

MODELAMIENTO DE NICHOS ECOLÓGICOS DE DOS ESPECIES DE SALAMANDRAS NEOTROPICALES (PLETHODONTIDAE): *OEDIPINA PARVIPES* (PETERS, 1879) Y *OEDIPINA COMPLEX* (DUNN, 1924)

ECOLOGICAL NICHE MODELING OF TWO SPECIES OF NEOTROPICAL SALAMANDERS (PLETHODONTIDAE): *OEDIPINA PARVIPES* (PETERS, 1879) AND *OEDIPINA COMPLEX* (DUNN, 1924)

Andrés Ricardo López-Preciado^{1,2*}, Cristian Camilo Ramírez-Geleano^{1,2} & Laura Nathaly Garzón-Matamoros^{1,3}

¹ Grupo de investigación Biotecnología y Medio Ambiente, Departamento de Biología, Universidad INCCA de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

² Semillero de investigación Biogeografía y Ecología Evolutiva Neotropical (BEEN), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

³ Grupo de investigación en artrópodos KUMANGUI, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

*Correspondence: arlopezp@unincca.edu.co

Received: 2023-11-08. Accepted: 2024-01-18. Published: 2024-02-22.

Editor: Norberto Martínez-Méndez, México.

Abstract.— Tropical salamanders of the Plethodontidae family are organisms for which there is no clear information about their geographical distribution, ecological aspects and the environmental conditions in which they can live. Ecological niche modeling is considered a useful tool to predict areas of environmental suitability, as well as the geographic distributions of understudied species. In this work, a search was carried out for reliable historical records, in open access data networks, as well as in scientific articles on the presence of *Oedipina parvipes* and *Oedipina complex*, which together with the implementation of climatic variables, allowed the performance of modeling of ecological niche of these species under the maximum entropy principle of MaxEnt using the Kuenm package. Our results predict areas of high environmental suitability for different regions of Central and South America, highlighting the Panama Canal and the Colombian Pacific as the most optimal places for the presence of these species of salamanders. This work shows the need for research in different fields in understudied regions where the presence of these species that do not have records or whose records are not completely reliable is predicted. Identifying the potential distribution areas of these species is of utmost importance so that informed decisions can be made for the conservation of vulnerable species that may be affected by human activities.

Key words.— Environmental suitability, Geographic distribution, MaxEnt, Neotropics, Plethodontids.

Resumen.— Las salamandras tropicales de la familia Plethodontidae son organismos de los que no se tiene información clara sobre su distribución geográfica, aspectos ecológicos y las condiciones ambientales en las que pueden habitar. Los modelamientos de nicho ecológico son considerados una herramienta útil para predecir las áreas de idoneidad ambiental, así como las distribuciones geográficas de especies poco estudiadas. En este trabajo se efectuó una búsqueda de registros históricos confiables, en redes de datos de acceso abierto, así como en artículos científicos de las presencias de *Oedipina parvipes* y *Oedipina complex*, que junto con la implementación de variables climáticas, permitieron la realización de modelamientos de nicho ecológico de estas especies bajo el principio de máxima entropía de MaxEnt mediante el paquete Kuenm. Nuestros resultados predicen zonas de alta idoneidad

ambiental para diferentes regiones de Centroamérica y Suramérica, destacando el canal de Panamá y el Pacífico colombiano como los lugares más óptimos para la presencia de estas especies de salamandras. Este trabajo muestra la necesidad de aumentar investigaciones de diferentes campos en las regiones poco estudiadas donde se predice la presencia de estas especies que no cuentan con registros o sus registros no son del todo confiables. Identificar las áreas potenciales de distribución de estas especies es de suma importancia para que se puedan tomar decisiones informadas para la conservación de especies vulnerables y que pueden verse afectadas por las actividades humanas.

Palabras clave.- Distribución geográfica, Idoneidad ambiental, MaxEnt, Neotrópico, Pletodontidos.

INTRODUCCIÓN

El género *Oedipina* (Keferstein, 1868), conocido también como las salamandras gusano, son un grupo de organismos altamente diverso pertenecientes a la familia Plethodontidae, se caracterizan por presentar cuerpos delgados y alargados, extremidades diminutas y colas muy largas (Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023). Este género cuenta con una distribución amplia, abarcando desde el sur de México hasta el noreste de Suramérica, en los límites entre Colombia y Ecuador (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; García-París & Wake 2000; Savage, 2002; McCranie et al., 2008; Köhler, 2011; Acosta-Galvis et al., 2020; Acosta-Galvis, 2023). Habitan desde el nivel del mar hasta elevaciones superiores a los 2200 m.s.n.m. (Köhler, 2011).

Las *Oedipinas* son animales fosoriales o semifosoriales, se encuentran debajo de rocas, troncos caídos, hojarasca y material vegetal en descomposición. Sin embargo, también se ha reportado que suelen movilizarse a través de la vegetación

cercana al suelo y viviendo en madrigueras de insectos dentro de árboles podridos (Savage, 2002; Köhler 2011).

En Colombia la representación de este género es limitada y poco común, contando tan solo con dos especies reportadas: *Oedipina parvipes* (Peters, 1879) y *Oedipina complex* (Dunn, 1924) (Fig. 1) (McCranie et al., 2008; Acosta-Galvis et al., 2020;). *Oedipina parvipes* es una salamandra que se caracteriza por contar con 17 surcos costales, cabeza más estrecha que el resto del cuerpo, hocico alargado y estrecho, ojos relativamente pequeños, cola delgada y mucho más larga que el cuerpo, extremidades libres, de 0-19 dientes maxilares y de 9-19 dientes vomerinos en serie; su coloración en el dorso es café oscuro o morado pálido, mientras que en el vientre presenta un color crema pálido (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023). Es una especie terrestre, que habita en el suelo, sobre la hojarasca, o debajo de troncos de las selvas húmedas tropicales



Figure 1. A. *Oedipina parvipes*. Photo taken by Brian Kubicki (Köhler, 2011), and **B.** *Oedipina complex*. Photo taken by Michael W. Itgen.

Figura 1. A. *Oedipina parvipes*. Foto tomada por Brian Kubicki (Köhler, 2011), y **B.** *Oedipina complex*. Foto tomada por Michael W. Itgen.

