

Modelamiento predictivo y endemismo de *Bachia Intermedia*, *Phyllodactylus Internadinus* y *Stenocercus Huancabambae* en escenarios de cambio climático en el Perú al año 2050

Thalía Quispe Cajahuanca¹

thalia.quispe.09@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-4058-1766>

Investigadora independiente

País Perú

RESUMEN

La presente investigación examina el estado de vulnerabilidad frente a una extinción potencial por la incidencia del cambio climático de los reptiles endémicos peruanos *Phyllodactylus interandinus*, *Bachia intermedia* y *Stenocercus huancabambae* en las regiones de Bellavista y El Milagro entre las regiones de Cajamarca y Amazonas. El estudio se centra en el análisis del rango geográfico potencial presente, periodo 1950-2000, y de las áreas de distribución potencial, proyectados a partir de los modelos climáticos globales HADGEM2-ES y CCM4, en los escenarios de emisiones de GEI RCP2.6 y RCP8.5, al año 2050 mediante el Modelamiento de Distribución de Especies. El modelamiento proporciona resultados que evidencian el aumento y desplazamiento latitudinal de las áreas de distribución. El rango potencial presente logra incluir completamente los sectores de Bellavista y el Milagro, identificándose adicionalmente siete localidades nuevas al considerar los intervalos de certeza de 0.4–1.0. En los escenarios de forzamiento radiativo, las áreas de distribución potencial de las especies evaluadas generan un incremento promedio de 48.79% para el RCP2.6 y de 51.91%, para el RCP8.5. El presente artículo forma parte de la Tesis “Biogeografía y cambio climático en el Perú: Análisis de escenarios climáticos y endemismo de *Phyllodactylus interandinus*, *Bachia intermedia* y *Stenocercus huancabambae*, entre Amazonas y Cajamarca, distritos de El Milagro y Bellavista”, con calificación Sobresaliente de la autora Thalía Quispe Cajahuanca, la cual, profundiza sobre los efectos del cambio climático y el estado de conservación del hábitat. Su propósito principal promover la conservación contribuyendo a la investigación de la fauna endémica del Perú, en aras de lograr reducir su vulnerabilidad actual y futura generando proyecciones sustanciales y nuevos conocimientos sobre especies mínimamente estudiadas.

Palabras clave: biogeografía; cambio climático; réptiles; endemismo; MDE

¹ Autor principal.

Correspondencia: thalia.quispe.09@gmail.com

Predictive modeling and endemism of *Bachia Intermedia*, *Phyllodactylus Internadinus* and *Stenocercus Huancabambae* in climate change scenarios in Peru by the year 2050

ABSTRACT

The present investigation examines the state of vulnerability to a potential extinction due to the incidence of climate change of the endemic Peruvian reptiles *Phyllodactylus interandinus*, *Bachia intermedia* and *Stenocercus huancabambae* in Bellavista and El Milagro between the regions of Cajamarca and Amazonas. The study focuses on the analysis of the current potential geographic range, period 1950-2000, and the potential distribution areas, projected from the global climate models HADGEM2-ES and CCM4, in the GHG emissions scenarios RCP2.6 and RCP8.5, to the year 2050 through Species Distribution Modeling. The modeling provides results that show the increase and latitudinal displacement of the distribution areas. The present potential range manages to fully include the sectors of Bellavista and El Milagro, additionally identifying seven new localities when considering the certainty intervals of 0.4–1.0. In the radiative forcing scenarios, the potential distribution areas of the evaluated species generate an average increase of 48.79% for RCP2.6 and 51.91% for RCP8.5. This article is part of the Thesis "Biogeography and climate change in Peru: Analysis of climatic scenarios and endemism of *Phyllodactylus interandinus*, *Bachia intermedia* and *Stenocercus huancabambae*, between Amazonas and Cajamarca, districts of El Milagro and Bellavista", with an Outstanding rating of the author Thalía Quispe Cajahuanca, which delves into the effects of climate change and the state of conservation of the habitat. Its main purpose is to promote conservation by contributing to the investigation of the endemic fauna of Peru, in order to reduce its current and future vulnerability, generating substantial projections and new knowledge about minimally studied species.

Keywords: *biogeography; climate change; reptiles; endemism; SDM*

Artículo recibido 05 mayo 2023

Aceptado para publicación: 29 mayo 2023

INTRODUCCIÓN

El clima es un elemento dinámico, la variabilidad climática debido a las fluctuaciones naturales crea condiciones ambientales cambiantes a lo largo del tiempo. Sin embargo, la evidencia muestra que la influencia antropogénica es una clara constante que ha acelerado el cambio climático y contribuido a su evolución, especialmente en las últimas dos décadas (Hegerl et al., 2007). El incremento del cambio climático, asociado al aumento de temperatura o cambios en el sistema climático, continúa amenazando el estado de los ecosistemas y las especies que habitan en ellos (Vargas, 2009). Al mismo tiempo, crea presiones adicionales que dificultan su resiliencia y capacidad de adaptación (WWF, 2012). El impacto biológico del cambio climático es particularmente pronunciado en los países en desarrollo, especialmente en Perú, donde este desafío se ve exacerbado por la dependencia de la biodiversidad y la proporción de territorios altamente sensibles a las condiciones climáticas (Vargas, 2009). Del mismo modo, las especies endémicas como *P. interandinus*, *B. intermedia* y *S. huancabambae*, debido a su nicho específico, hábitat restringido y límite de tolerancia climático limitado; son más vulnerables a las nuevas amenazas del futuro cambio climático; sus patrones conocidos pueden ser radicalmente alterados (Foden et al., 2008), lo cual, puede suscitar la alternación a nivel composicional, estructural y funcional a nivel intraespecífico; hasta la posible extinción de especies y pérdida de diversidad y riqueza a diferentes escalas temporales y espaciales (Larsen et al., 2011). Es importante aumentar el conocimiento de distribución y endemismo en el Perú, donde la información faunística sigue siendo imprecisa (Pacheco, 2002). El problema se ve agravado debido a que la producción científica sobre poblaciones faunísticas se restringe principalmente a los bosques montañosos húmedos, aunque los bosques secos proporcionan sitios interesantes para registros nuevos de taxones endémicos (Gobierno Regional de Amazonas, 2006) como los bosques secos del Marañón y del Chamaya en Cajamarca y Amazonas (FAO, 2014).

Entre las principales premisas que rigen este estudio resalta la importancia del espacio geográfico en temas de conservación, el origen y evolución de las especies se circunscribe a su territorio, de esta manera, el estudio de la ampliación o contracción del hábitat es un indicador clave en la medición de la respuesta de cada especie ante estímulos climáticos diversos (Whittaker et al., 2005). Determinar el espacio futuro que

puede ocupar una especie y cómo se comportará ante un cambio ambiental acelerado, es un desafío que puede explorarse válidamente a través de la biogeografía (Reid y Alam, 2008). El enfoque metodológico proyectivo desde el Modelamiento de Distribución de Especies (Graham et al., 2011) brinda la oportunidad de predecir impactos negativos y contribuye significativamente al desarrollo de futuras estrategias de conservación contra la amenaza del cambio climático (Guisan et al, 2013). Asimismo, destaca la importancia de los modelos climáticos globales (MCG), representaciones de patrones y tendencias climáticas en periodos temporales delimitados basados en modelos de circulación general atmosférica (Moss, 2010). En función a ello, las proyecciones climáticas y MCG del Quinto Informe de Evaluación del IPCC - AR5 (2013) se realizaron considerando cuatro escenarios de emisiones de CO₂ o Representative Concentration Pathways (RCP), para el periodo 2006 - 2100 (Chou et al., 2014) en contraste con el año 1750: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Globalmente, el impacto del calentamiento por encima de 1.5°C aumentará el riesgo de extinción de especies en un 30%. Temperaturas entre 1.5°C y 2.5°C significarían cambios en la estructura y funciones de los ecosistemas y migración de especies, y por encima de 2°C contribuirían a la sabanización de la Amazonía en un 40% (Vargas, 2009). Sabiendo que 7 de las 25 regiones que tienen una alta proporción de especies endémicas se encuentran en América Latina representa un grave riesgo para esta región (Magrin et al., 2007)

Uno de los antecedentes al presente estudio de mayor reputación es el de Young et al. (2007) con respaldo de NatureServe, una investigación en los Andes orientales de Perú y Bolivia que abarcó 18 taxones, entre los cuales, se evaluaron especies endémicas, aunque en menor proporción y no las citadas en el presente artículo. Si bien se identificaron los rangos actuales, no se ejecutaron, proyecciones de áreas de distribución potencial ni tampoco se efectuó el análisis en escenarios de cambio climático.

En este contexto, nuestra hipótesis de trabajo señala que, en el escenario negativo resultante, habrá evidencia de migración altitudinal de las tres especies a nuevos espacios, inestabilidad del hábitat y declive poblacional, y por ende alteración del mosaico original de especies. Sin embargo, podría resultar un escenario, en el cual, el cambio climático no provocará suficientes cambios ambientales para afectar los umbrales de tolerancia de las especies estudiadas y estas tendrán la misma persistencia y estabilidad en el

ecosistema asociado a ellas.

