priority for conservation are nine for *P. acerosus* and *P. reflexus*, and five for *P. taxifolius*. Our projections were determined by elevation and seasonal temperature. The priority areas for conservation of the species corresponded to the protected areas present in the Nipe-Sagua-Baracoa and Sierra Maestra Mountain ranges, the latter being the most important for the taxa.

**Keywords:** Pteridophytes; Climate; Climate niche modeling; Distribution; Threatened species.

**Citación:** Salazar-Quevedo R, *et al.* Área climática adecuada para tres especies de *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) en Cuba: distribución potencial y áreas prioritarias para la conservación. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(182):122-134, enero-marzo de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1719>

**Editor:** Carolina Romero Hernández

**\*Correspondencia:**

Ramón Salazar Quevedo;  
ramon.salazar@uo.edu.cu

**Recibido:** 28 de junio de 2022

**Aceptado:** 3 de enero de 2023

**Publicado en línea:** 8 de febrero de 2023



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NonCommercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

La modificación en los patrones de precipitación y el aumento de la temperatura pueden afectar la distribución, el tamaño, la estructura y la abundancia de las poblaciones de las especies (Schaefer *et al.*, 2008). Aunque el aumento promedio de la temperatura del planeta se limitara a 2 °C, se estima que en el futuro muchos sitios de prioridad perderán una proporción significativa de sus especies, ya que el clima se volverá inadecuado para ellas (WWF, 2018) y muchas no serán capaces de adaptarse a cambios climáticos pronunciados en periodos cortos (Araújo & New, 2007).

Existen evidencias de que el cambio climático antropogénico afecta la fisiología, la fenología y la distribución de muchas especies y se espera que en un futuro próximo este fenómeno se intensifique (Morueta-Holme *et al.*, 2010). La respuesta biótica al cambio climático se ha estudiado en varios niveles de organización, desde la fenología de los organismos hasta los rangos de las poblaciones y los ensamblajes de las comunidades, y considerando el cambio climático como factor importante en la extinción de especies (Wilson *et al.*, 2007).

Los cambios en los rangos de distribución se deben a cambios en las condiciones climáticas adecuadas que generan la expansión o la reducción del área de distribución de las especies (García *et al.*, 2014). Aunque son varios los factores que determinan la presencia de una especie en una determinada región, el nicho ecológico de las plantas adultas se ha interpretado ampliamente en términos de clima, un factor importante que condiciona las respuestas fisiológicas y la ecología de las especies a escalas espaciotemporales amplias y resoluciones gruesas (Peterson *et al.*, 2011).

Se han utilizados varios algoritmos para modelar la distribución potencial de especies, entre ellos el DOMAIN, el BIOCLIM, el GARP y el MaxEnt, este último con un método de mayor rendimiento y confiabilidad que el de otros (Elith *et al.*, 2006). La modelación de idoneidad de hábitat constituye una buena alternativa, ya que los parámetros climáticos, geológicos y de vegetación se extrapolan con la ocurrencia conocida de las especies para así determinar el hábitat donde una especie no ha sido registrada, pero es probable que ocurra. Además, es útil para estimar cómo responde la distribución de poblaciones naturales ante el cambio de las variables bioclimáticas en un periodo de tiempo determinado (Martínez-Quintero *et al.*, 2017).

Ante un aumento de la temperatura, los ecosistemas se desplazan integralmente y se verifica la reestructuración y relocalización de las especies capaces de adaptarse. El bosque siempreverde mesófilo estaría entre las formaciones vegetales con poca variación ante el cambio climático. Se espera que el bosque pluvial montano amplíe su área de distribución a medida que las formaciones colindantes desaparezcan. El bosque nublado es muy vulnerable al cambio de temperatura y un desplazamiento vertical de 200 m podría reducir su extensión y dar lugar a extinciones locales (Cejas *et al.*, 2007). Estas formaciones vegetales son el hábitat fundamental de las especies de pteridofitas en Cuba.

Lycopodiaceae P. Beauv. ex Mirb. (en Lam. y Mirb) está compuesta por tres subfamilias, de las cuales Huperzioideae Wagner y Beitel ex B. Øllg. tienen tres géneros, siendo *Phlegmariurus* (Herter) Holub uno de los más representados en regiones tropicales (Øllgaard, 2012). En Cuba se han registrado diez especies del género, y el 90 % ostenta alguna categoría de amenaza (Sánchez, 2021). Algunos taxones no se han recolectado en años, por ejemplo, *P. taxifolius* ( $\equiv$  *Huperzia cubana*, Herter) se conoce solamente de la recolección tipo en Loma del Gato, Sierra del Cobre, Santiago de Cuba (Caluff *et al.*, 2008). *P. acerosus* (Sw.) B. Øllg., *P. taxifolius* (Sw.) Å. Löve y D. Löve, de hábito epífita, y *P. reflexus* (Lam.) B. Øllg., de hábito terrestre, están catalogados en las categorías de “Peligro Crítico”, “Amenazado” y “Vulnerable”, respectivamente, por poseer un área de ocupación fragmentada y una disminución continua de sus poblaciones (Sánchez, 2021).

En el presente estudio se caracterizó por primera vez la distribución potencial del nicho climático para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* en condiciones de insularidad. Además, se ofrece información para la determinación de áreas prioritarias de implementación de estrategias de conservación.

## Materiales y métodos

### Registros de ocurrencia

Para la obtención de los datos de ocurrencia y distribución de *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* se consultó la base en línea de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2022) y se revisaron las colecciones del Herbario del Jardín Botánico Nacional, La Habana, Cuba (HAJB-Pteridophyta) (Morejón *et al.*, 2020); del Herbario de la Academia de Ciencias, La Habana, Cuba (HAC-Pteridophyta) (Cezón, 2018); del Natural History Museum (London) Collection Specimens (Natural History Museum, 2022); del The New York Botanical Garden Herbarium (NY) (Ramírez *et al.*, 2021); del NMNH Extant Specimen Records (USNM, US) (Orrell, 2021); del Field Museum of Natural History (Botany) Pteridophyte Collection (Grant & von Konrat, 2020); de Tropicos Specimen Data (Solomon & Stimmel, 2021); del Marie-Victorin Herbarium (MT) - Plantes vasculaires (Brouillet & Sinou, 2021); del Auckland Museum Botany Collection (Cameron & Auckland Museum, 2022), y del Herbarium Berolinense, Berlin (B) (Botanic Garden & Botanical Museum Berlin, 2017).