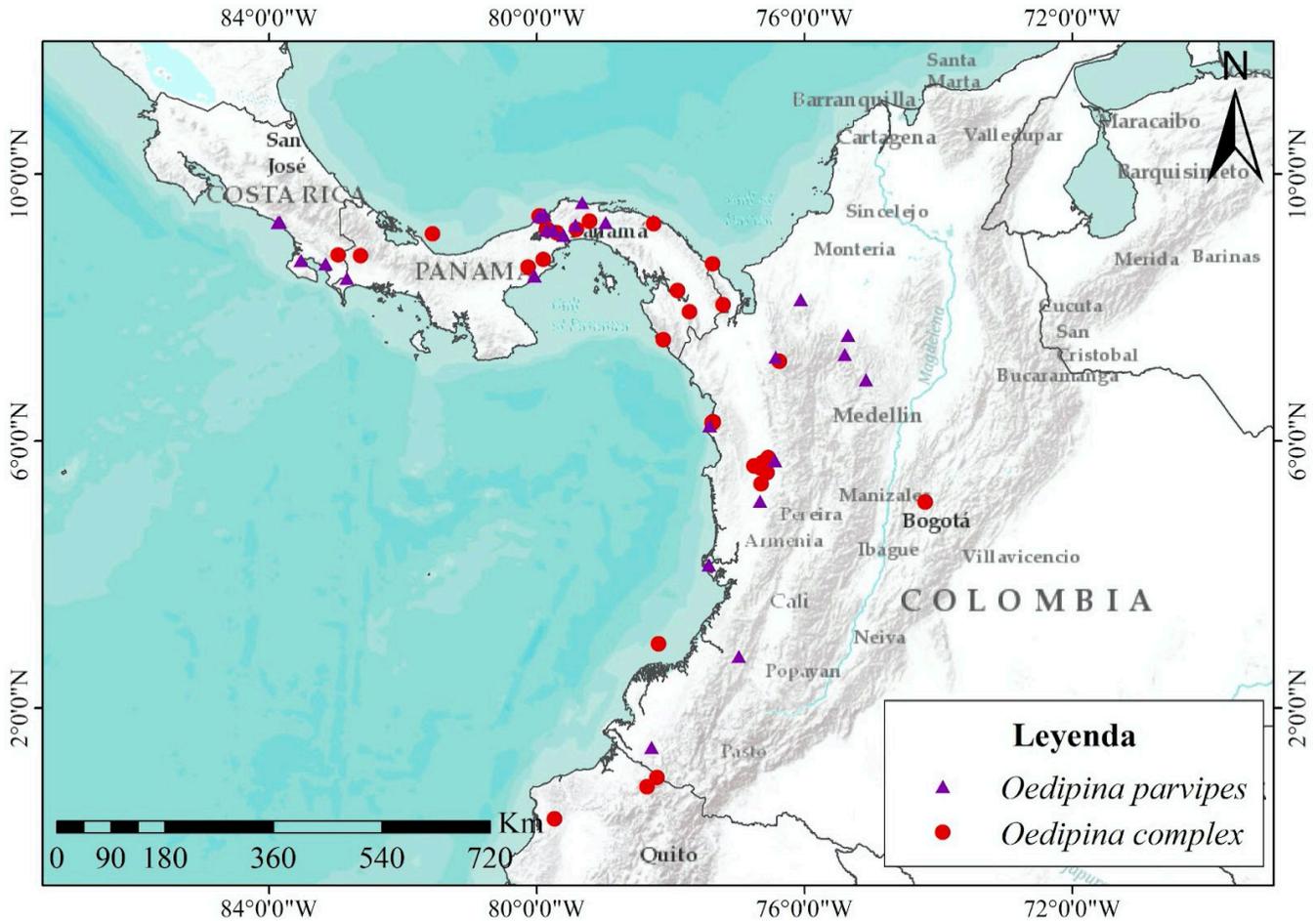


Figure 2. Geographic distribution of *Oedipina parvipes* (purple triangles) and *Oedipina complex* (red circles). Map designed in ArcMap 10.8.

Figura 2. Distribución geográfica de *Oedipina parvipes* (triángulos morados) y *Oedipina complex* (círculos rojos). Mapa diseñado en ArcMap 10.8.

de tierras bajas, y está asociada principalmente a los bosques poco perturbados (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023). Se distribuye ampliamente desde el sur de Costa Rica hasta el suroccidente de Colombia (Fig. 2), (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Savage, 2002; Lynch & Suárez-Mayorga, 2004; Castro-Herrera & Vargas-Salinas, 2008; Köhler, 2011; Mueses-Cisneros & Moreno-Quintero, 2012; Romero & Lynch, 2012; Acosta-Galvis et al., 2020; AmphibiaWeb, 2023; Frost, 2023). Poco se sabe de su ecología, comportamiento y estado de conservación, sin embargo, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) la clasifica en la categoría de Preocupación Menor (Solís et al., 2008).

Por otra parte, *Oedipina complex* es una salamandra de tamaño muy pequeño y cuerpo alargado, se caracteriza por presentar 19 surcos costales, cabeza pequeña y ovalada, hocico corto y estrecho,

ojos grandes, cola más larga que el cuerpo, extremidades libres y cortas, de 13-45 dientes maxilares y de 13-32 dientes vomerinos en serie; su coloración es negro pardo, con manchas café en el dorso, más concentradas en la parte dorsal de la cola y en la línea dorsolateral de cada lado del cuerpo, en cuanto al vientre tiene una coloración plomo con manchas (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023). Generalmente, esta especie vive en el suelo y en vegetación tupida, o debajo de troncos y rocas de las selvas húmedas tropicales de tierras bajas.

La especie no sobrevive en áreas degradadas, pero se puede encontrar en el borde de los bosques (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023). Tiene una amplia distribución desde los límites entre Costa Rica y Panamá, hasta el noroccidente de Ecuador (Fig. 2), (Brame & Wake, 1963; Brame, 1968; Savage, 2002; Lynch & Suárez-Mayorga, 2004;

Köhler, 2011; Medina-Rangel et al., 2017; Acosta-Galvis et al., 2020; AmphibiaWeb, 2023; Frost, 2023). No se cuenta con mucha información respecto a su ecología y comportamiento. En cuanto a su estado de conservación, también está clasificada por la IUCN en la categoría de Preocupación menor (Castro-Herrera et al., 2004).