Siendo el objetivo general analizar los efectos del cambio climático en la distribución espacial de los reptiles endémicos *Phyllodactylus interandinus*, *Bachia intermedia* y *Stenocercus huancabambae* en función a escenarios climáticos y proyecciones, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer el rango geográfico actual de las especies seleccionadas mapeando su distribución para comparar y analizar nichos potenciales actuales y futuros.
2. Identificar la distribución potencial de las especies de estudio en función al impacto del cambio climático evaluando su vulnerabilidad, el riesgo de extinción, los patrones espaciales y la dinámica de su distribución proyectada.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolla entorno a la disciplina geográfica, en la rama de la Biogeografía (Blondel, 1985), subdivisión Zoogeografía, enfocada en los métodos de descripción e interpretación de las distribuciones animales (Muller, 1979). El abordaje se realizó desde la biogeografía de la conservación, subdisciplina interdisciplinaria (Ladle y Whittaker, 2011) de naturaleza estratégica en la planificación, para la identificación, priorización y jerarquización de áreas con fines de protección (Whittaker et al, 2005), que se nutre de la ampliación de bases de datos biogeográficos e instrumentos de análisis espacial avanzados.

El diseño de la investigación, basado en Mauch y Birch (1998), es de corte predictivo-correlacional explicado por la relación coeficiente-fenómeno. La estrategia utilizada en el modelamiento es cuantitativa, recopilándose y procesándose datos para crear modelos de en sistemas de información geográfica.

La selección de las tres especies de estudio se realizó de acuerdo con los siguientes criterios:

- a. El área de distribución se concentra en la región andino-amazónica, en los bosques interandinos.
- b. Preferiblemente especies de fauna endémica del territorio peruano.
- c. Especies de fauna nativa con registros de presencia en diferentes localidades.
- d. Especies de sensibilidad fisiológica alta a la temperatura y otros cambios ambientales.

TABLA N° 1. Especies endémicas de estudio

Nombre científico	Endémico del Perú	Clasificación taxonómica			IUCN
		Clase	Orden	Familia	lista roja
<i>Phyllodactylus interandinus</i>	Si	Reptilia	Squamata	Gekkonidae	Least concern (LC)
<i>Bachia intermedia</i>	Si	Reptilia	Squamata	Teiidae	-
<i>Stenocercus huancabambae</i>	Si	Reptilia	Saurio	Iguanidae	-

Fuente: Elaboración propia.

Entre las bases de datos espaciales de variables abióticas utilizadas se encuentran WorldClim, IPCC y CCAFS. La línea de base se estableció a partir del promedio del período 1950 – 2000, lo que permitió una estimación del rango potencial presente de las tres especies de trabajo. Las proyecciones climáticas estimadas en el informe AR5 del IPCC (2013) desarrollan cuatro escenarios a futuro con referencia al cambio climático, se eligieron los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 al 2050 como escenarios extremos con menores y mayores concentraciones de GEIs. Se seleccionaron dos MCG del CMIP5 del AR5, HadGEM2-ES y CCSM4, ambos modelos acoplados del sistema tierra o ESM (*Earth System Model*), el primero del Centro Hadley o *Met Office Hadley Centre* en Reino Unido (Chou et al., 2014); y, el segundo de la UCAR o *University Corporation for Atmospheric Research*, en Estados Unidos, respectivamente.

TABLA N° 2. Variables climáticas de trabajo

BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Media mensual de temperatura máxima y mínima
BIO3	Isotermas (BIO2/BIO7) (* 100)
BIO4	Temperatura Estacional (desviación estándar *100)
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura promedio del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura promedio del trimestre más seco
BIO10	Temperatura promedio del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura promedio del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	La precipitación del mes más húmedo
BIO14	La precipitación del mes más seco
BIO15	Precipitaciones estacionales (coeficiente de variación)
BIO16	La precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	La precipitación del trimestre más seco
BIO18	La precipitación del trimestre más cálida
BIO19	La precipitación del trimestre más frío

Fuente: Hijmans et al., 2005

Teniendo en cuenta el carácter predictivo de la investigación, se ha optado por el uso de modelos siendo el principal método de trabajo el MDE. El software seleccionado se basa en un algoritmo de máxima entropía (Phillips et al., 2006), principio estadístico basado en el grado de certeza de una variable independiente en determinada área de presencia (Elith et al., 2006). La región de interés se modela utilizando el formato raster que consta de celdas con una resolución común caracterizadas por contener las variables ambientales

(Hirzel et al., 2002) en valores de 0 a 1, donde las condiciones óptimas para la distribución de una especie se representan con valores elevados (Hipolito et al., 2015). Para procesar eficientemente los datos, se decidió seguir ciertas directrices:

- a. Las coordenadas de cada punto de presencia se expresaron en grados decimales.
- b. Los registros sin coordenadas exactas se georreferenciaron a partir de la descripción del área, sólo si en el expediente se especificaba el territorio administrativo, localidad y referencia geográfica de ubicación.
- c. Las capas climáticas proyectadas futuras de WorldClim se prepararon utilizando el software ArcGIS 10.1, debido a que presentan originalmente Datum desconocido y ligeras diferencias en las unidades angulares, estandarizándolo al sistema de coordenadas geográficas WGS84 mediante la herramienta *project raster*.
- d. El procedimiento de extracción de datos climáticos inicia a escala nacional, para ello, generamos el AOI a un nuevo archivo shapefile con el sistema de coordenadas geográficas WGS84 y asignamos la extensión correspondiente al Perú usando el editor.

El proceso de trabajo desde la capa climática base se efectúa siguiendo procedimiento expuesto:

Importamos la primera capa raster georreferenciada, Bio1, y las AOIs en la herramienta *extract by mask*

En la sección *environments* subsección *processing extent* seleccionamos la opción de *same as layer AOI*, en la subsección *snap raster* seleccionamos Bio1, en la subsección *raster analysis* precisamos en *cell size* la opción *same as layer Bio1* obteniendo al finalizar el proceso la capa base guía.

Posteriormente, ampliamos el procesamiento mediante la modalidad *batch* de cada herramienta señalada, añadiendo todas las capas restantes del entorno a procesar, manteniendo el uso de la capa guía.

Usando el procedimiento propuesto, el tamaño de píxel y la extensión de la nueva capa son consistentes y uniformes. Es importante la subsección de *snap raster* porque garantiza que los píxeles extraídos permanezcan en su posición original, de lo contrario, es posible que las capas procesadas aparezcan ligeramente desplazadas hacia la derecha incurriendo en cambios en la información que puede incluirse de forma irregular en el proceso de modelado si no se sigue esta precaución.

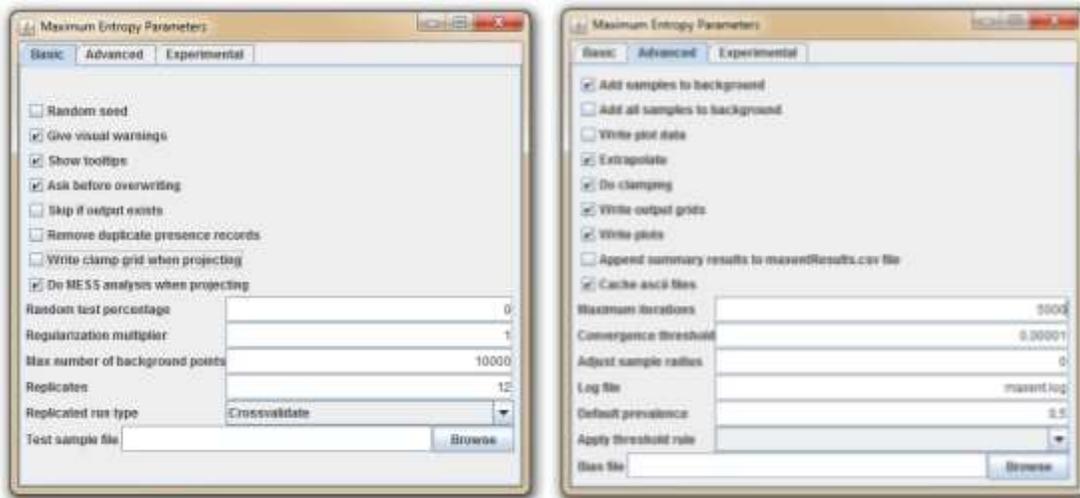
ArcGIS 10.1 predefine el formato de salida como ESRI GRID para realizar el proceso de conversión

seleccionamos la herramienta Grid to ASCII de en modalidad *batch*, especificando la extensión ASCII (.asc*) manualmente, ya que usualmente se visualiza en la herramienta como .texto (.txt*).

Para el procesamiento con Maxent se generaron las muestras de presencia en un archivo CSV (*.csv) con tres campos (Especie, Longitud, Latitud) es preciso respetar el orden señalado para el reconocimiento de la información. Las capas climáticas también se consolidan en un archivo bajo el formato ASCII (*.asc). El modelo de predicción final por especie se creó promediando los resultados independientes de cada MCG.

Se realizaron correcciones de modelo estimando la ubicación de las barreras naturales para definir mejor las verdaderas zonas de colonización (Scheldeman y Van Zonneveld, 2010; Young, 2007). El modelado inicial se realizó utilizando todas las variables ambientales junto con los registros de presencia por especie, el producto final se analizó mediante la herramienta *Jackknife* del software Maxent, de este modo, algunas variables fueron excluidas del análisis final. De este modo, se crearon modelos específicos para cada especie según la importancia y aporte de cada variable de modo individual y colectivo al modelo.

FIGURA N° 1. Selección de parámetros - Software MAXENT 3.3.3k



Fuente: Phillips et al. 2006

Cada vez más los MDE incluyen variables categóricas que ajustan los modelos con base en la tipología del hábitat físico; para evitar la sobreestimación al emplear una capa generalizada como las ecorregiones del mundo; en la presente investigación se eligió disponer de la capa de zonas de vida a nivel nacional.