### Variables ambientales

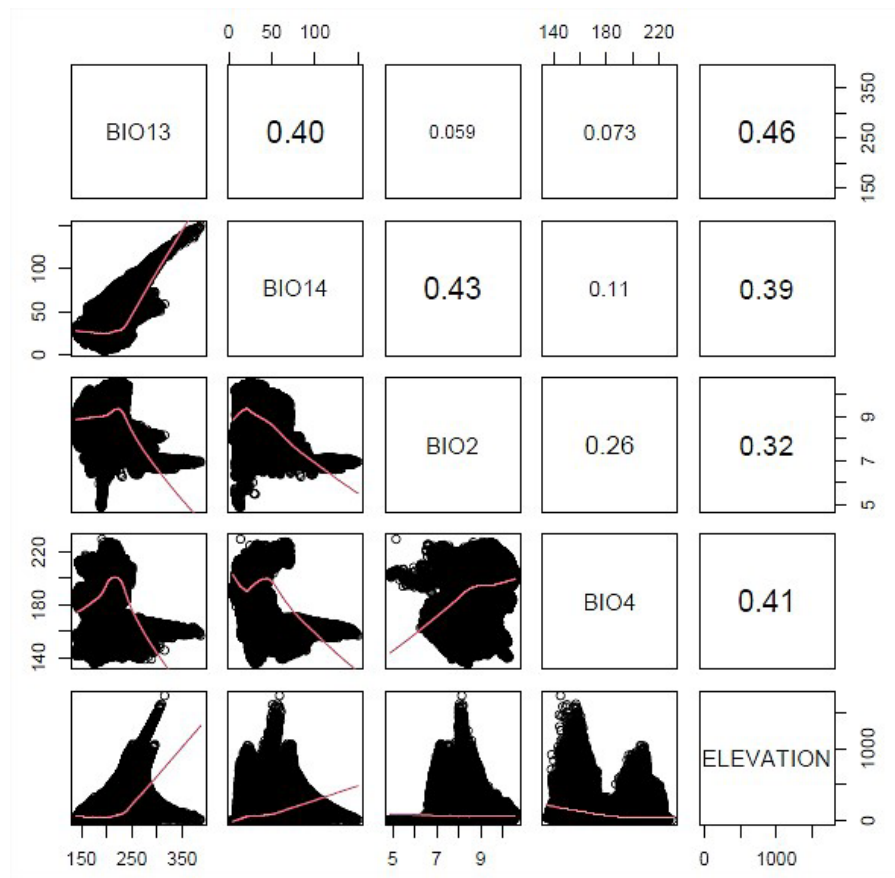
Se tomaron 19 variables bioclimáticas estándar y la elevación (Tabla 1), con una resolución espacial de 30 segundos (~1 km<sup>2</sup>), disponibles en [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org). Las variables bioclimáticas se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar variables biológicamente más significativas que se utilizan a menudo en el modelado de distribución de especies y técnicas de modelado ecológico, ya que representan tendencias anuales, estacionalidad y factores ambientales limitantes (Fick & Hijmans, 2017b).

### Modelación del nicho climático

Se redujeron las variables utilizadas para la modelación desechando las que presentaban un elevado grado de correlación de Spearman (Figura 1) mediante el programa R 3.4.4 (R Core Team, 2018) y seleccionando aquellas con un coeficiente de correlación <0,75 (Vásquez-Morales *et al.*, 2014). Las variables menos correlacionadas se analizaron con el *Variance Inflation Factor* (VIF) y se tomaron las que tuvieran valores <5 para reducir la colinealidad entre las variables de predicción (Aroca-Gonzalez *et al.*, 2021).

**Tabla 1.** Variables ambientales seleccionadas y porcentaje de contribución e importancia en el modelo de distribución potencial actual de áreas climáticas adecuadas para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus*

Variable	Especie	Contribución (%)	Importancia (%)
Elevación	<i>P. acerosus</i>	45,7	40,0
	<i>P. reflexus</i>	43,7	32,5
	<i>P. taxifolius</i>	82,3	73,6
Temperatura estacional (BIO4)	<i>P. acerosus</i>	54,3	60,0
	<i>P. reflexus</i>	5,7	65,4
	<i>P. taxifolius</i>	2,9	2,3
Precipitación del mes más seco (BIO14)	<i>P. reflexus</i>	2,7	2,1
		7,3	2,0
Precipitación del mes más húmedo (BIO13)	<i>P. taxifolius</i>	4,1	6,5
Media del rango diario de la temperatura (BIO2)		3,4	15,5



**Figura 1.** Resultado de la correlación de Spearman para las variables Ambientales. Se muestran las variables con coeficiente de correlación <0,75.

Se utilizó el programa MaxEnt 3.4.1 (Phillips, 2005) para la modelación del nicho climático. Este es un algoritmo utilizado para realizar predicciones o inferencias a partir de información incompleta estimando la distribución de especies a través de la búsqueda de la distribución probable de máxima entropía (Phillips *et al.*, 2006). Se eligió este programa porque supera a la mayoría de los algoritmos de modelación de nicho en cuanto a la precisión de la predicción (Elith *et al.*, 2006) y, además, produce modelos con capacidad predictiva aceptable a partir de un número bajo de registros de presencia (Pearson *et al.*, 2007). Los datos de ocurrencia se dividieron en dos conjuntos: prueba (25 % de los datos) y entrenamiento (75 % de los datos) (Phillips *et al.*, 2006). La configuración de los modelos se realizó en función logística, lo que brinda un estimado de entre 0 y 1 de probabilidad de presencia (Phillips, 2005), y se hicieron diez réplicas para los modelos actuales. Se utilizó la modalidad de *bootstrap* en la que se reponen las muestras utilizadas en la prueba aleatoria. Las predicciones continuas de los modelos se transformaron en binarias utilizando el umbral basado en diez percentiles de los datos (Liu *et al.*, 2005). Se evitó que MaxEnt extrapolara o aplicara la opción de sujeción para evitar una sobreestimación (Vásquez-Morales *et al.*, 2014).