El modelamiento de nicho ecológico (MNE), se ha perfilado en los últimos años, como una de las herramientas más útiles al momento de realizar estudios relacionados con la diversidad, ecología y conservación de muchas especies, ya que permite revelar información sobre las diferentes condiciones que pueden afectar la presencia y distribución geográfica de estas (Soberon & Peterson, 2005; Peterson, 2006; Peterson & Soberon, 2012; Warren, 2012; Simões et al., 2020). Los MNE estiman la idoneidad ambiental y las áreas de distribución potencial, por medio de la correlación de los registros de presencia de las especies, con las condiciones geográficas y ambientales asociadas a ellas, utilizando distintos tipos de algoritmos matemáticos (Peterson, 2006; Elith & Leathwick, 2009; Warren, 2012; Mota et al., 2020; Bolom-Huet et al., 2022).

Estos análisis tienen un gran valor en la estimación y evaluación de la distribución potencial y por lo tanto, para establecer el estado de conservación de especies raras, endémicas o poco estudiadas, ya que los límites de la distribución es uno de los aspectos principales que se tienen en cuenta a la hora de clasificar las especies en alguna categoría de amenaza (UICN, 2012; Guisan et al., 2013; Maciel-Mata et al., 2015; Bolom-Huet et al., 2022). Dichos modelamientos también pueden ser de gran utilidad a la hora establecer áreas adecuadas para poblaciones de especies recientemente descubiertas, detectar barreras climáticas en la distribución y explorar divergencias ecológicas entre taxones estrechamente relacionados que comparten distribuciones similares (Cunningham et al., 2009; Glor & Warren, 2011; Hu & Jiang, 2018; Bolom-Huet et al., 2022).

En este sentido, el objetivo del presente estudio fue identificar las áreas en donde las condiciones ambientales son óptimas para la presencia de *O. parvipes* y *O. complex* en las regiones en las cuales se distribuyen, mediante modelamientos de nicho ecológico, bajo el principio de máxima entropía de MaxEnt (Phillips et al., 2006), y de esta manera promover la realización de futuros muestreos que permitan la obtención de nuevos registros en zonas poco estudiadas, y plantear estrategias y toma de decisiones que contribuyan a la conservación de estas dos especies.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención y tratamiento de los datos de ocurrencia y las variables climáticas

Los datos de ocurrencia de *O. parvipes* y *O. complex* se obtuvieron de las bases de datos en línea Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (GBIF, 2023) y VertNet (Constable et al., 2010), además de literatura científica que cuenta con información georreferenciada de las dos especies. Se utilizaron filtros de búsqueda en cada una de las plataformas, para disminuir sesgos taxonómicos y de georreferenciación, por ejemplo de especímenes mal identificados y localidades mal registradas (Escalante, 2009).

Se obtuvieron las variables climáticas de la base de datos WorldClim en su versión 2.1, a una resolución de 30 segundos de arco. Estas variables representan promedios anuales y extremos de temperatura y precipitación recopilados durante los últimos 40 años (Fick & Hijmans, 2017). También se utilizaron las variables climáticas de ENVIREM (Title & Bemmels, 2018), debido a que factores como la evapotranspiración, métricas de humedad y aridez relativa, pueden afectar significativamente la presencia y el uso de microhábitats de los anfibios (Currie, 1991; Rödder & Engler, 2011; Gómez-Rodríguez et al., 2015; Farallo & Miles, 2016; Farallo et al., 2018).

Los datos de ocurrencia se previsualizaron en ArcMap 10.8 para eliminar aquellos registros duplicados y con una incertidumbre mayor a los 5 km² en su georreferenciación. Además, se estimó la tendencia de estos datos respecto a las variables climáticas, excluyendo los registros atípicos. Solo se tuvo en cuenta registros a nivel continental, descartando toda ocurrencia en islas y considerando solo registros que están espaciados al menos 1 km² entre sí, debido a la capacidad de dispersión de los pleodontidos (Smith & Green, 2005; Lowe et al., 2008). De esta manera se redujo significativamente el sobreajuste en los modelos (Segurado et al., 2006; Boria et al., 2014). Una vez realizado el tratamiento de los datos de ocurrencia de *O. parvipes* y *O. complex*, se contó con 27 y 31 registros de presencia, respectivamente.

Para la selección de variables climáticas, primero se delimitó el área de accesibilidad M (Soberón & Peterson, 2005), teniendo como referencia la regionalización biogeográfica del neotrópico propuesta por Morrone et al. (2022), en la cual las provincias están reconocidas bajo la combinación de criterios climáticos, geológicos y biológicos. Se realizó un corte al archivo vectorial (formato shapefile) de la regionalización biogeográfica

mencionada utilizando ArcMap 10.8 para extraer solo el conjunto de las provincias en donde se registró la presencia de las especies. El área M resultante se conforma de las siguientes provincias: 18 (Cauca), 19 (Chocó-Darién), 23 (Guatuso-Talamanca), 24 (Magdalena), 25 (Puntarenas-Chiriquí), 29 (Western Ecuador).

Luego, se realizó una prueba de correlación de Pearson en el paquete `ntbox` v. 0.7.0 de R (Osorio-Olvera et al., 2020), utilizando las variables en el área de accesibilidad previamente definida y se descartó aquellas con coeficientes de correlación de un umbral de $r \geq 0,80$ (Elith et al., 2010; Elith et al., 2011). De las variables altamente correlacionadas se escogieron aquellas que están más asociadas a la biología de los organismos según la literatura consultada. El set de variables para *O. parvipes* fue: Temperatura media anual (Bio 1), Isotermalidad (Bio 3), Precipitación anual (Bio 12), Evapotranspiración potencial anual (annualPET), Métrica de humedad y aridez relativas (climaticMoistureIndex) y Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial (PETseasonality). Mientras que para *O. complex* fue: Bio 1, Rango medio diurno (Bio 2), Estacionalidad de las precipitaciones (Bio 15), Precipitación del trimestre más cálido (Bio 18), annualPET, climaticMoistureIndex y PETseasonality.

Modelamiento de nicho ecológico

Se construyeron los modelos de nicho ecológico de las dos especies, usando el 75% de los datos para entrenamiento y 25% para evaluación, utilizando MaxEnt v. 3.4.4 k (Phillips et al., 2006), a través del paquete de R `Kuenm` v. 1.1.10 (Cobos et al., 2019). La parametrización del modelamiento siguió lo propuesto por Cobos et al. (2019) con algunas modificaciones. Para cada especie, se evaluaron 434 modelos usando un set de variables, 14 valores de multiplicador de regularización (0.1–1.0 en intervalos de 0.1, 2–5 en intervalos de 1) y todas las 29 combinaciones posibles utilizando los cinco tipos de clase: (lineal = l, cuadrática = q, producto = p, umbral = t y bisagra = h).