La validación del modelo se realizó siguiendo el método *leave-one-out* por *crossvalidation* de Pearson et al. (2007), recomendado especialmente para evaluar muestras con menos de 25 puntos. El método *leave-one-out* divide los datos en k partes del mismo tamaño definidas por el número de localidades que son utilizadas como subgrupos de test para cada muestra o *training sample* de k- 1 siendo el valor p el reflejo de la consistencia del modelo (Fielding y Bell, 1997; Pearson, 2008).

La sensibilidad y la especificidad (curva ROC) explican qué tan bien los datos utilizados en el modelamiento predicen la presencia de las especies de trabajo (Baldwin, 2009). Ambas medidas son cuantificadas por el área bajo la curva (AUC) en una escala de 0.5 a 1.0 (Engler et al., 2004).

RESULTADOS

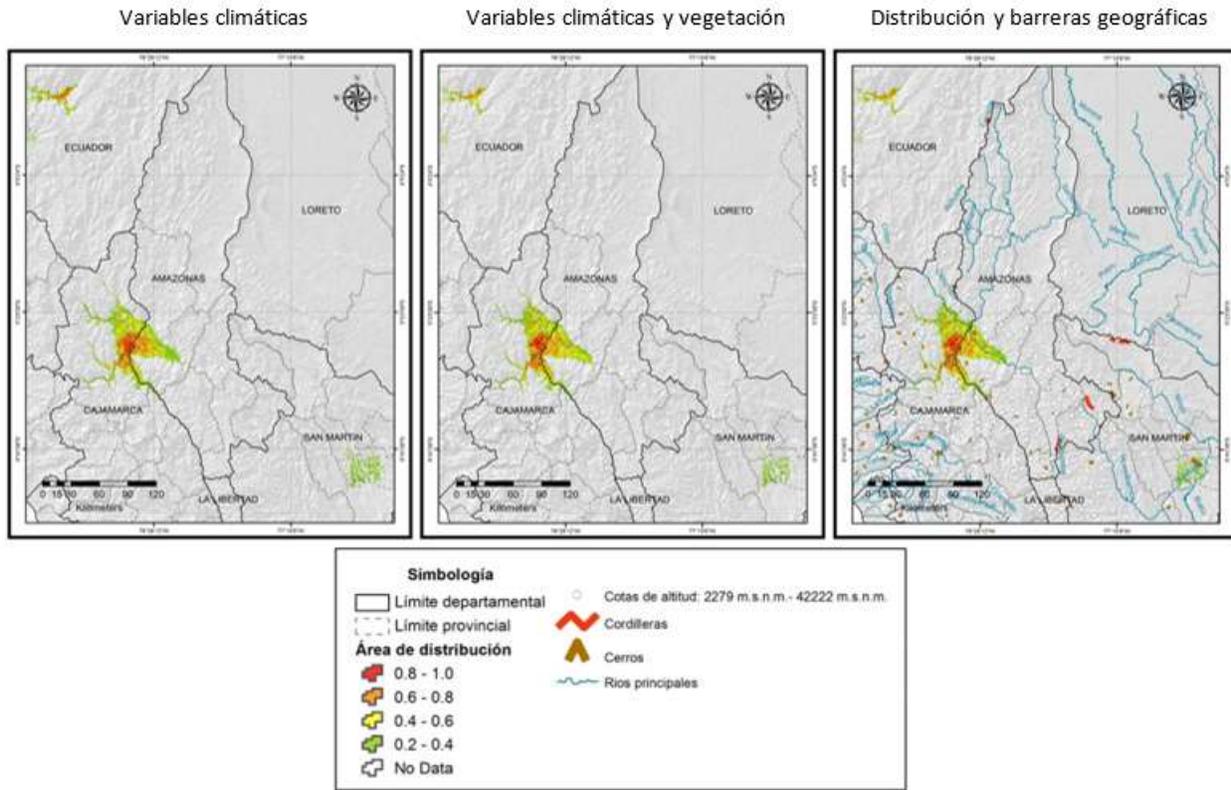
TABLA N° 3. Áreas de distribución potencial presente según intervalos de certeza

Código	Intervalos	<i>B. intermedia</i>	<i>P. interandinus</i>	<i>S. huancabambae</i>
CMA	0.8 – 1.0	110.72 km ²	54.52 km ²	310.02 km ²
CA	0.6 – 0.8	723.6 km ²	914.87 km ²	1471.62 km ²
CM	0.4 – 0.6	1279.13 km ²	1647.89 km ²	2833.28 km ²
CB	0.2 – 0.4	1765.42 km ²	1652.78 km ²	5544.67 km ²
TOTAL	0.2 – 1.0	3878.87 km ²	4270.06 km ²	10159.59 km ²

Fuente: Elaboración propia

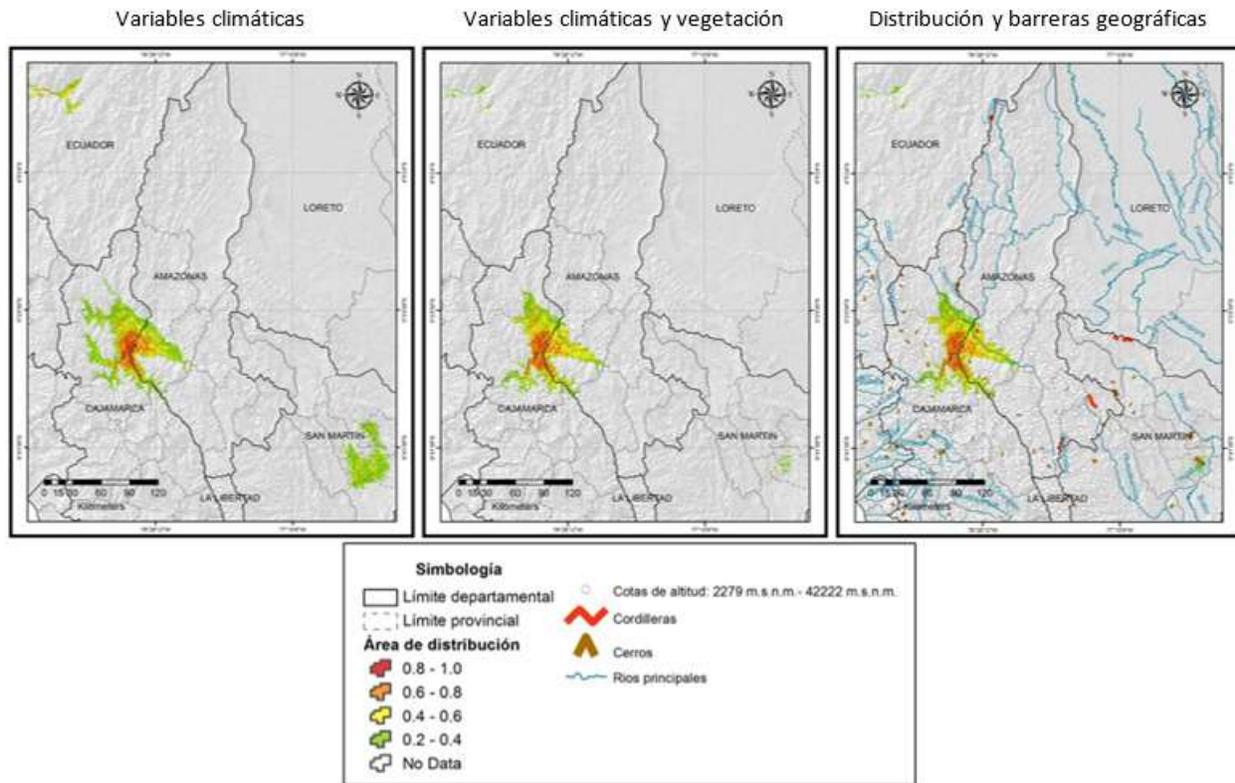
Según los intervalos CMA y CA, el rango potencial presente de la especie *B. intermedia* abarca Jaén y Utcubamba a nivel provincial, específicamente al norte los distritos de El Milagro, Jaén, Bagua Grande, el sur del distrito de Bellavista, y la zona este del distrito de Cumba. Se extiende en menor medida en las provincias de Cutervo y Bagua, al norte de los distritos de Choros y Toribio de Mendoza, y, al sur de los distritos de Copallin y Bagua.

FIGURA N° 2. Área de distribución potencial presente de la especie *B. intermedia*



En el caso de la especie *P. interandinus*, los intervalos CMA y CA, indican como área de distribución potencial presente a las localidades de Bellavista y el Milagro, en la provincia de Jaén y de Utcubamba. El rango estimado comprende en menor proporción a los distritos de Choros, Jaén y Cumba en las provincias de Cutervo, Jaén y Utcubamba.