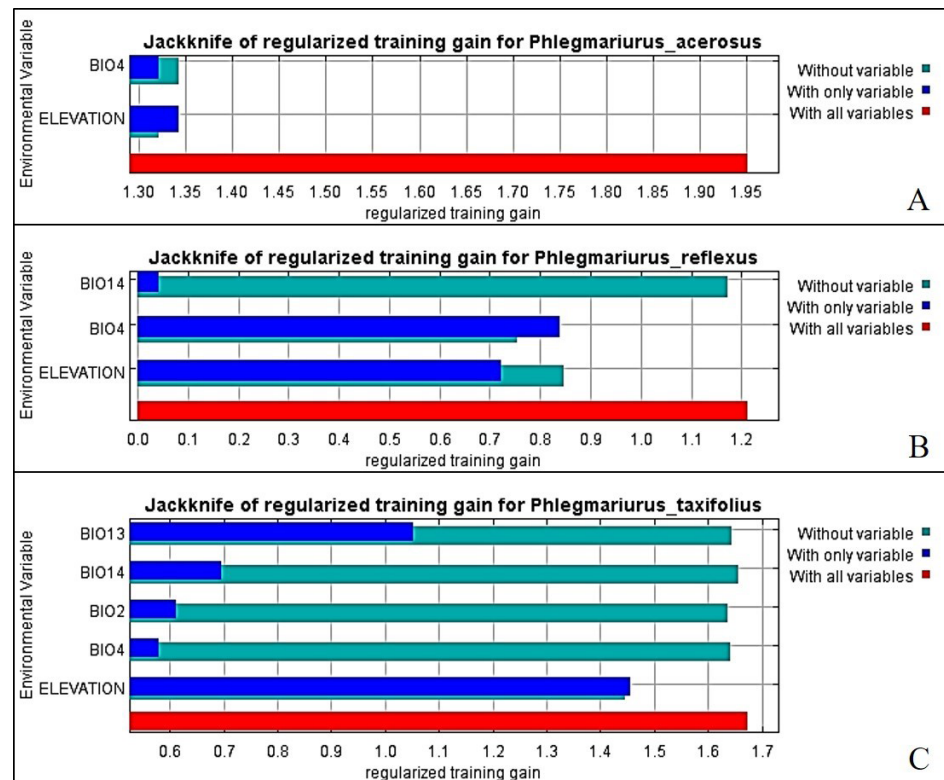
Para evaluar la capacidad predictiva de los modelos generados se utilizó el área bajo la curva (*area under curve*, AUC) (Phillips *et al.*, 2006) de la característica operativa del receptor (*receiver operating characteristic*, ROC) (Hanley & McNeil, 1982), que se usa para la comprobación de modelos predictivos y las comparaciones entre diferentes metodologías (Phillips *et al.*, 2006). Se considera que un AUC de 0,5 indica que la capacidad predictiva del modelo no es mejor que una predicción realizada al azar; entre

0,7 y 0,9 corresponde a una predicción buena, y mayor de 0,9, a una predicción muy buena (Peterson *et al.*, 2011). Para evaluar los modelos se empleó la siguiente clasificación:  $AUC < 0,8$ : pobre;  $0,8 < AUC < 0,9$ : medio;  $0,9 < AUC < 0,95$ : bueno;  $0,95 < AUC < 1$ : muy bueno (Thuiller *et al.*, 2005). La contribución relativa de cada variable para predecir la distribución potencial de las condiciones climáticas adecuadas se evaluó mediante una prueba de *Jackknife* (Figura 2), la cual permite conocer las variables que predicen de manera efectiva la distribución de los datos de ocurrencia (Phillips *et al.*, 2006).

Los datos obtenidos se representaron cartográficamente utilizando el programa QGIS 3.24.0 (QGIS Development Team, 2017) para determinar los rangos de distribución de las variables climáticas. Los valores promedios de las réplicas de las salidas logísticas se reclasificaron en mapas binarios de presencia – ausencia (áreas idóneas=1, no idóneas=0). Se empleó el renderizador unibanda pseudocolor, los valores de presencia se tomaron continuos, y la probabilidad se clasificó de acuerdo a las siguientes categorías:  $\leq 0,44$  (nula),  $\leq 0,5$  (baja),  $\leq 0,8$  (media) y  $\leq 1$  (alta) (Aroca-Gonzalez *et al.*, 2021). Los mapas de las áreas protegidas de Cuba fueron descargados de [www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net) (UNEP-WCMC & IUCN, 2022).

### Análisis de los datos

Empleando la calculadora ráster y el algoritmo “Informe de valores únicos de capa ráster” en el QGIS, se calculó el número total y el área de cada valor único de cada capa ráster y se calculó el área climática adecuada modelada para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* considerando que el área de un pixel es 0,83 km<sup>2</sup>. La representatividad de las condiciones climáticas idóneas para las especies se obtuvo solapando los mapas de cada modelo de predicción con el mapa de la división político-administrativa (ANPP, 2010) y el mapa de áreas protegidas del SNAP.



**Figura 2.** Los resultados de la prueba *Jackknife* de importancia variable para *P. acerosus* (A), *P. reflexus* (B) y *P. taxifolius* (C). Los valores que se muestran son promedios sobre ejecuciones replicadas.