Los modelos finales para las dos especies se produjeron con 100 réplicas bootstraps y un análisis jackknife, utilizando el conjunto completo de ocurrencias y las parametrizaciones seleccionadas. Se evaluó el rendimiento de los modelos candidatos en función de la significancia de la Característica operativa del receptor parcial (ROC parcial) con 500 iteraciones y 50% de bootstrap, tasas de omisión $\leq 5\%$ ($E = 5\%$). También se evaluó la complejidad del modelo mediante el criterio de información de Akaike corregido (AICc), y considerando valores Delta del AICc de los modelos construidos ≤ 2 (Tabla 1).

Table 1. Statistical performance of the final models of *Oedipina parvipes* and *Oedipina complex* according to the defined criteria. The table presents: The name of the species, Model, Mean proportion of the Area under the curve (Mean proportion of the AUC), ROC parcial, 5% omission range, AICc, Delta of the AICc, Weight of the AICc (W AICc) and number of parameters.

Tabla 1. Rendimiento estadístico de los modelos finales de *Oedipina parvipes* y *Oedipina complex* según los criterios definidos. La tabla presenta: El nombre de las especies, Modelo, Proporción media del Área bajo la curva (Proporción media del AUC), ROC parcial, Rango de omisión del 5%, AICc, Delta del AICc, Valor del AICc (W AICc) y número de parámetros.

Especie	Modelo	Proporción media del AUC	ROC parcial	Rango de omisión del 5%	AICc	Delta del AICc	W AICc	Número de parámetros
<i>Oedipina parvipes</i>	M_0.3_F_lp_set_1	1.521	0	0	694.436	0.000	0.092	5
	M_0.4_F_lp_set_1	1.520	0	0	694.775	0.339	0.078	5
	M_0.6_F_lp_set_1	1.530	0	0	695.846	1.410	0.045	5
	M_0.3_F_lq_set_1	1.495	0	0	695.877	1.441	0.045	6
	M_0.6_F_qp_set_1	1.541	0	0	696.335	1.898	0.036	5
<i>Oedipina complex</i>	M_1_F_l_set_1	1.466	0	0	798.444	0.000	0.986	6
	M_2_F_lq_set_1	1.471	0	0	800.124	1.680	0.241	6
	M_2_F_lqt_set_1	1.469	0	0	800.129	1.685	0.188	6

Table 2. Percentage contribution and importance of permutation of the variables, with the most significant values of the final models for *Oedipina parvipes* and *Oedipina complex*. The table presents: The name of the species, the variables, the percentage contribution and the importance of permutation.

Tabla 2. Porcentaje de contribución e importancia de permutación de las variables, con los valores más significativos de los modelos finales para *Oedipina parvipes* y *Oedipina complex*. La tabla presenta: El nombre de las especies, las variables, la contribución porcentual y la importancia de permutación.

Variable	<i>Oedipina parvipes</i>		<i>Oedipina complex</i>	
	Contribución porcentual	Importancia de permutación	Contribución porcentual	Importancia de permutación
Bio 1	37.7	32.5	4.8	12.7
Bio 2	-	-	40.2	15.4
Bio 3	18	8.6	-	-
Bio 12	7.1	8	-	-
Bio 15	-	-	4.6	2
Bio 18	-	-	3.9	2.9
Annual PET	4.1	3.1	0.3	1.8
Climatic Moisture index	25.3	44.7	39.2	53.1
PET seasonality	8.2	3.1	6.9	12

RESULTADOS

El modelo seleccionado para *O. parvipes* arrojó una respuesta de tipo lineal y producto (lp), con un desempeño de Proporción media del AUC de 1.521, un ROC parcial de 0%, y un valor de rango de omisión del 0% (Tabla 1). El análisis Jackknife muestra que las variables más importantes para determinar la idoneidad de hábitat fueron Bio 1 y ClimaticMoistureIndex (Tabla 2). El modelo de nicho ecológico predijo áreas con alta idoneidad al suroriente de Nicaragua en los departamentos de Región autónoma del Atlántico sur y Río San Juan, las periferias de los sistemas montañosos de Costa Rica principalmente en las zonas costeras de las provincias de Limón y Puntarenas; en Panamá, estas zonas corresponden a los alrededores del canal de Panamá, Cerro azul, el volcán El Valle, y la vertiente sur de la cordillera central de las provincias de Chiriquí y Veraguas. Mientras que en Colombia esta especie presenta valores altos y medios en los límites del norte de Antioquia, oriente de Córdoba, sur de Sucre y occidente de Bolívar, en la zona en la que confluyen los ríos Nechí y Cauca; así como una franja de alta idoneidad para el sur de Santander en la vertiente occidental de la Cordillera

Oriental en las estribaciones de la Serranía de los Yariguíes. Y en el Pacífico colombiano presenta zonas con valores altos y medios de idoneidad, hasta la vertiente occidental de la cordillera de los Andes en el noroccidente de Ecuador (Fig. 3).

Por otro lado, el modelo elegido para *O. complex* arrojó una respuesta de tipo lineal (l), con un desempeño de Proporción media del AUC de 1.466, un ROC parcial de 0%, y un valor de rango de omisión del 0% (Tabla 1). El análisis Jackknife muestra que para esta especie, las variables más importantes para determinar la idoneidad de hábitat fueron Bio 2 y ClimaticMoistureIndex (Tabla 2). Los modelos seleccionados produjeron áreas de alta idoneidad para el suroriente de Nicaragua en los departamentos de Región autónoma del Atlántico sur y Río San Juan, una pequeña zona en el noroccidente de la provincia de Limón en Costa Rica, el noroccidente de Panamá en las provincias costeras de Bocas del Toro y Ngöbe Buglé, y en el centro-oriente de Panamá, pasando a través del Pacífico colombiano hasta la vertiente occidental de la cordillera de los Andes en el noroccidente de Ecuador. En el interior de Colombia *O. complex* presenta una idoneidad ambiental similar a la de *O. parvipes*, sin

embargo, *O. complex* presenta mayor continuidad y cobertura espacial con valores altos (Fig. 3).

DISCUSIÓN

Las predicciones de idoneidad del hábitat obtenidas en este trabajo respaldan las estimaciones realizadas por otras investigaciones, en donde se expone que los factores climáticos de temperatura, precipitación y humedad son determinantes para la presencia de las salamandras de la familia Plethodontidae (Kozak & Wiens, 2012; Kozak, 2017; Rovito, 2017; Baken et al., 2021).