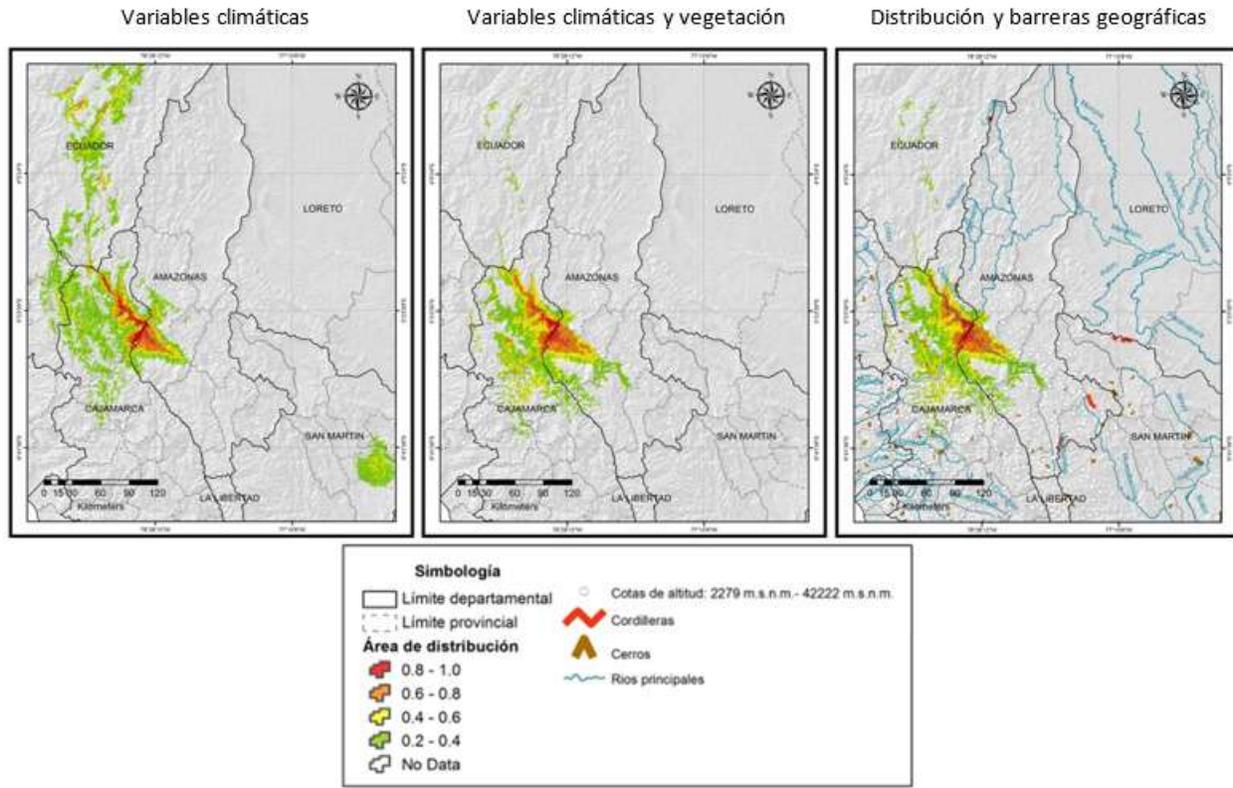
FIGURA N° 3. Área de distribución potencial presente de la especie *P. interandinus*



La especie *S. huancabambae* se distribuye principalmente, según el modelamiento presente, en las provincias de Utcubamba y Bagua, localidades El Milagro, Bagua, La Peca, y El Parco de acuerdo con los intervalos CMA y CA. Igualmente, en la localidad de Bellavista, provincia de Jaén, en proporción significativa. Su extensión contempla el sur de la localidad Santa Rosa y el este de Jaén, en la provincia de Jaén; el sur de la localidad Chirinos, provincia de San Ignacio, el sureste de Cajaruro y el norte de Bagua Grande en la provincia de Utcubamba.

La distribución potencial actual de las tres especies de estudio cubre áreas no registradas, previamente. Con base en el modelo, la evidencia indicó que las especies estaban presentes en 14 localidades. Considerando los intervalos de trabajo CMA, CA y CM, y se identificaron aproximadamente 7 localidades nuevas.

FIGURA N°.4. Área de distribución potencial presente de la especie *S. huancabambae*



La dimensión de las áreas de distribución de las especies evaluadas es en promedio de 6102,84 km², evidenciando un rango concordante con su endemismo. El rango aproximado actual sigue ciertos límites geográficos, como los ríos Chinchipe y Utcubamba en el norte, colinas y tierras altas que marcan límites altitudinales, el modelo muestra como límite de dispersión entre los 2000 m.s.n.m – 4000 m.s.n.m

Las distribuciones potenciales presentes de las tres especies abarcan en promedio el 94.4% del área de estudio, siendo el 26.5% correspondiente a la especie *B. intermedia*, el 26.4% a la especie *P. interandinus* y un 11,5% a la especie *S. huancabambae*.

Las especies no se encuentran bajo ningún esquema de conservación. Al evaluar la superposición de distribuciones potenciales presentes con áreas protegidas, se encontró que las ANP nacionales y ACP se ubican fuera de la distribución estimada de *P. interandinus* y *B. intermedia*. Sólo la distribución potencial presente de la especie *S. Huancabambae* colinda con el perímetro de la Reserva Nacional Tabaconas Namballe; sin embargo, el área de superposición forma parte del intervalo de baja certeza con apenas 0,7%

de su rango considerado, no siendo representativo. La situación es crítica debido a que el 54,4% del rango estimado de la especie *B. intermedia*, el 59.7% de la especie *P. interandinus* y el 32,4% de la especie *S. Huancabambae* se ubican en el sitio prioritario Bosques Secos del Maraón.

En función a la superposición con la información del SICRE (APECO, 2009) el área propuesta 1 constituye una alternativa significativa de protección de la fauna evaluada comprendiendo el 28.2%, 26.3% y 16.1% de la distribución potencial presente de las especies *B. intermedia*, *P. interandinus* y *S. huancabambae*, respectivamente, en intervalos de alta certeza.

TABLA N° 4. Áreas de distribución potencial futura de acuerdo con variables climáticas y variable categórica de vegetación (RCP 2.6).

Código	Intervalos	<i>B. intermedia</i>	<i>P. interandinus</i>	<i>S. huancabambae</i>
CMA	0.8 – 1.0	519.1 km ²	591.5 km ²	685.6 km ²
CA	0.6 – 0.8	1450.9 km ²	1947.2 km ²	2183.8 km ²
CM	0.4 – 0.6	1269.7 km ²	1322.8 km ²	3847.3 km ²
CB	0.2 – 0.4	2039.6 km ²	2958.9 km ²	5234.8 km ²
TOTAL	0.2 – 1.0	5279.3 km ²	6820.3 km ²	11951.5 km ²

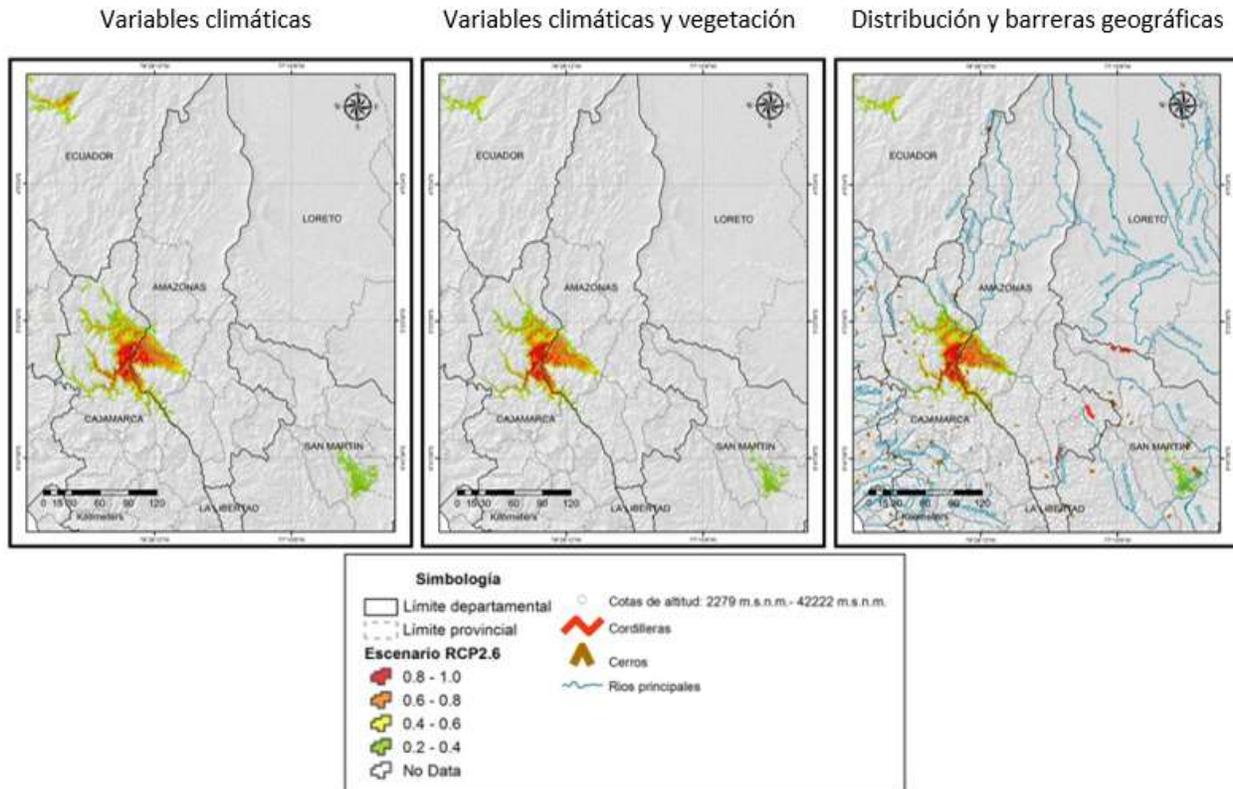
Fuente: Elaboración propia

El escenario RCP 2.6 o escenario con las menores emisiones de carbono o mitigación efectiva del cambio climático, evidencia un aumento del 36.1% en el área total de distribución potencial futura de la especie *B. intermedia* en comparación con la línea de base, destacando la tendencia del aumento de las áreas idóneas. Las probabilidades de distribución aumentan en la zona sur y se incorporan nuevos sectores al norte, Los intervalos de alta certeza CMA y CA muestran que la distribución potencial futura de la especie *B. intermedia* engloba el área de estudio, así como las localidades de Bagua y El Parco. El área estimada en la línea de base se mantiene y se añaden al sur la localidad de Cajaruro,

La especie *P. interandinus*, también amplía su área estimada en 59.7%, respecto a la línea de base. La distribución potencial en este escenario, de acuerdo con los intervalos CMA y CA, se mantienen a cabalidad

en las localidades de El Milagro, Bellavista, Choros, El Parco y Bagua en la provincia de Utcubamba, Jaén, Cutervo y Bagua, respectivamente. Se extiende en menor proporción al este de Cumba, al norte de Toribio Casanova y Santo Tomás, y al este de Jaén, en las provincias de Utcubamba, Cutervo y Jaén.