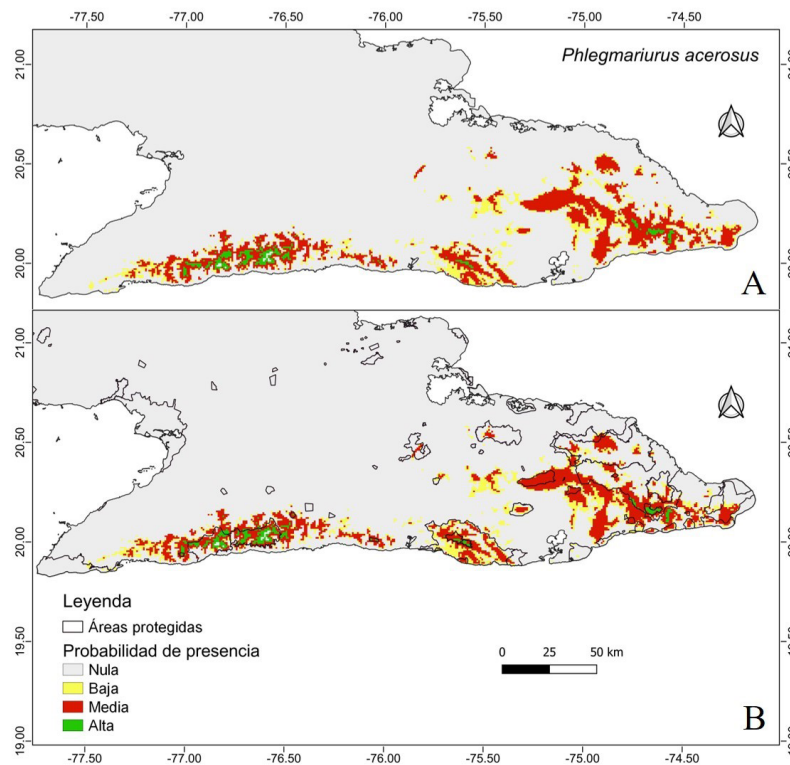
## Resultados

### *Precisión y aporte de las variables a los modelos*

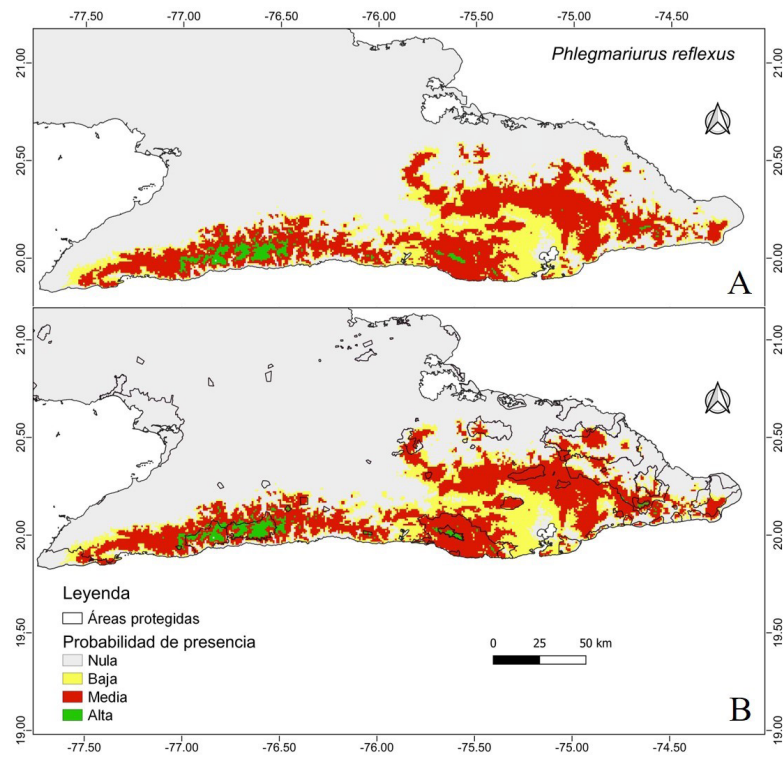
El modelo de distribución potencial actual de nicho climático para *P. acerosus* es “muy bueno”, con un AUC de  $0,960 \pm 0,030$ . Los modelos para *P. taxifolius* y *P. reflexus* son “buenos”, con un AUC de  $0,936 \pm 0,013$  y  $0,935 \pm 0,021$ , respectivamente. Los modelos se elaboraron empleando entre dos y cinco de las 19 variables bioclimáticas, con una correlación de  $<0,75$  y un VIF  $<5$  (**Tabla 1**). Las variables contribuyen en diferentes porcentajes a la explicación de los modelos. Para *P. acerosus*, la temperatura estacional aportó el 54,3 % y la elevación el 45,7 %. En *P. reflexus* la temperatura estacional contribuyó con el 53,7 %, la elevación con el 43,7 % y la precipitación del mes más seco con un 2,7 %, en tanto que para *P. taxifolius* la elevación contribuyó con el 82,3 %, y en menor medida aportaron las variables de la precipitación del mes más seco, la precipitación del mes más húmedo, la media del rango diurno de la temperatura y la temperatura estacional. Los resultados del análisis *Jackknife* evidenciaron que para *P. acerosus* y *P. taxifolius* la variable ambiental con mayor ganancia cuando se usa aisladamente y que más disminuye la ganancia cuando se omite es la elevación, y para *P. reflexus* es la temperatura estacional; estas variables parecen tener la información más útil por sí misma y la mayor cantidad de información ausente en las otras variables.

