



▶▶ **EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA DISTRIBUCIÓN DE 20
ESPECIES DE AVES DE LA REGIÓN
AMAZÓNICA DEL PERÚ**



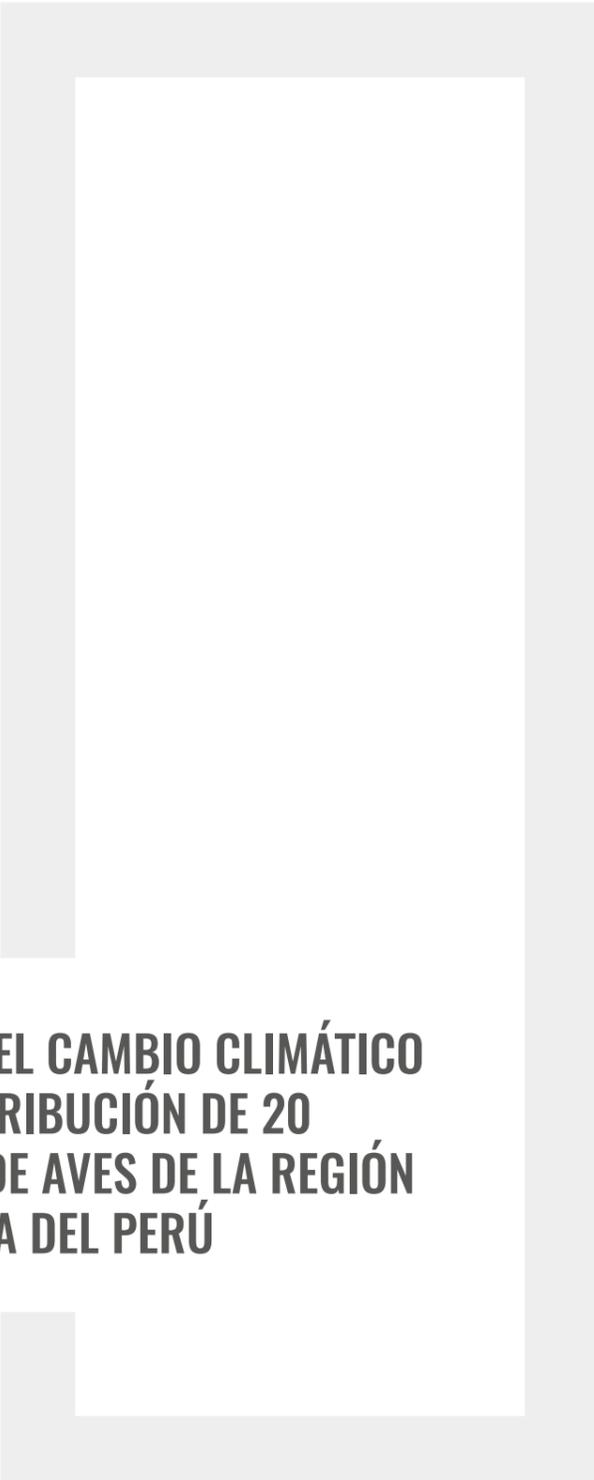
PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego

SERFOR Servicio
Nacional
Forestal y
de Fauna
Silvestre



BICENTENARIO
PERÚ 2021



►► **EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA DISTRIBUCIÓN DE 20
ESPECIES DE AVES DE LA REGIÓN
AMAZÓNICA DEL PERÚ**

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCION DE 20 ESPECIES DE AVES DE LA REGIÓN AMAZÓNICA DEL PERÚ

MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego
Federico Bernardo Tenorio Calderón

Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego
José Alberto Muro Ventura

Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario
María Isabel Remy Simatovic

SERVICIO NACIONAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE (SERFOR)

Director Ejecutivo (e)
José Alberto Muro Ventura

Programa de Desarrollo Forestal Sostenible, Inclusivo y Competitivo en la Amazonía Peruana

Directora Ejecutiva
Nelly Paredes Del Castillo

Proyecto de Inversión "Manejo forestal sostenible"

Elaboración:

Viviana Ceccarelli – Biodiversity International
Tobias Fremout – Biodiversity International y KU Leuven Bélgica, División de Bosque, Naturaleza y Paisaje
Evert Thomas - Biodiversity International
Carolina Ocampo Ariza – Biodiversity International y Universidad Georg-August
Patricia Duran Montesinos – SERFOR
Alex Arana Olivos – SERFOR
Julio Ugarte Guerra

Revisión de contenido:

Renzo Barrón Meneses
Vanessa Moreano Rodríguez

Diseño y diagramación

Negrápata S.A.C.

Primera edición, diciembre 2020

Tiraje: 100 ejemplares

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2020-10272

Impreso en Negrápata S.A.C.

Jr. Suecia 1470, Urb. San Rafael, Lima, Perú

© Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR)
Av. Javier Prado Oeste N° 2442, Urb. Orrorantía, Magdalena del Mar, Lima, Perú
Teléfono: (511) 225-9005
www.gob.pe/serfor
informes@serfor.gob.pe

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso.

Referencia sugerida:

SERFOR. 2020. Efectos del cambio climático en la distribución de 20 especies de aves de la región amazónica del Perú. Lima, Perú. 54 pp.