FIGURA N° 5. Área de distribución potencial futura de la especie *B. intermedia*, RCP2.6



En el caso de la especie *S. huancabambae*, continúa la tendencia positiva del incremento del área estimada hacia el norte. En función a los intervalos CMA y CA, su distribución potencial contempla en este escenario cabalmente la localidad de El Milagro y supera el 50% de las localidades de Bagua y El Parco en la provincia de Bagua. Incluso se incluyen significativamente a las localidades de Bagua, Copallin y La Peca en la provincia de Bagua, la localidad de Bagua Grande y el sur de Cajaruro en la provincia de Utcubamba, así como, a Chirinos en la provincia de San Ignacio.

Se distingue a *S. huancabambae*, como la especie con mayor distribución potencial futura, 11951.5 km²; la especie *B. intermedia* ocuparía 5279.3 km²; y, la especie *P. interandinus* se mantendría en 6820.3 km²; siendo en promedio 8017.0 km². En el escenario RCP2.6, el 20.8% de la distribución potencial futura de la

especie *B. intermedia*, el 16.7% de la especie *P. interandinus* y el 9.8% de la especie *S. huancabambae*, abarca en promedio el 96.8% del área de estudio.

FIGURA N° 6. Área de distribución potencial futura de la especie *P. Interandinus*, RCP2.6

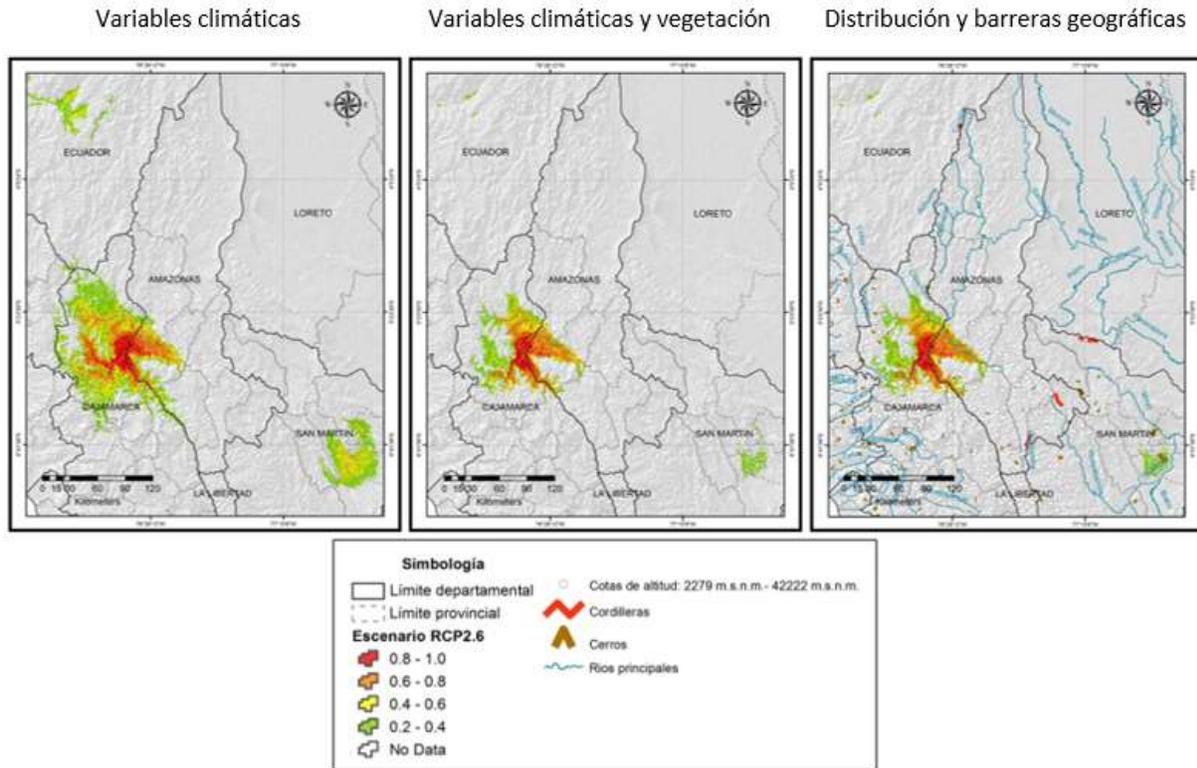
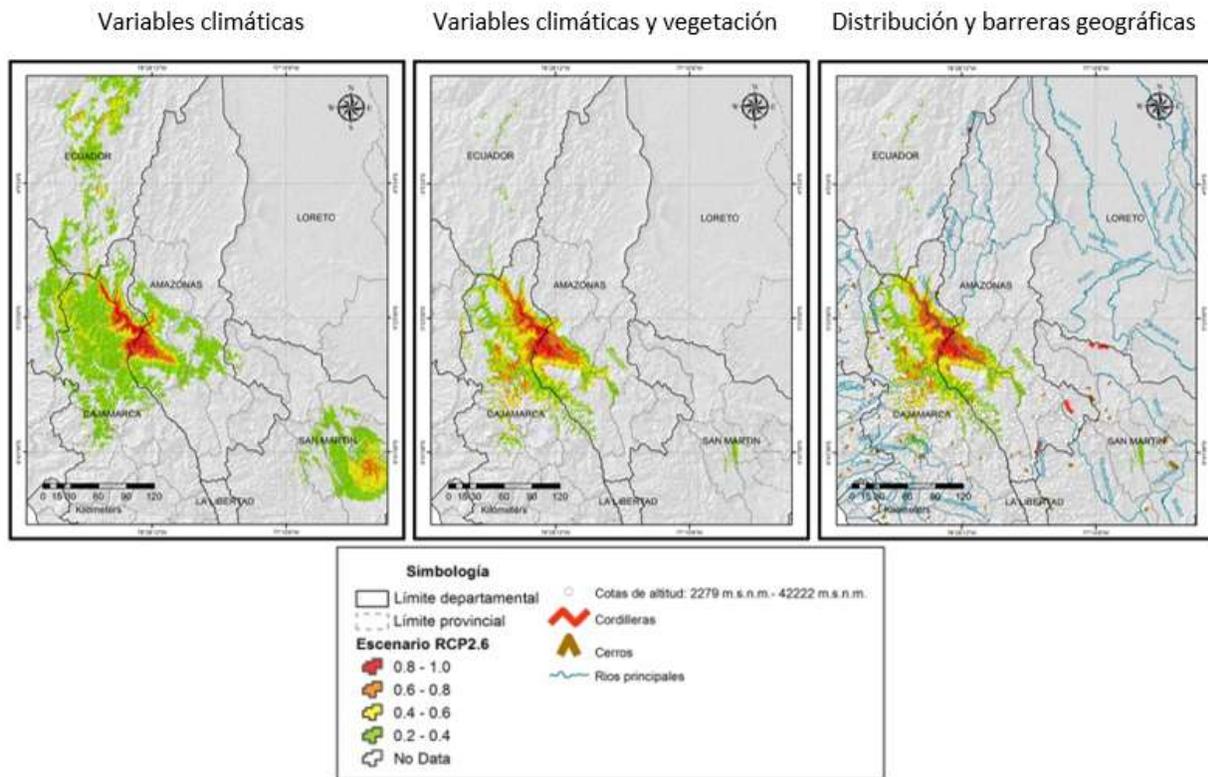


FIGURA N° 7. Área de distribución potencial futura de la especie *S. huancabambae*, RCP2.6



A pesar del incremento en las áreas de distribución potenciales futuras no se evidencia ninguna inclusión en territorio protegido con fines de conservación de forma representativa. Si bien se modifica el área que se superpone al sitio de priorización Bosques Secos del Marañón a 48.5 % de la distribución de la especie *B. intermedia*, 44.8 % de la especie *P. interandinus* y 30.1 % de la especie *S. huancabambae*, aquello responde al incremento de la distribución potencial total por especie, siendo mayor el área de los intervalos de muy alta y alta certeza. El área propuesta 1, continúa siendo de vital importancia como propuesta favorable de área protegida que contenga a las tres especies, también se identifica el aumento interesante de muy altos y altos niveles de certeza en el área propuesta 5 para la especie *S. huancabambae*

TABLA N° 5. Áreas de distribución potencial de acuerdo a variables climáticas y variable categórica de vegetación (RCP 8.5)