### *Modelo actual del nicho climático potencial*

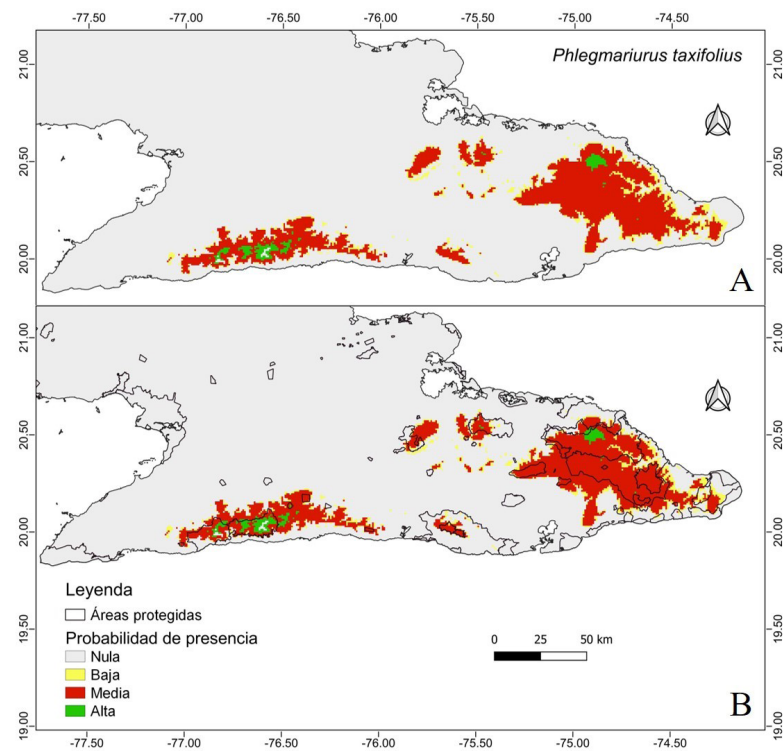
La modelación en MaxEnt reveló que el patrón de distribución se encuentra principalmente en Cuba oriental, en los distritos de los sectores Maesticum (Sierra Maestra) y Moanicum (macizo Nipe-Sagua-Baracoa) (**Figuras 3A, 4A, 5A**) y, en menor medida, *P. taxifolius* en los distritos del sector Trinidadicum (Alturas de Guamhuaya) (**Figura 6A**). La distribución potencial del nicho climático para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus*



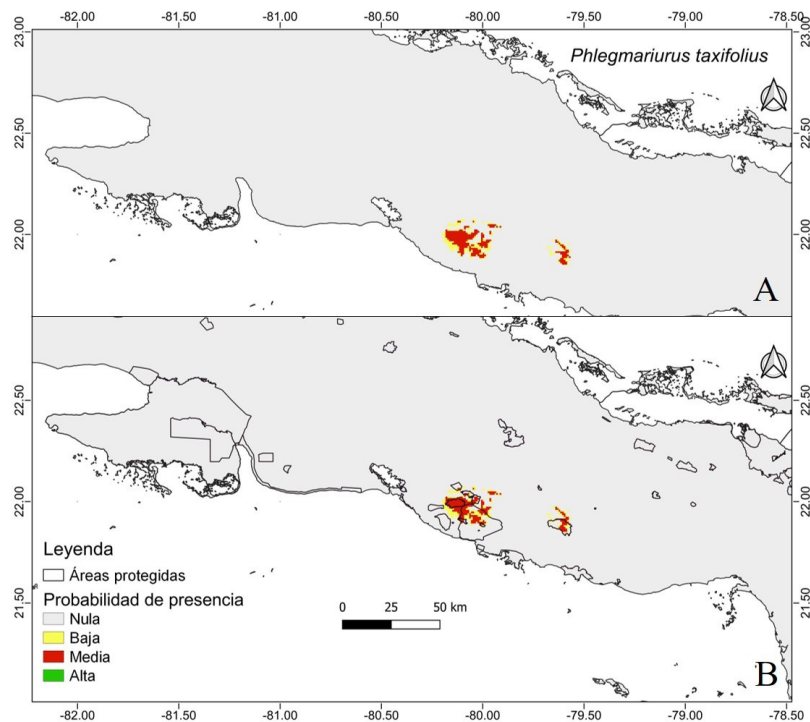
**Figura 3.** Mapa de distribución actual de nicho climático potencial (A) y cobertura brindada por el SNAP (B) para *P. acerosus* en Cuba



**Figura 4.** Mapa de distribución actual de nicho climático potencial (A) y cobertura brindada por el SNAP (B) para *P. reflexus* en Cuba



**Figura 5.** Mapa de distribución actual de nicho climático potencial (A) y cobertura brindada por el SNAP (B) para *P. taxifolius* en Cuba oriental



**Figura 6.** Mapa de distribución actual de nicho climático potencial (A) y cobertura brindada por el SNAP (B) para *P. taxifolius* en Cuba central

no se corresponde con los distritos fitogeográficos en los que han sido reportadas las especies. Para *P. acerosus*, la distribución potencial fue alta en los distritos Purialense, Turquinense y Piedraense, y media en Cristalense, Moaense, Yaterense y Guantanamense. Para *P. taxifolius* fue alta en los distritos Moaense y Turquinense, y media en Trinidadense, Spirituense, Nipense, Cristalense, Yaterense, Baracoense, Purialense y Guantanamense. Para *P. reflexus* fue alta en los distritos Purialense, Turquinense y Piedraense, y media en Nipense, Cristalense, Moaense, Yaterense y Guantanamense.

Según el área climática adecuada modelada para la actualidad, la probabilidad de presencia de *P. acerosus* es alta en 250,66 km<sup>2</sup> y media en 3.129 km<sup>2</sup>; la de *P. taxifolius* es alta en 232,4 km<sup>2</sup> y media en 4.355 km<sup>2</sup>, y la de *P. reflexus* es alta en 393,42 km<sup>2</sup> y media en 6.073,11 km<sup>2</sup>. El nicho climático para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* en la actualidad está mayormente influenciado por la elevación (con alturas máximas de 1.465 m s.n.m., 1.440 m s.n.m. y 1.618 m s.n.m., respectivamente), en tanto que para *P. acerosus* y *P. reflexus* por la temperatura estacional, que en el rango de adecuación ambiental va de 140 a 230.

#### **Áreas de nicho climático prioritarias para la conservación**

Actualmente en Cuba oriental hay 13 áreas protegidas para *P. acerosus* y *P. reflexus* que presentan condiciones climáticas adecuadas (**Figuras 3B y 4B**). Las áreas con probabilidad de presencia media se encuentran en el Parque Nacional Mensura-Pilotos, el Parque Nacional Pico Cristal, el Parque Nacional Alejandro de Humboldt y la Reserva Florística Manejada Sierra Canasta. Las áreas climáticas prioritarias para estas dos especies, con probabilidad de presencia alta, se encuentran en la Reserva Ecológica Pico Caracas, el Parque Nacional Turquino, el Parque Nacional Pico Bayamesa, la Reserva Ecológica El Gigante, la Reserva Ecológica Loma del Gato-Monte Líbano, el Paisaje Natural Protegido Gran Piedra, la Reserva Ecológica Pico Mogote, la Reserva de la Biósfera Baconao y el Área Protegida Cuchillas del Toa.