Según los modelos realizados, estas dos especies de salamandras están siendo afectadas por la variable climaticMoistureIndex, métrica que constituye un indicador

climático que se calcula a partir de la diferencia entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial, esta última siendo la pérdida potencial de vapor de agua de un paisaje cubierto de vegetación (Title & Bemmels, 2018). Esta variable climática puede afectar la presencia y distribución de ambas especies, al ser organismos que carecen de pulmones y dependen de la respiración cutánea en condiciones de alta humedad (Köhler, 2011; AmphibiaWeb, 2023).

Algunos estudios en las especies de salamandras presentes en México y Mesoamérica han recopilado información que sugiere que las marcadas disminuciones en las poblaciones de estos organismos están vinculadas al cambio de las condiciones de humedad, debido a la alteración climática en las tierras altas, por efecto de la deforestación en las tierras bajas y premontanas (Rovito et al., 2009; García-Padilla et al., 2021).

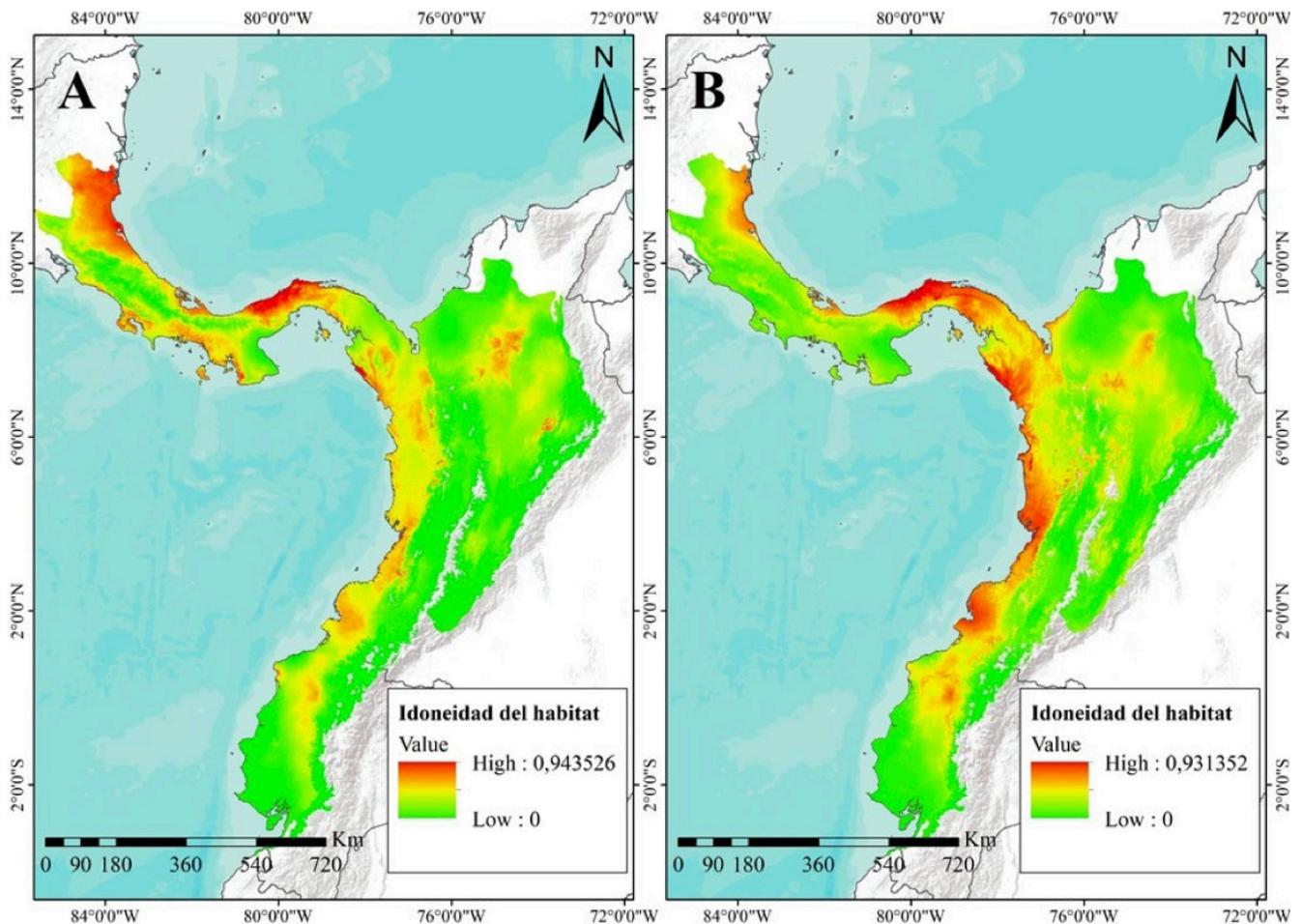


Figure 3. Ecological niche modeling of A) *Oedipina parvipes* B) *Oedipina complex*. Map designed in ArcMap 10.8.

Figura 3. Modelamiento de nicho ecológico de A) *Oedipina parvipes* B) *Oedipina complex*. Mapa diseñado en ArcMap 10.8.

De acuerdo con los resultados obtenidos, ambas especies comparten intervalos de temperatura similares, sin embargo, *O. complex* tolera un intervalo entre 7 a 29 °C, más amplio en comparación con *O. parvipes* que presenta una tolerancia más marcada por temperaturas entre 20 y 29 °C. Esto sugiere que la temperatura puede ser un factor limitante para la presencia y distribución de *O. parvipes*, razón por la cual la variable Bio 1

influye significativamente en el modelo de esta especie. Además, la tolerancia de temperatura de *O. complex* podría explicar por qué esta especie tiene una distribución de zonas idóneas más continuas, mientras que *O. parvipes* presenta zonas de alta idoneidad de manera discontinua. Por otro lado, Bio 2 resultó ser una de las variables que más afectó el modelo de *O. complex*, indicando que, a pesar de su alta tolerancia térmica, cambios

Table 3. Ideal areas of presence for *Oedipina parvipes* and *Oedipina complex* in different conservation zones. The table presents: The countries where the conservation zones are located, the name of the conservation zone and the suitable area in Km² of the two species per conservation zone.

Tabla 3. Áreas idóneas de presencia para *Oedipina parvipes* y *Oedipina complex* en distintas zonas de conservación. La tabla presenta: Los países donde se encuentran las zonas de conservación, el nombre de la zona de conservación y el área idónea en Km² de las dos especies por zona de conservación.