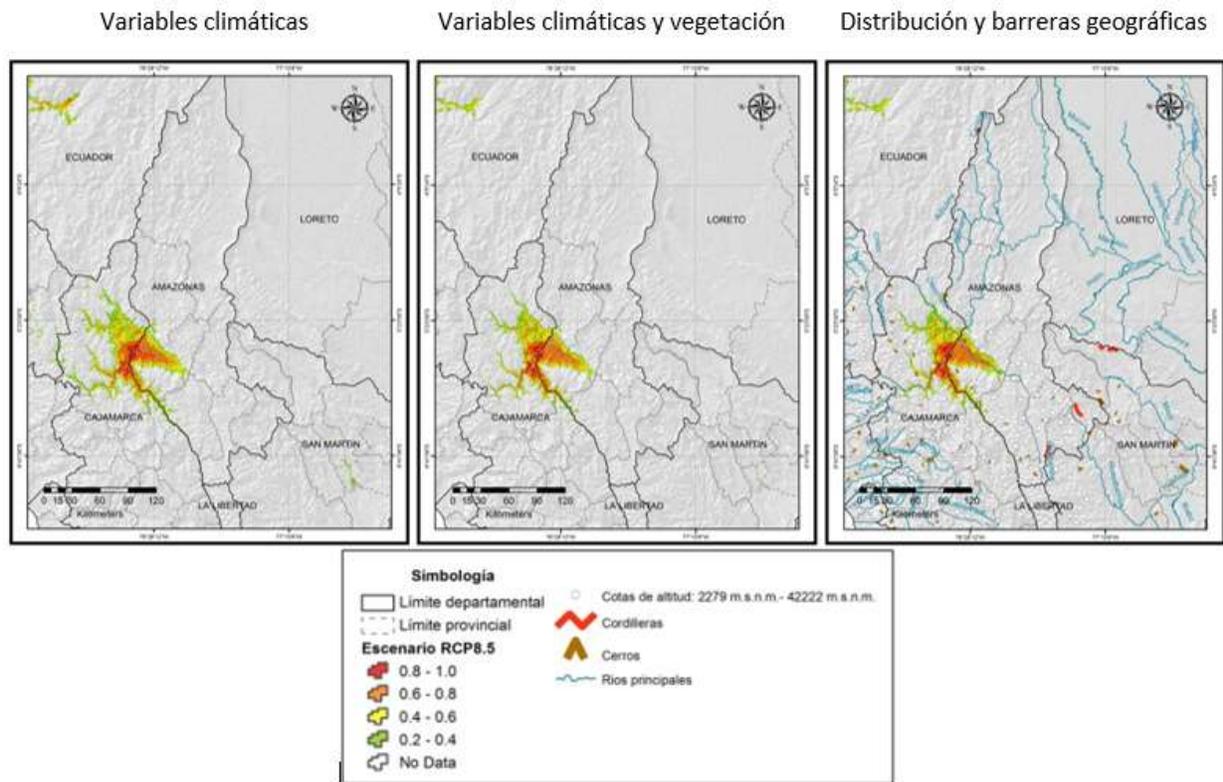
Código	Intervalos	<i>B. intermedia</i>	<i>P. interandinus</i>	<i>S. huancabambae</i>
CMA	0.8 – 1.0	242.7 km ²	289.4 km ²	1062.9 km ²
CA	0.6 – 0.8	1420.7 km ²	1898.5 km ²	2799.1 km ²
CM	0.4 – 0.6	1378.8 km ²	1425.0 km ²	4156.6 km ²
CB	0.2 – 0.4	1582.6 km ²	1923.7 km ²	5271.4 km ²
TOTAL	0.2 – 1.0	4624.8 km ²	5536.6 km ²	13290.0 km ²

Fuente: Elaboración propia

En el escenario RCP 8.5 o escenario de máxima emisión de carbono, se determinó un incremento de la distribución potencial futura de 19.2% respecto a la línea de base para la especie *B. intermedia*. El intervalo CMA y CA evidencian que se mantienen dentro de la distribución estimada, las localidades de Bellavista y El Milagro. El intervalo CMA aumenta y el área de distribución se extiende a las localidades de Bagua y El Parco en la provincia de Bagua, siendo significativa también en las localidades de Jaén, Choros, Toribio Casanova y Cumba, en las provincias de Jaén, Cutervo y Utcubamba.

Es interesante mencionar como localidades del intervalo CM de la línea de base se convierten al intervalo CA según las proyecciones al 2050; por ejemplo, Choros y Toribio Casanova en la provincia de Cutervo, y otros. Asimismo, el intervalo de alta certeza abarca nuevas áreas como Santo Tomás y Cujillo en la provincia de Cutervo.

FIGURA N° 8. Área de distribución potencial futura de la especie *B. intermedia*, RCP8.5

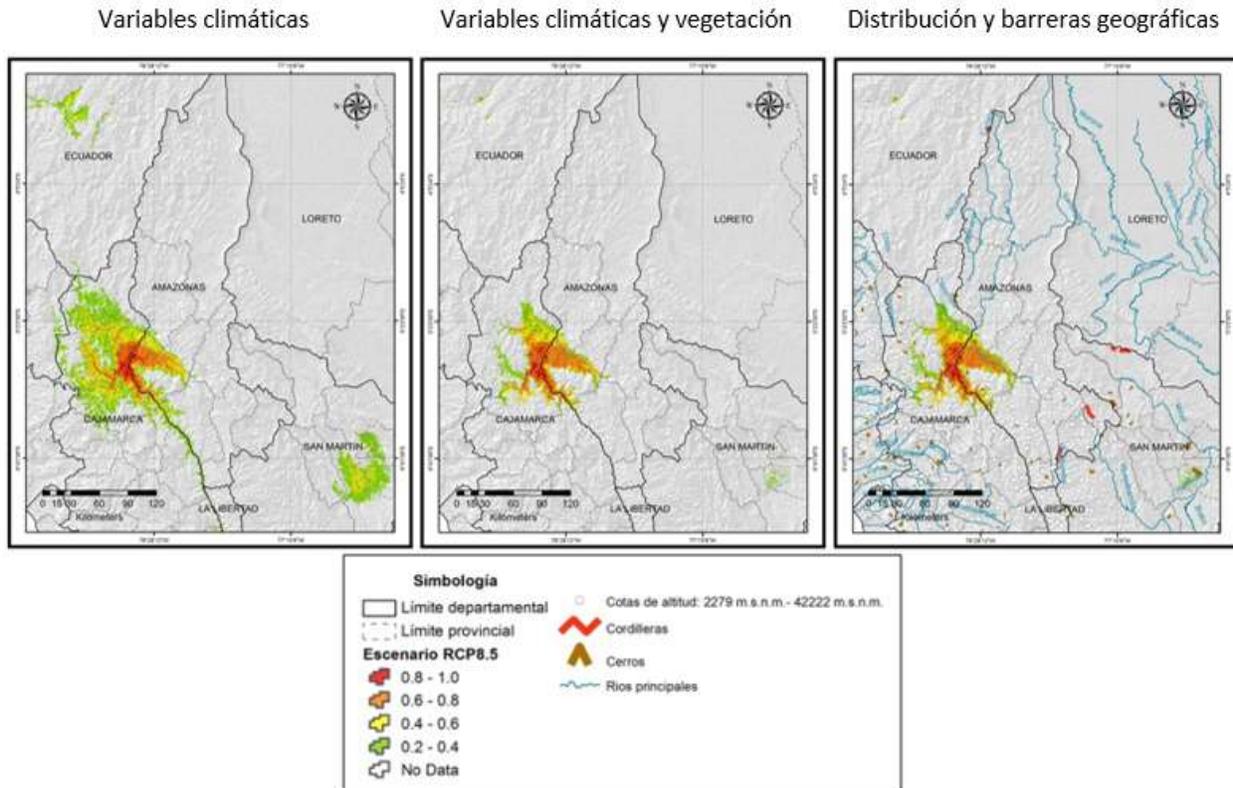


El área de distribución potencial futura de la especie *P. internadinus* muestra un aumento del 29.7% respecto a la línea de base. En este escenario la distribución se circunscribiría a las provincias de Utcubamba y Jaén; incorporándose zonas colonizables hacia el noreste de la provincia de Jaén y hacia el norte de la provincia de San Ignacio. Los intervalos CMA y CA, señalan alta certeza en las localidades de El Milagro y Bagua. Las localidades de El Parco y Copallin en la provincia de Bagua; Bellavista y Jaén en la provincia de Jaén; Bagua Grande, Cumba Yamon y Lonya Grande en la provincia de Utcubamba; Choros, Toribio Casanova, Santo Tomás, Cujillo en la provincia de Cutervo también son significativos. Así como, el sur de Cajaruro en la provincia de Utcubamba y el crecimiento en las localidades de Chirinos, La Coipa, Huarango y Santa Rosa en la provincia de San Ignacio.

El escenario RCP8.5, evidencia que la distribución potencial futura de *S. huancabambae* de mayor certeza ocurriría en la zona sur de Chirinos y Huarango hasta la frontera de las localidades San Ignacio y San José de Lourdes, provincia de San Ignacio. La distribución continúa centrándose en las localidades de Bellavista,

Jaén y Santa Rosa en la provincia de Jaén; El Parco, La Peca y Copallín en la provincia de Bagua; El Milagro, Cajaruro y alrededor del 50% de Bagua grande en la provincia de Utcubamba. Es interesante mencionar que en este escenario a distribución se extiende hacia el norte.