Para *P. taxifolius* hay condiciones climáticas adecuadas en 17 áreas protegidas (**Figuras 5B y 6B**). Las áreas con probabilidad de presencia media se encuentran en la Reserva Ecológica Pico San Juan, la Reserva Ecológica Lomas de Banao, el Paisaje Natural Protegido Hanabanilla, el Paisaje Natural Protegido Topes de Collantes, la Reserva Ecológica Pico Caracas, la Reserva Ecológica Loma del Gato-Monte Líbano, el Paisaje Natural Protegido Gran Piedra, la Reserva Ecológica Pico Mogote, la Reserva de la Biósfera Baconao, el Parque Nacional Mensura-Pilotos, el Parque Nacional Pico Cristal y la Reserva Florística Manejada Sierra Canasta. Las áreas prioritarias para esta especie, con probabilidad de presencia alta se encuentran en el Parque Nacional Turquino, el Parque Nacional Pico Bayamesa, la Reserva Ecológica El Gigante, el Parque Nacional Alejandro de Humboldt y el Área Protegida Cuchillas del Toa. Sin embargo, parte del área climática potencial para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* no se encuentra bajo cobertura de las áreas protegidas del SNAP.

## Discusión

### *Distribución potencial de nicho climático*

Los modelos predicen que el nicho climático para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* según la fitorregionalización de **Borhidi & Muñiz** (1986) coinciden con los distritos que según el criterio de **Caluff et al.** (2008) tienen mayor riqueza de la pteridoflora: Turquinense, Piedraense, Purialense, Yaterense y Trinidadense. Una especie no siempre se encuentra en todas las áreas potenciales de distribución, como se explica en el diagrama de BAM de **Soberón & Peterson** (2005) y de **Broennimann et al.** (2006), ya que los resultados de una modelación de nicho ecológico idóneo y la amplitud de distribución de las especies son probabilísticas (**Durán Puga et al.**, 2018). La presencia o ausencia de una especie en un espacio depende de limitaciones históricas que determinan su distribución geográfica (**Maciel-Mata et al.**, 2015). Se considera que parte del macizo Sagua-Baracoa (Sierra de Nipe y Moa-Baracoa-Asunción-Sierra del Purial) permanece emergido por lo menos desde la parte media del Cretácico Superior. A fines del Cretácico y principios del Paleoceno existían territorios emergidos que actualmente forman parte de la Sierra Maestra (**Reyes**, 2012). En ambos grupos montañosos se encuentran las mayores áreas climáticas adecuadas que ofrece el modelo de distribución del nicho climático potencial para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus*, especialmente en la Sierra Maestra, donde se encuentra el 16,6 % de la pteridoflora del archipiélago cubano (**Caluff et al.**, 2008).

Las áreas climáticas adecuadas para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* se corresponden con las formaciones vegetales húmedas de montaña. El bosque siempreverde mesófilo se desarrolla a partir de los 400 m s.n.m. hasta colindar con el bosque pluvial montano, que crece desde los 800 hasta los 1.400 m s.n.m., seguido por el bosque nublado que se desarrolla como vegetación zonal a partir de los 1.500 m s.n.m. (**Capote & Berazaín**, 1984; **Reyes**, 2011). Los distritos Moaense, Baracoense y Purialense en general poseen elevaciones medias o bajas, pero la muy elevada pluviosidad en estos territorios actúa como un factor compensador que posibilita que muchos elementos de alta montaña proliferen allí, por ejemplo, las especies de Lycopodiaceae (**Caluff et al.**, 2008). En Cuba el 5 % de la flora vascular es epífita en cualquiera de sus variantes (**Hechavarría et al.**, 2002) y se distribuye fundamentalmente en los bosques pluviales y nublados de los principales complejos orográficos del país (**Cuéllar**, 2001).

La geología de la región define grandes diferencias entre los tipos de vegetación debido al suelo y sus condiciones (**Reyes**, 2011). Las características edáficas en los sectores Maesticum y Moanicum son similares, con abundancia de suelos ácidos, serpentinosos ferralíticos o fersialíticos (**Caluff et al.**, 2008). Para que una población se establezca en un determinado lugar, las diásporas deben haberse dispersado a una zona donde interactúen todas las variables tanto ambientales como biológicas requeridas para la existencia y reproducción de la especie (**Shiple et al.**, 2013). Dado que la modelación se hizo solamente con las variables ambientales, las áreas que realmente o probablemente habitan las

especies deben ser más reducidas de lo que proyectan los modelos realizados en MaxEnt, pues diversos factores como las interacciones con otras especies y la presión generada por las actividades antropogénicas pueden limitar la ocupación de las áreas ambientalmente adecuadas para las especies (Peterson *et al.*, 2011).

Los requerimientos climáticos de mayor importancia en la distribución de las áreas climáticas adecuadas para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* son la elevación y la temperatura estacional. En los estudios de distribución potencial de Armenta-Montero *et al.* (2015) las tres variables que mejor explicaron la presencia de *Phlegmariurus* fueron la precipitación en el mes más lluvioso, la altitud y la temperatura media del trimestre más lluvioso. La pluvisilva montana es la formación vegetal donde más abunda *Phlegmariurus*; esta se presenta en el bioclima termoxerochiménico sin período seco (ecuatorial húmedo) (Ricardo *et al.*, 2009). En los distritos de los sectores Maesticum (Sierra Maestra) y Moanicum (macizo Nipe-Sagua-Baracoa) se encuentran las mayores elevaciones y las condiciones climáticas que permiten la existencia de los bosques pluviales montanos con condiciones de humedad relativa, temperatura y pluviosidad ideales para las pteridofitas terrestres y epífitas (Caluff *et al.*, 2008).