País	Zona de conservación	Área idónea (Km2)
Nicaragua	Reserva de la Biosfera de Rio San Juan	8958
	Refugio Nacional de Vida Silvestre Barra del Colorado	812
Costa Rica	Parque Nacional Corcovado	149
	Reserva Forestal Golfo Dulce	70
	Parque Nacional Isla Bastimentos	10
	Humedal Damani-Guariviara	165
	Parque Nacional Isla de Coiba	52
	Área de Uso Múltiple de Donoso	1275
	Bosque Protector y Paisaje Protegido San Lorenzo	121.5
Panamá	Islas Advent, Zorra y Juan Gallegos	14.3
	Monumento Natural Barro Colorado	49
	Parque Nacional Soberania	145
	Parque Nacional Portobelo	359
	Parque Nacional Chagres	1320
	Área Silvestre de Nargana	955
	Reserva Hidrológica Maje	188
Parque Nacional El Darién	744	

Table 3 (Cont.). Ideal areas of presence for *Oedipina parvipes* and *Oedipina complex* in different conservation zones. The table presents: The countries where the conservation zones are located, the name of the conservation zone and the suitable area in Km² of the two species per conservation zone.

Tabla 3 (Cont.). Áreas idóneas de presencia para *Oedipina parvipes* y *Oedipina complex* en distintas zonas de conservación. La tabla presenta: Los países donde se encuentran las zonas de conservación, el nombre de la zona de conservación y el área idónea en Km² de las dos especies por zona de conservación.

País	Zona de conservación	Área idónea (Km2)
	Parque Nacional Natural Utria	285.5
	Distrito Regional de Manejo Integrado Golfo de Tribuga Cabo Corrientes	65
	Encanto de Los Manglares del Bajo Baudó	593.6
	Distrito Regional de Manejo Integrado En el Territorio Colectivo del Consejo Comunitario de la Comunidad Negra de la Plata	67.8
	Parque Natural Regional La Sierpe	252
	Reserva Forestal Protectora Nacional Río Anchicayá	348.2
	Parque Nacional Natural Gorgona	5.5
	Parque Nacional Natural Sanquianga	250
Colombia	Distritos Nacionales de Manejo Integrado Cabo Manglares Bajo Mira y Frontera	14
	Distritos Regional de Manejo Integrado de la Playona y la Loma de Caleta	13.3
	Distritos Regionales de Manejo Integrado Lago Azul los Manatíes	17
	Distritos Regionales de Manejo Integrado Lago Azul los Manatíes	95
	Distritos Regionales de Manejo Integrado Del Complejo de Humedales de Ayapel	90.5
	Distritos Regionales de Manejo Integrado Serranía de los Yariguies	210
	Distrito Regional de Manejo Integrado Cuchilla del San Juan	4.5
	Parque Nacional Natural Tatama	34.7

abruptos de temperatura durante el día podrían afectar su presencia.

Ambas especies exponen valores de idoneidad semejantes en zonas similares en toda el área de accesibilidad, lo que corrobora la relación simpátrica entre estas dos especies de salamandras (AmphibiaWeb, 2023). Sin embargo, existen diferencias notables, ya que *O. complex* presenta mayores valores de idoneidad para todo el Pacífico colombiano mientras que *O.*

parvipes tiene mayores valores en las zonas de Panamá y en los límites de Costa Rica y Nicaragua. La similitud obtenida entre los modelos de *O. parvipes* y *O. complex* se puede explicar debido a que en los pleodontidos estrechamente emparentados, existe un conocido conservadurismo de nicho en la ocupación de límites altitudinales, por lo cual presentan una gran riqueza y abundancia en elevaciones medias (Kozak & Wiens, 2012; Kozak, 2017; Rovito, 2017).

La cadena montañosa de la Cordillera Central que atraviesa la mayor parte del territorio de Costa Rica y el occidente de Panamá, parece ser una barrera limitante para estas dos especies de salamandra ya que ninguna cuenta con valores de idoneidad altos en esta zona; sin embargo, en sus vertientes y zonas costeras presenta mejores condiciones, en particular para *O. parvipes*; no obstante, en muchas de estas zonas de idoneidad no se han reportado registros por lo cual es importante realizar monitoreos que confirmen la presencia de *O. parvipes* y *O. complex* en las zonas entre los límites de Nicaragua en la Reserva Biológica Indio Maíz y en Costa Rica asociados al Refugio Nacional de Vida Silvestre Barra del Colorado.

Estos modelos contrastan fuertemente con las distribuciones realizadas por la IUCN, ya que estas distribuciones se limitan a zonas de Colombia, Ecuador y Panamá, mientras que en los modelos presentados abarcan zonas de Colombia, Ecuador, Panamá, Costa Rica y Nicaragua, exhibiendo diferentes valores de idoneidad para cada país. Por otro lado en el trabajo de Acosta-Galvis et al. (2020) las distribuciones geográficas mostradas de estas dos especies concuerdan en gran medida con los modelamientos de nicho ecológico realizados, sin embargo es preciso mencionar que la determinación taxonómica de algunos especímenes es poco fiable y puede llegar a afectar los modelamientos realizados.

Los resultados obtenidos en los modelos, para estas dos especies, pueden ser de gran relevancia para orientar las acciones de conservación frente a perturbaciones antropogénicas y de cambio climático, debido a que las salamandras de la familia Plethodontidae cuentan con atributos únicos que las hacen excelentes indicadoras de biodiversidad e integridad de los ecosistemas boscosos, tal y como lo indican Welsh y Droege (2001) en los plethodontidos de Norteamérica y Parra-Olea et al. (2005) en las salamandras de México. Afortunadamente para estas dos especies, numerosas áreas identificadas con valores ≥ 0.6 de idoneidad, se encuentran dentro de distintas zonas de conservación, tal como se muestra en la Tabla 3.

CONCLUSIONES

Las predicciones de idoneidad ambiental presentadas en este trabajo, son las primeras para *O. parvipes* y *O. complex*, en donde se puede apreciar claramente que las zonas óptimas de presencia de ambas especies de salamandras, se concentran principalmente en el canal de Panamá y el Pacífico colombiano. Además de que brindan información valiosa sobre la ecología de estos organismos, y las condiciones ambientales que pueden afectar su presencia. De esta manera se busca brindar un aporte

para la conservación de estas salamandras y aquellas zonas potencialmente habitables por estas. Nuestro estudio muestra la importancia de la preservación de los ecosistemas neotropicales para asegurar la persistencia de especies con alta sensibilidad a la transformación del hábitat, así como a reconocer y priorizar áreas potenciales para el manejo y protección tanto en Centroamérica como en Suramérica. Se recomienda incentivar la investigación en campos de la genética de poblaciones y la ecología de estas salamandras para ayudar a esclarecer un poco más su taxonomía y sistemática.