FIGURA N° 9. Área de distribución potencial futura de la especie *P. Interandinus*, RCP8.5



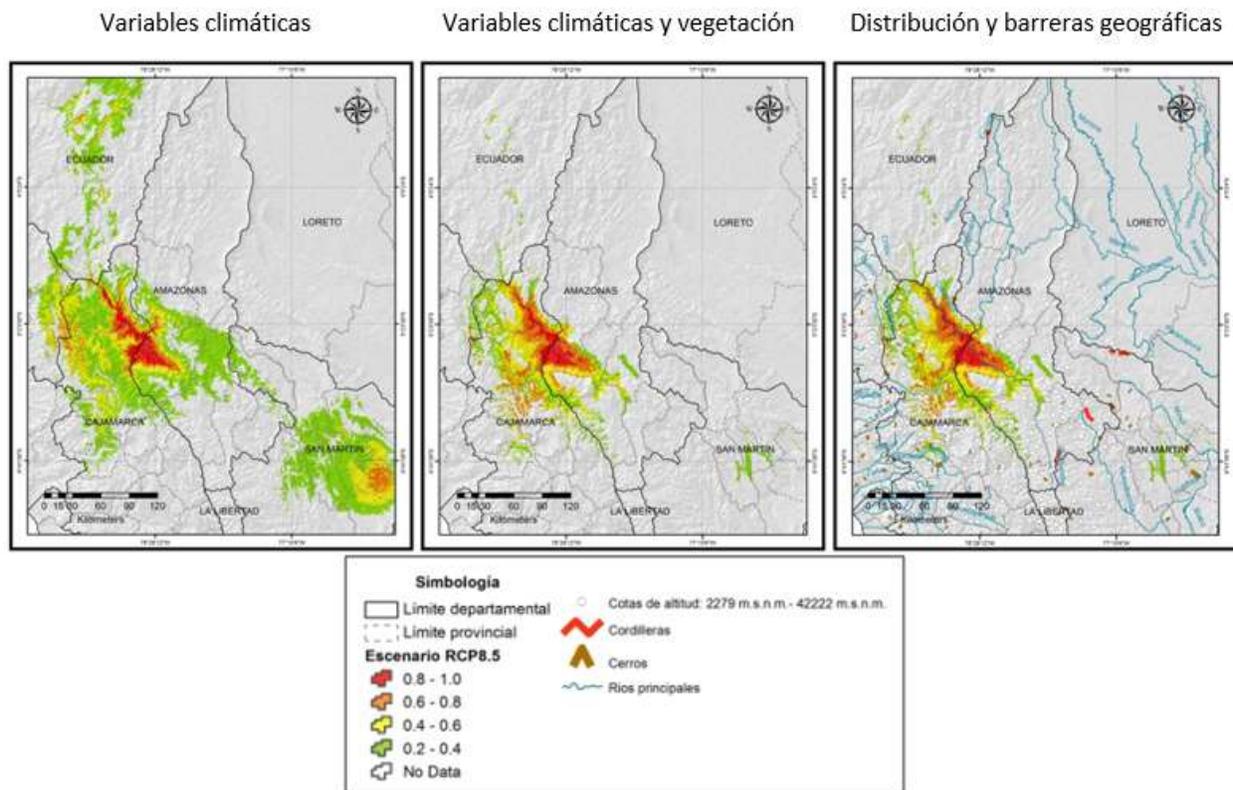
En el escenario RCP8.5 de mayor cambio climático, el rango de la especie se expandiría en un 30,8% respecto a su línea de base. Según el nivel de certeza de CMA y CA de alto nivel de precisión., el aumento porcentual sería de 29.1%. Las respuestas de la especie bajo los escenarios de forzamiento dados sugieren que será la única especie que continuará expandiendo su área de distribución potencial bajo un cambio climático extremo.

En el escenario RCP8.5, La distribución potencial de especies a futuro constituyó en promedio 96.2% del área de estudio, siendo el cálculo de 23.5% correspondiente a la distribución de *B. intermedia*, 20,4% de *P. interandinus* y 8,8% de *S. huancabambae*.

Las áreas naturales protegidas nacionales y privadas no contemplan aún las distribuciones estimadas de las

especies evaluadas Sólo el Santuario Nacional Tabaconas Namballe y Parque Nacional de Cutervo abarcaría el mínimo porcentaje de 4.4% correspondiente a la especie *S. huancabambae*; sin ser significativo. En el escenario RCP8.5, el 54,9% de la distribución futura de *B. intermedia*, el 65,5% de la especie *P. interandinus* y el 21,5% de la especie *S. huancabambae* se ubican en el sitio prioritario Bosques secos del Marañón, ampliándose los valores porcentuales y manteniéndose las áreas de alta certeza.

FIGURA N° 10. Área de distribución potencial futura de la especie *S. huancabambae*, RCP8.5



El área propuesta 1 como oportunidad de conservación continúa siendo la más representativa y se empiezan a distinguir las áreas propuestas 4 y 5 con valores CA y CM.

Los resultados indican una tendencia creciente de la distribución en los dos escenarios de cambio climático RCP2.6 y RCP8.5. Si consideramos las diferencias entre ambos escenarios, observamos una expansión relativamente pequeña de la posible distribución futura en el escenario RCP8.5, donde la distribución estimada disminuye desde los extremos hacia la zona central en conjunto con la deducción de los intervalos de certeza CMA y CA, lo que sugiere que los efectos de un cambio climático tan severo comenzarán a ser

intolerables. De acuerdo con el modelo se ha estimado algunos sectores en Ecuador y en la región San Martín que, por sus características climáticas similares al área de estudio podrían transformarse en áreas de distribución certera; sin embargo, el ajuste del modelo al incluir la variable de vegetación o zonas de vida, ubicó estos parches en intervalos de confianza bajo, aquello concuerda con los límites geográficos, añadiendo validez al modelamiento.

TABLA N° 6. Porcentaje de cambio del área de distribución potencial de las especies estudiadas, intervalos CM, CA, CMA (0.4 – 1.0).

Especie	Área potencial presente	% de cambio	de RCP2.6	% de cambio	de RCP8.5
<i>Bachia intermedia</i>	2113.5 km ²	53.29%	3239.7 km ²	43.94%	3042.2 km ²
<i>Phyllodactylus interandinus</i>	2617.3 km ²	47.54%	3861.5 km ²	38.04%	3612.9 km ²
<i>Stenocercus huancabambae</i>	4614.9 km ²	45.54%	6716.7 km ²	73.75%	8018.6 km ²

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

El estudio, pronostica cambios espaciales inminentes en la distribución geográfica de las especies *Bachia intermedia*, *Phyllodactylus interandinus* y *Stenocercus huancabambae*, aunque se simulan dos escenarios RCP opuestos. La cartografía referente al rango potencial de línea de base permite evidenciar que la distribución se focaliza en el área de estudio, al cual, que se suman 7 localidades nuevas según los intervalos de presencia de 0.4 - 1.0 para las tres especies. Las áreas de distribución de las tres especies convergen en las localidades de Bellavista y El Milagro, el norte de Bagua Grande, el norte de Choros, el sur de Cajaruro, el este de Jaén y el norte de Cumba. Destacando Bellavista y El Milagro, nuestra área de estudio, como el sector más significativo. Asimismo, se caracteriza una distribución restringida propia de las especies

endémicas, correspondiente a un hábitat especializado que configura una suerte de remanente de bosque seco de valle interandino.

El modelamiento de distribución potencial futuro brinda información consistente sobre los efectos del incremento del cambio climático de manera progresiva, demostrando un aparente beneficio con el aumento de las dimensiones de la distribución estimada por especie hacia el norte del área de estudio, por cambios favorables en las variables ambientales que devendrían en una probable migración altitudinal. Se ha demostrado que el cambio climático en sí mismo no crea ni exagera condiciones de vulnerabilidad de las especies evaluadas.

Según nuestro estudio, RCP2.6 constituye un escenario en el que las especies analizadas amplían su distribución en un promedio de 48,79%, al año 2050 lo que se superpone con las áreas naturales donde, por el momento, continúa el ecosistema de bosque seco. Sin embargo, RCP8.5 configura un escenario donde nuestras tres especies aumentan su rango en menor medida que el escenario anterior. Aquello es sustento de que a pesar de la evidencia sobre la posibilidad de migración a nuevas áreas colonizables mitigando la probabilidad de una extinción local, el modelamiento revela que el forzamiento antropogénico excesivo inicia un proceso en detrimento de la calidad ambiental y degradación del hábitat que inicialmente los benefició. El riesgo es aún mayor si se sabe que el posible deterioro de áreas aptas comenzará en sectores que actualmente son el hábitat natural de las especies. Los espacios que componen el hábitat natural se volverán extremadamente secos y el rango potencial se reducirán paulatinamente, fomentando el riesgo de extinción. La premisa clave es que el aumento inicial del área potencial de distribución futura no simboliza que las poblaciones de las especies estudiadas se mantengan al año 2050. Este escenario se vuelve crítico considerando que las especies B intermedia, *P. interandinus* y *S. huancabambae* no registran datos de presencia en ninguna otra región en el mundo, la variable más importante es el tiempo.

Como se observa en los resultados, la herramienta Maxent generalmente sobreestima el área de distribución en las regiones de Ecuador y San Martín, pero esta limitación del modelo pudo ser resuelta y optimizada con la complementariedad del estudio de las barreras geográficas, creando así una realidad espacial que corresponde a la distribución potencial presente y futura.