### Áreas prioritarias del nicho climático

Los modelos de distribución actual del nicho climático para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* tienen afinidad con las áreas protegidas que coinciden con los grandes macizos montañosos de la Sierra Maestra Occidental. Las áreas protegidas a nivel global han sido diseñadas para proteger características naturales específicas, especies y comunidades *in situ*, y no se han tenido en cuenta los posibles cambios en la distribución y composición del ecosistema por efectos del cambio climático, como plantean Gaston *et al.* (2008).

Aunque existen áreas potenciales que no se encuentran dentro de la demarcación de las áreas protegidas, esto solo implica que las condiciones ambientales necesarias para que habite la especie persistirán en las zonas que actualmente se consideran prioritarias para su conservación y en donde se realizan acciones de conservación. No obstante, las amenazas antropogénicas como la tala selectiva, la actividad agropecuaria y el cambio de uso de suelos pueden afectar tanto a los bosques donde habitan *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* y las especies claves de las pluvisilvas, ubicados dentro de dichas áreas protegidas, como a los que se encuentran en zonas no protegidas, por lo que es imprescindible tomar ambos factores en cuenta para garantizar la conservación de las especies (Molina *et al.*, 2018).

La planificación de la conservación debe basarse en las previsiones de las condiciones climáticas futuras y prestar especial atención a las zonas muy vulnerables (WWF, 2018). La conservación de *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* dependerá de su capacidad para adaptarse al cambio climático en el futuro (Alsos *et al.*, 2009) y de su capacidad para colonizar nuevas áreas, o de su capacidad de desplegar las modificaciones fisiológicas para adaptarse al nuevo entorno (Chown *et al.*, 2010). Los estudios sobre el tamaño y la tendencia de las poblaciones serían beneficiosos para trazar acciones de conservación.

## Conclusiones

Las áreas climáticas adecuadas para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* están determinadas por la elevación y la temperatura estacional, lo que permite afirmar que la especie tiene áreas de condiciones climáticas con alta probabilidad de presencia en Cuba oriental.

Las áreas prioritarias para la conservación de *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* están en correspondencia con las áreas protegidas en los macizos montañosos de Nipe-Sagua-Baracoa y la Sierra Maestra, siendo este último el de mayor importancia para los taxones.

Por último, se recomienda modelar el nicho ecológico para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* a nivel local en las áreas protegidas empleando variables topográficas, de uso y tipos de suelo y de interacciones bióticas para crear modelos más precisos de distribución potencial a esta escala. Se hace necesario promover acciones de restauración

y conservación *in situ* para *P. acerosus*, *P. taxifolius* y *P. reflexus* en función de estos resultados y sus proyecciones como parte del programa de gestión de riesgo y cambio climático en los planes operativos y de manejo en las áreas protegidas.

### Contribución de los autores

Conceptualización: RSQ y AJC, Visualización: RSQ y ACG, Curación de los datos y Software: RSQ, ACG y RML, Supervisión: AJC, Metodología, redacción y revisión del manuscrito: Todos los autores.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

### Referencias

- Alsos, I. G., Alm, T., Normand, S., Brochmann, C.** (2009). Past and future range shifts and loss of diversity in dwarf willow (*Salix herbacea* L.) inferred from genetics, fossils and modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 223-239. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2008.00439.x>
- ANPP.** (2010). Ley No. 110 “Modificativa de la Ley No. 1304 de 3 de julio de 1976 de la División Político-Administrativa”, de fecha 1 de agosto de 2010. Gaceta Oficial de La República de Cuba, (Extraordinaria: 139-140), de fecha 2 de septiembre de 2010.
- Araújo, M.B., New, M.** (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Armenta-Montero, S., Carvajal-Hernández, C.I., Ellis, E.A., Krömer, T.** (2015). Distribution and conservation status of *Phlegmariurus* (Lycopodiaceae) in the state of Veracruz, Mexico. *Tropical Conservation Science*, 8(1), 114-137.
- Aroca-González, B.D., Gradstein, R., González-Nieves, L.M.** (2021). ¿En peligro o no? Distribución potencial de la hepática *Pleurozia paradoxa* en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(174), 260-271.
- Borhidi, A., Muñoz, O.** (1986). The phytogeographic survey of Cuba. II. Floristic relationships and phytogeographic subdivision. *Acta Botanica Hungarica*, 32(1), 3-48.
- Botanic Garden, Botanical Museum Berlin.** (2017). Herbarium Berolinense, Berlin (B).
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G. F., Alkemade, J. M. R., Guisan, A.** (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12, 1079-1093.
- Brouillet, L., Sinou, C.** (2021). Marie-Victorin Herbarium (MT) - Plantes vasculaires. Université de Montréal Biodiversity Centre.
- Caluff, M.G., Sánchez, C.V., Shelton, G.** (2008). Helechos y plantas afines (Pteridophyta) de Cuba. I. Fitogeografía. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 21-49.
- Cameron, E., Auckland Museum AM.** (2022). Auckland Museum Botany Collection. Auckland War Memorial Museum. Occurrence Dataset. <https://doi.org/10.15468/mnjkvv> accessed via GBIF.org on 2022-04-15.
- Capote, R.P., Berzaín, R.** (1984). Clasificación de las formaciones vegetales de Cuba. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 5, 27-75. <https://doi.org/10.2307/42596743>
- Cejas, F., Novua, O., Pérez, J.** (2007). Modelación del comportamiento de formaciones vegetales cubanas ante un aumento de la temperatura. *Acta Botánica Cubana*, 198, 21-29.
- Cezón, K.** (2018). CUBA: Herbario de la Academia de Ciencias, La Habana, Cuba: HAC-Pteridophyta.
- Chown, S., Hoffmann, A., Kristensen, T., Angilletta M J, J., Stenseth, N., Pertoldi, C.** (2010). Adapting to climate change: a perspective from evolutionary physiology. *Clim Res*, 43, 3-15. <https://doi.org/10.3354/cr00879>
- Cuéllar, N.** (2001). Caracterización del epifitismo vascular de la Región Oriental de Cuba. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- Durán-Puga, N., Loya-Olguín, J.L., Ruiz-Corral, J.A., González-Eguiarte, D.R., García-Paredes, J.D., Martínez-González, S.** (2018). Impactos del cambio climático en la distribución potencial de *Morus alba* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2511. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.475>

- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li J, Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC. M., Townsend Peterson, A., Phillips, S.J., ... Zimmermann, N.E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.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.
- García, R.A., Cabeza, M., Rahbek, C., Araújo, M.B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344. <https://doi.org/10.1126/science.1247579>
- Gaston, K.J., Jackson, S.F., Nagy, A., Cantú-Salazar, L., Johnson, M. (2008). Protected areas in Europe: Principle and practice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, 97-119. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.006>
- GBIF.org. (2022). Página de Inicio de GBIF. Fecha de consulta: 21 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.gbif.org>.
- Grant, S., von Konrat, M. (2020). *Field Museum of Natural History (Botany) Pteridophyte Collection*. Fecha de consulta: 21 de marzo de 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/4nodxs>
- Hanley, J.A., McNeil, B.J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29-36.
- Hechavarría, L., Oviedo, R., Holst, B. K. (2002). Epiphytic angiosperms of Cuba. *Selbyana*, 23(2), 224-244.
- Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P., Pearson, R.G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3), 385-393.
- Maciel-Mata, C.A., Manríquez-Morán, N., Octavio-Aguilar, P., Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria*, 25(2), 3-19. <https://doi.org/10.15174/au.2015.690>
- Martínez-Quintero, B., Echeverri Rubio, A., Gaviria, F. (2017). Potential distribution of *Oxysternon conspicillatum* (Weber, 1801) in different climate change scenarios in Colombia. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 21(2), <https://doi.org/10.17151/bccm.2017.21.2.13>
- Molina, C., Castillo, A., Samaniego, H. (2018). Evaluación del nicho ambiental de *Lycalopex fulvipes* (zorro de Darwin) y la incidencia del cambio climático sobre su distribución geográfica. *Gayana*, 82(1). <https://doi.org/10.4067/s0717-65382018000100065>
- Morejón, R., Sánchez, C., Regalado, L., Hernández, A., Daniel, A. (2020). *CUBA: Herbario del Jardín Botánico Nacional, La Habana, Cuba: HAJB-Pteridophyta*. <https://doi.org/10.15468/5gpcoo>
- Morueta-Holme, N., Fløjgaard C., Svenning, J.C. (2010). Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal Species. *PLoS ONE*, 5(4), 1-12.
- Natural History Museum. (2022). *Natural History Museum (London) Collection Specimens*. <https://doi.org/10.5519/0002965>
- Øllgaard, B. (2012). New combinations in neotropical Lycopodiaceae. *Phytotaxa*, 57, 10-22.
- Orrell T. Informatics Office. (2021). *NMNH Extant Specimen Records (USNM, US)*. <https://doi.org/10.15468/hnhrg3>
- Pearson, R.G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., Peterson, A.T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117.
- Peterson, A., Soberon, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Bastos-Araujo, M. (2011). Ecological niches and geographic distributions. *Choice Reviews Online*, 49(11), 49-6266-49-6266. <https://doi.org/10.5860/choice.49-6266>
- Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Araújo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions (MPB-49)*. Princeton University Press.
- Phillips, S. J. (2005). A brief tutorial on Maxent. *AT&T Research*, 190(4), 231-259.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- QGIS Development Team. (2017). Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

- Ramírez, J., Tulig, M., Watson, K., Thiers, B.** (2021). *The New York Botanical Garden Herbarium (NY)*. <https://doi.org/10.15468/6e8nje>
- Reyes, O.J.** (2011). Clasificación de la vegetación de la Región Oriental de Cuba. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 32-33, 59-71.
- Reyes, O.J.** (2012). Zonas emergidas en Cuba Oriental, su influencia en la flora cubana. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 32-33, 73-78.
- Ricardo, N., Herrera, P.P., Cejas, F., Bastart, J.A., Regalado, T.** (2009). Tipos y características de las formaciones vegetales de Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 203, 1-42.
- Ryan Shipley, J., Contina, A., Batbayar, N., Bridge, E.S., Peterson, A.T., Kelly, J.F.** (2013). Niche conservatism and disjunct populations. *The Auk*, 130(3), 476-486. <https://doi.org/10.1525/auk.2013.12151>
- Sánchez, C.** (2021). Inventario de los licófitos y helechos de Cuba: sinonimia, distribución y estado de conservación. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 42, 1-53.
- Schaefer, H.C., Jetz, W., Böhning-Gaese, K.** (2008). Impact of climate change on migratory birds: Community reassembly versus adaptation. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 38-49. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00341.x>
- Soberón, J., Peterson, A.** (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2 (January). <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Solomon, J., Stimmel, H.** (2019). Tropicos Specimen Data. *Missouri Botanical Garden*. <https://doi.org/10.15468/hja69f>
- Thuiller, W., Thuiller, W., Richardson, D., Pysek, P., Midgley, G., Hughes, G., Rouget, M.** (2005). Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biology*, 11, 2234-2250. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01018.x>
- UNEP-WCMC, IUCN.** (2022). Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA) [Online]. *The World Bank*. <http://protectedplanet.net/>
- Vásquez-Morales, S.G., Téllez-Valdés, O., Pineda-López, M. del R., Sánchez-Velásquez, L.R., Flores-Estevez, N., Viveros-Viveros, H.** (2014). Effect of climate change on the distribution of *Magnolia schiedeana*: a threatened species. *Botanical Sciences*, 92(4), 575-585.
- Wilson, R.D., Trueman, J.W.H., Williams, S.E., Yeates, D.K.** (2007). Altitudinally restricted communities of Schizophoran flies in Queensland's Wet Tropics: Vulnerability to climate change. *Biodiversity and Conservation*. 16, 3163–3177. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9170-x>
- WWF.** (2018). La vida silvestre en el calentamiento global. Recuperado en marzo de 2018 de [wwf.org.uk/wildlife-warming-world](http://wwf.org.uk/wildlife-warming-world)