Agradecimientos.– Expresamos nuestro agradecimiento al Dr. Michael W. Itgen por brindarnos su permiso en el uso de fotografías; al Dr. Rene Bolom-Huet y el Dr. Marlon E. Cobos por su asistencia en la realización de este trabajo; al MSc. Alexander García García y al Dr. Oscar Javier Mahecha-Jiménez que apoyaron con su trabajo, experiencia y conocimientos en nuestra formación como investigadores.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Galvis, A.R. 2023. Lista y mapas de distribución de los anfibios de Colombia (versión 13.2023). Batrachia, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. <http://www.batrachia.com> [Consultado en septiembre 2023]
- Acosta-Galvis, A.R., D. García-Cobos, G. Cárdenas-Arévalo, A. Corrales-García & A. Paternina-Hernández. 2020. Geographic distribution extension of the Worm Salamander, *Oedipina complex* (Dunn, 1924), in the Magdalena Valley, Colombia. Check List 16:521-526.
- AmphibiaWeb. 2023. Information on Amphibian Biology and Conservation. Available from: URL <http://amphibiaweb.org/> [Consultado en septiembre 2023]
- Baken, E.K., L.E. Mellenthin & D.C. Adams. 2021. Is salamander arboreality limited by broad-scale climatic conditions?. Plos ONE 16:e0255393.
- Bolom-Huet, R., X. P. Pacheco, A. Muñoz-Alonso & A. Sunny. 2022. Potential distribution and connectivity for two plethodontid salamanders: conservation areas and landscape corridors for two endemic species of México and Guatemala. Environmental Management 70:965-977.
- Boria, R.A., L.E. Olson, S.M. Goodman & R.P. Anderson. 2014. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. Ecological Modelling 275:73-77.



- Brame Jr, A.H. 1968. Systematics and evolution of the Mesoamerican salamander genus *Oedipina*. *Journal of Herpetology* 2:1-64.
- Brame Jr, A.H. & D.B. Wake. 1963. The salamanders of South America. Los Angeles County Museum Contribution in Science 69:1-72.
- Castro-Herrera, F. & F. Vargas-Salinas. 2008. Anfibios y reptiles en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana* 9: 251-277.
- Castro-Herrera, F., J. Renjifo-Rey, F. Solís, R. Ibáñez & D.B. Wake. 2004. *Oedipina* complex. In: IUCN Red List of threatened species 2004. <http://www.iucnredlist.org/>.
- Cobos, M.E., A.T. Peterson, N. Barve & L. Osorio-Olvera. 2019. kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ* 7: e6281.
- Constable, H., R., Guralnick, J. Wieczorek, C. Spencer, A.T. Peterson & VertNet Steering Committee. 2010. VertNet: a new model for biodiversity data sharing. *PLoS Biology* 8:e1000309.
- Cunningham H.R., L.J. Rissler & J.J. Apodaca. 2009. Competition at the range boundary in the slimy salamander: using reciprocal transplants for studies on the role of biotic interactions in spatial distributions. *Journal of Animal Ecology* 78:52-62.
- Currie, D.J. 1991. Energy and large-scale patterns of animal-and plant-species richness. *The American Naturalist* 137:27-49.
- Dunn, E.R. 1924. New amphibians from Panamá. *Occasional Papers of the Boston Society of Natural History* 5:93-95.
- Elith, J. & J.R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40:677-697.
- Elith, J., M. Kearney & S.J. Phillips. 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution* 1:330-342.
- Elith, J., S.J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y.E. Chee & C.J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57.
- Escalante, T. 2009. Un ensayo sobre la regionalización biogeográfica. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80:551-560.
- Esri. 2020. ArcGIS version 10.8. ArcGIS® and ArcMap™. <https://www.esri.com/>.
- Farallo, V.R. & D.B. Miles. 2016. The importance of microhabitat: A comparison of two microendemic species of *Plethodon* to the widespread *P. cinereus*. *Copeia* 2016:67-77.
- Farallo, V.R., R. Wier & D.B. Miles. 2018. The Bogert effect revisited: salamander regulatory behaviors are differently constrained by time and space. *Ecology and Evolution* 8:11522-11532.
- Fick, S.E. & R.J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37:4302-4315.
- Frost, D.R. 2023. Amphibian species of the world: an online reference. Version 6.2. American Museum of Natural History, New York. <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html> [Consultado en octubre 2023]
- García-Padilla, E., D.L. DeSantis, A. Rocha, V. Mata Silva, J. D. Johnson, L.A. Fucsko, D. Lazcano & L.D. Wilson. 2021. Mesoamerican salamanders (Amphibia: Caudata) as a conservation focal group. *Biología y Sociedad* 4:43-71.
- García-París, M. & D.B. Wake. 2000. Molecular phylogenetic analysis of relationships of the tropical salamander genera *Oedipina* and *Nototriton*, with descriptions of a new genus and three new species. *Copeia* 2000:42-70.
- GBIF.org. 2023. GBIF Home Page. Available from: <https://www.gbif.org>.
- Glor, R.E. & D. Warren. 2011. Testing ecological explanations for biogeographic boundaries. *Evolution* 65:673-683.
- Gómez-Rodríguez, C., A. Baselga & J.J. Wiens. 2015. Is diversification rate related to climatic niche width?. *Global Ecology and Biogeography* 24:383-395.
- Guisan, A., R. Tingley, J.B. Baumgartner, I. Naujokaitis-Lewis, P.R. Sutcliffe, A.I.T. Tulloch, T.J. Regan, L. Brotons, E. McDonald-Madden, C. Mantyka-Pringle, T.G. Martin, J.R. Rhodes, R. Maggini, S.A. Setterfield, J. Elith, M.W. Schwartz, B.A. Wintle, O. Broennimann, M. Austin, S. Ferrier, M.R. Kearney, H.P. Possingham & Y.M. Buckley. 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters* 16:1424-1435.