Las tres especies se encuentran en aislamiento, y ninguna se encuentra actualmente bajo protección privada o estatal. En los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, ninguna de las tres especies, a pesar de ampliar su distribución potencial, está contenida de manera significativa en las reservas naturales.

El Corredor Regional del Marañón propuesto podría ser una opción de conservación apropiada para las especies; sin embargo, en su estado no es representativo cuando se comparan áreas prioritarias, por lo cual, debería reestructurarse, es importante puntualizar que no es garantía la realización de esta evaluación para cuando se ejecute su reconocimiento como área de protección.

En comparación con las variables continuas incluidas en el modelo para las tres especies estudiadas, la importancia de la variable categórica fue destacada, mostrando una significancia de 4.3. Las variables que más contribuyeron al modelo resultante fueron la cobertura vegetal o zonas de vida y la precipitación como variable climática, destaca especialmente la cantidad de precipitación mensual de febrero (Prec2) para *B. intermedia*, *P. interandinus* y *S. huancabambae*. Asimismo, destacan en gran medida la cantidad de precipitación mensual de enero, del trimestre octubre - diciembre; del trimestre más cálido y del trimestre más seco, luego se pueden distinguir la variable isotérmica y la temperatura media anual.

En los resultados del proceso de validación, el modelo mostró un valor de AUC de 0.999, revelando el mejor desempeño para modelar a las especies estudiadas. Un valor de puntuación de AUC > 0,9 define un modelo útil con alta precisión. Además, los valores p para 11 umbrales diferentes replicados por especie mostraron valores muy bajos de $P < 0.01$, contribuyendo al mantenimiento de predicciones exitosas.

Los valores de desviación media por observación (Baldwin, 2009), indican que los resultados del modelo para las especies *B. intermedia* y *P. interandinus* son cercanos a cero con una desviación estándar de 0,001, es gráficamente invisible, por lo que la consistencia del área obtenida es alta y la probabilidad de cambiar el resultado, incluso si el proceso de modelado se repite n veces, es extremadamente baja. En el caso de la especie *S. huancabambae*, la desviación estándar es 0.003, pero este valor aún indica que el modelo funciona adecuadamente.

CONCLUSIONES

En base a los resultados por escenarios de forzamiento antropogénico RCP2.6 y RCP8.5, un cambio climático mínimo es suficiente para alterar la distribución actual de las especies de estudio, expandiendo y desplazando su distribución potencial para el 2050. Esto nos permitió confirmar que nuestras especies tienen límites de tolerancia bastante bajos.

La sensibilidad de las especies ante los efectos del cambio climático varía en función al escenario aplicado medido según el tamaño del área de distribución potencial, la cual, se reduce en el escenario RCP8.5 en comparación al escenario RCP2.6. En este sentido la vulnerabilidad es más alta en las especies *B. intermedia* y *P. interandinus*, descubriendo mayor adaptabilidad climática por parte de la especie *S. huancabambae*, debido a que distribución sigue una tendencia positiva en ambos escenarios.

Nuestra hipótesis se confirmó al identificar nuevas áreas colonizables fuera del rango potencial presente. Los escenarios de cambio climático indican la posibilidad de migración hacia áreas climáticamente favorables. Por otro lado, el estudio mostró que, aunque que las especies puedan llegar a nuevos espacios debido a un escenario RCP8.5, las áreas aptas para la supervivencia y el desarrollo de las tres especies iniciaría un proceso de reducción al 2050 en vez de continuar su incremento. Los resultados también localizan en gran medida áreas que cumplen con los requisitos de un ambiente favorable desplazándose hacia el sur, pero las limitaciones espaciales debido a la geografía del área de estudio indican que la configuración espacial es clave en la determinación de sectores de posible migración.

Los esfuerzos de muestreo para especies endémicas son insuficientes, particularmente a nivel nacional, donde la mayoría de los datos se derivan de fuentes y encuestas extranjeras, lo que destaca la dificultad de obtener datos georreferenciadas de las especies evaluadas. Si no se utilizan suficientes muestras, un modelo en sí mismo puede sobrestimar la suposición de que las especies se encuentran en áreas extremadamente aisladas. Por ello, parte de nuestro trabajo de recolección es una importante contribución al conocimiento de la fauna endémica y su conservación.

Sería muy beneficioso desarrollar un modelo climático regional basado en el método PRECIS que consiste en datos especializados para las regiones geográficas de los Andes y la cuenca del Amazonas en América

del Sur. Aparentemente este modelo se acomodaría mejor a nuestro estudio; sin embargo, con una resolución aún insuficiente (25 min), los resultados de nuestra investigación no serían válidos, por lo que el uso de este método no es adecuado para nuestra área de trabajo. Si el método puede proporcionar una resolución mínima de 1 km x 1 km (30 segundos), se recomienda realizar más investigaciones como la presente para el Perú y Latinoamérica.

Se recomienda complementar el estudio considerando aspectos bióticos como el modelamiento de los depredadores o competidores naturales de nuestras especies y teniendo en cuenta los factores alimentarios disponibles para mejorar las tendencias. Actualmente no hay evidencia científica sólida que cubra estos temas para las especies estudiadas, lo que enfatiza la necesidad de estudios de referencia.

La conservación de las especies endémicas sigue siendo una problemática inmersa en el interior el tema de conservación y protección de la biodiversidad; debe entenderse su vulnerabilidad específica significativamente mayor en comparación con las especies generalistas. El mejor escenario a futuro para los territorios que contienen a nuestras especies es aquel donde existe un uso compatible del espacio y los recursos naturales entre la sociedad y la fauna. Sin embargo, la tendencia observable se orienta a una escasa valoración de otros organismos diferentes al ser humano, aquello, en conjunto con las políticas ambientales y de ordenamiento territorial incipientes y en desarrollo en el Perú, configura un verdadero desafío. Es necesario preguntarnos hasta qué límite cuantificable de pérdida de especies endémicas y hábitats peruanos estamos dispuestos a asumir, y, plantearnos rumbos de acción.

BIBLIOGRAFÍA

Baldwin, R. A. (2009). Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy*, 11, 854 – 866.

Blondel, J. (1985). *Biogeografía y Ecología: Síntesis sobre la estructura, la dinámica y la evolución de las poblaciones de los vertebrados terrestres*. S.L. Leon, Ed. España: Academia.

Chou et al. (2014). Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438 – 454.

Elith, J., et al. (2011). A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43 – 57.

- Engler, R., et al. (2004). An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology*, 41, 263 – 274.
- FAO. (2014). *Los bosques y el cambio climático en el Perú: situación y perspectivas*. Lima.
- Fielding, A.H. and Bell J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38 – 49.
- Foden, W., et al. (2008). *Species susceptibility to climate 203 change impacts*. The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species, Switzerland.
- Gobierno Regional de Amazonas (2006). *Estrategia de la Diversidad Biológica de Amazonas*. BIODAMAZ.
- Graham, C., et al. (2011). Species Distribution Modeling and the Challenge of Predicting Future Distributions. In Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes. In: *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Herzog K. Ed.
- Guisan, A., et al. (2013) Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16, 1424 – 1435 .
- Hegerl, G.C., et al. (2007). Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, United Kingdom and New York.
- Hijmans, R. J., et al. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965 – 1978.
- Hipolito, J., et al. (2015). Solving problems involving the distribution of a species of unknown distribution via ecological niche modeling. *Natureza & Conservação*, 13(1), 15 – 23.
- Hirzel, A.H., et al. (2002) Ecological niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data?. *Ecology*, 83, 2027 – 2036.
- Ladle, R. J. and Whittaker, R. J. (2011). *Conservation Biogeography*. Wiley Ed. Chichester, UK.
- Larsen, H., et al. (2011). Range Shifts and Extinctions Driven by Climate Change in the Tropical Andes: Synthesis and Directions. In: *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American

Institute for Global Change Research.

Magrin, G., et al. (2007). Latin America. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., UK.

Mauch, J. y Birch, J. W. (1998). *Guide to the succesful thesis and disertation. A Handbook for students and faculty fourth Edition, revised and expanded.* University of Pitsburg, Pensylvania.

Moss, R. H., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747 – 756.

Müller, P. (1979). *Introducción a la zoogeografía.* Blume Ed. Barcelona.

Pacheco, V. (2002). Mamíferos del Perú. En: *Mamíferos Neotropicales.*

Pearson, R. G. (2008). Species Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. *Lessons in conservation*, 3, 54 – 89.

Phillips, S.J., et al. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231 – 259.

Reid, H. y Alam, M. (2008). Los Cambios Climáticos y los objetivos de Desarrollo del Milenio. En: *El Clima visto desde el Sur: El calentamiento global según los países emergentes*, 1ra ed, Buenos Aires.

Scheldeman, X. and Van Zonneveld, M. (2010). *Training Manual on Spatial Analysis of Plant Diversity and Distribution.* Bioversity International Ed. Rome.

Vargas, P. (2009). *Cambio Climático y sus efectos en el Perú.* Banco Central de Reserva del Perú.

Whittaker R. J., et al. (2005). Conservation Biogeography: assessment and prospect. *Diversity and Distributions: A Journal of Conservation Biogeography*, 11, 3 – 23.

WWF. (2012). *Planeta Vivo Informe 2010: Biodiversidad, biocapacidad y propuestas de futuro.*

Young, B. et al. (2007). *Distribución de las especies endémicas en la vertiente oriental de los Andes en Perú y Bolivia.* NatureServe, Arlington, Virginia, EE UU.