- Hu, J. & J. Jiang. 2018. Inferring ecological explanations for biogeographic boundaries of parapatric Asian mountain frogs. *BMC Ecology* 18:1-11.
- Keferstein, W.M. 1868. Ueber einige Batrachier aus Costarica. *Archiv für Naturgeschichte*. Berlin 34: 291-300.
- Kozak, K.H. 2017. What drives variation in plethodontid salamander species richness over space and time? *Herpetologica* 73:220-228.
- Kozak, K.H. & J. J. Wiens. 2012. Phylogeny, ecology, and the origins of climate–richness relationships. *Ecology* 93:S167-S181.
- Köhler, G. 2011. *Amphibians of Central America*. Herpeton Verlag Elke Kohler, Offenbach, Hessen, Germany.
- Lowe, W.H, M.A. Mcpeek, G.E. Likens & B.J. Cosentino. 2008. Linking movement behaviour to dispersal and divergence in plethodontid salamanders. *Molecular Ecology* 17:4459-4469.
- Lynch, J.D. & A. Suárez-Mayorga. 2004. Catálogo de anfibios en el Chocó Biogeográfico, 654-668 p. En Rangel-Ch JO (Ed.) Colombia Diversidad Biótica IV, El Chocó Biogeográfico, Costa Pacífica. Volumen I, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Maciel-Mata, C.A., N. Manríquez-Morán, P.O. Aguilar & G. Sánchez-Rojas. 2015. El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria* 25:3-19.
- Mccranie, J.R., D.R. Vieites & D.B. Wake. 2008. Description of a new divergent lineage and three new species of Honduran salamanders of the genus *Oedipina* (Caudata, Plethodontidae). *Zootaxa* 1930:1-17.
- Medina-Rangel, G.F., G. Cárdenas-Arévalo & L.E. Rentería-Moreno. 2017. Herpetofauna del Cerro Tacarcuna. Serranía del Darién, Ungía, Chocó, Colombia. Guía de campo. IIAP-Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico y Expedición Colombia, Bio 2016–2017, COLCIENCIAS, Quibdó, Chocó, Colombia.
- Morrone, J.J., T. Escalante, G. Rodríguez-Tapia, A. Carmona, M. Arana & J.D. Mercado-Gómez. 2022. Biogeographic regionalization of the Neotropical region: New map and shapefile. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 94:e20211167.
- Mota Vargas, C., A. Encarnación Luévano, H.M. Ortega Andrade, D.A. Prieto Torres, A. Peña Peniche & O.R. Rojas Soto. 2020. Una Breve Introducción a los Modelos de Nicho Ecológico. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Estado de Hidalgo, México.
- Mueses-Cisneros, J.J. & V. Moreno-Quintero. 2012. Fauna Amphibia de la Reserva Natural Biotopo Selva Húmeda, Barbaças, Nariño, Colombia. *Herpetotropicos* 7:39-54.
- Osorio-Olvera, L., A. Lira-Noriega, J. Soberón, A.T. Peterson, M. Falconi, R.G. Contreras-Díaz, E. Martínez-Mayer, V. Barve & N. Barve. 2020. ntbox: An r package with graphical user interface for modelling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution* 11:1199-1206.
- Parra-Olea, G., E. Martínez-Meyer & G.P.P. De León. 2005. Forecasting climate change effects on Salamander distribution in the highlands of central Mexico 1. *Biotropica* 37:202-208.
- Peters, W.C.H. 1879. Über neue Amphibien des Kgl. zoologischen Museums (*Euprepes*, *Acontias*, *Typhlops*, *Zamenis*, *Spilotes*, *Oedipus*). *Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie des Wissenschaften zu Berlin* 1879: 774-779.
- Peterson, A.T. 2006. Ecologic niche modeling and spatial patterns of disease transmission. *Emerging Infectious Diseases* 12:1822.
- Peterson, A.T. & J. Soberón. 2012. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservacao* 10:102-107.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson & R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Romero, H. & J.D. Lynch. 2012. Anfibios de la región Caribe. En Rangel-Ch JO (Ed) Colombia Diversidad Biótica XII. La Región Caribe de Colombia. Universidad Nacional de Colombia– Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá D. C., 677-701.
- Rovito, S.M. 2017. The geography of speciation in Neotropical salamanders. *Herpetologica*, 73:229-241.
- Rovito, S.M., G. Parra-Olea, C.R. Vásquez-Almazán, T.J. Papenfuss & D.B. Wake. 2009. Dramatic declines in neotropical salamander populations are an important part of the global amphibian crisis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:3231-3236.
- Rödger, D. & J.O. Engler. 2011. Quantitative metrics of overlaps in Grinnellian niches: advances and possible drawbacks. *Global Ecology and Biogeography* 20:915-927.



- Savage, J.M. 2002. The Amphibians and Reptiles of Costa Rica. A Herpetofauna Between Two Continents, Between Two Seas. Chicago University Press, Chicago, USA.
- Segurado, P., M.B. Araújo & W.E. Kunin. 2006. Consequences of spatial autocorrelation for niche-based models. *Journal of Applied Ecology* 43:433-444.
- Simoes, M., D. Romero-Alvarez, C. Nuñez-Penichet, L. Jiménez & M.E. Cobos. 2020. General theory and good practices in ecological niche modeling: a basic guide. *Biodiversity Informatics* 15:67-68.
- Smith, A.M. & D.M. Green. 2005. Dispersal and the metapopulation paradigm in amphibian ecology and conservation: are all amphibian populations metapopulations? *Ecography* 28:110-128.
- Soberon, J. & A.T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- Solis, F., R. Ibañez, D. Wake, W. Bolivar & J. Renjifo. 2008. *Oedipina parvipes*, The IUCN Red List of The of Threatened Species. Versión 2014.2. <www.iucnredlist.org>.
- Title, P.O. & J. B. Bemmels. 2018. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography* 41:291-307.
- UICN. 2012. Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN: Versión 3.1. Segunda edición. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: UICN. Originalmente publicado como IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Second edition. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).
- Warren, D.L. 2012. In defense of 'niche modeling'. *Trends in Ecology & Evolution* 27:497-500.
- Welsh Jr, H.H. & S. Droege. 2001. A case for using plethodontid salamanders for monitoring biodiversity and ecosystem integrity of North American forests. *Conservation Biology* 15:558-569.
- Williams, E.E. 1983. Ecomorphs, faunas, island size, and diverse end points in island radiations of *Anolis*. Pp. 326-370. In R.B. Huey, E.R. Pianka & T.W. Schoener (Eds.), *Lizard Ecology: Studies of a Model Organism*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