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | OBJETIVO Y METODOLOGÍA | 6 |
| | Objetivo | 6 |
| | Área de estudio | 6 |
| | Selección de las 20 especies | 6 |
| | Variables ambientales | 8 |
| | Metodología para el modelamiento de cambio climático | 9 |
| | Visualización de los resultados con la herramienta en línea | 11 |
| 2 | FICHAS TÉCNICAS DE LAS 18 ESPECIES | 12 |
| | <i>Amazona festiva</i> (Loro de lomo rojo) | 13 |
| | <i>Ara chloropterus</i> (Guacamayo rojo y verde) | 15 |
| | <i>Ara macao</i> (Guacamayo escarlata) | 17 |
| | <i>Crax globulosa</i> (Paujil carunculado) | 18 |
| | <i>Formicarius rufifrons</i> (Gallito-hormiguero de frente rufa) | 19 |
| | <i>Harpia harpyja</i> (Águila harpía) | 20 |
| | <i>Hemitriccus minimus</i> (Tirano-todide zimmer) | 21 |
| | <i>Herpsilochmus gentryi</i> (Hormiguero antiguo) | 22 |
| | <i>Mitu salvini</i> (Paujil de Salvin) | 24 |
| | <i>Mitu tuberosum</i> (Paujil de pico afilado) | 26 |
| | <i>Morphnus guianensis</i> (Águila crestada) | 27 |
| | <i>Myrmoborus melanurus</i> (Hormiguero de cola negra) | 28 |
| | <i>Nannopsittaca dachillea</i> (Cotorra amazónica) | 29 |
| | <i>Neopelma chrysocephalum</i> (Saltarín-tirano de cresta azafrán) | 31 |
| | <i>Percnostola arenarum</i> (Hormiguero de Allpahuayo) | 32 |
| | <i>Phaethornis koepckeae</i> (Ermitaño de Koepcke) | 33 |
| | <i>Pipile cumanensis</i> (Guan de garganta azul) | 35 |
| | <i>Pteroglossus beaunarnaesii</i> (Aracari de cresta rizada) | 36 |
| | <i>Syndactyla ucayalae</i> (Pico recurvo peruano) | 38 |
| | <i>Zimmerius villarejoi</i> (Moscareta de Mishana) | 40 |
| 3 | SÍNTESIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS 20 ESPECIES | 42 |
| | Cambio neto del área idónea para las 20 especies | 42 |
| | Mapa de la pérdida de especies | 43 |
| | Sugerencia para áreas prioritarias de conservación | 44 |
| | ANEXO 1: Metodología | 48 |
| | Bibliografía | 51 |

1

OBJETIVO Y METODOLOGÍA

OBJETIVO

El objetivo del estudio es evaluar los efectos del cambio climático en la distribución de las poblaciones silvestres de 20 especies de aves.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es el bosque de las regiones Amazónicas de Huánuco, Amazonas, Junín, Loreto, Madre de Dios, Pasco, San Martín y Ucayali.

SELECCIÓN DE LAS 20 ESPECIES

Inicialmente, se colectaron los puntos de presencia de todas las especies de aves en la Amazonía peruana según eBird/Clements Checklist (Clements et al., 2019). Los puntos de presencia fueron obtenidos de las siguientes bases de datos: GBIF (Global Biodiversity Information Facility; www.gbif.org), e Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR.

Luego de coleccionar los datos, se procedió con la selección de las especies para el modelamiento de acuerdo a los siguientes criterios: (i) que las especies estén amenazadas según el Libro Rojo de la Fauna Silvestre Amenazada del Perú (SERFOR, 2018), (ii) que existan como mínimo 15 puntos de presencia, y (iii) que por lo menos la mitad de los puntos de presencia se encuentren ubicados en la Amazonía. Las siguientes 20 especies cumplieron los criterios y fueron utilizadas para el modelamiento.

| N° | ESPECIES DE AVES | NOMBRE COMÚN | N° REGISTROS | CATEGORÍA |
|----|--|-----------------------------------|--------------|-----------|
| 1 | <i>Ara macao</i> L. | Guacamayo Escarlata | 459 | NT |
| 2 | <i>Ara chloropterus</i> Gray | Guacamayo rojo y verde | 315 | NT |
| 3 | <i>Pipile cumanensis</i> Jacquin | Guan de garganta azul | 266 | NT |
| 4 | <i>Mitu tuberosum</i> Spix | Paujil de pico afilado | 157 | NT |
| 5 | <i>Pteroglossus beauharnaesii</i> Wagler | Aracari de cresta rizada | 134 | NT |
| 6 | <i>Amazona festiva</i> L. | Loro de lomo rojo | 111 | NT |
| 7 | <i>Harpia harpyja</i> L. | Águila harpía | 93 | VU |
| 8 | <i>Morphnus guianensis</i> Daudin | Águila crestada | 79 | VU |
| 9 | <i>Mitu salvini</i> Reinhardt | Paujil de Salvin | 69 | VU |
| 10 | <i>Syndactyla ucayalae</i> Chapman | Pico recurvo peruano | 56 | NT |
| 11 | <i>Nannopsittaca dachilleae</i> O'Neill, Munn & Franke | Cotorra amazónica | 52 | NT |
| 12 | <i>Myrmoborus melanurus</i> Sclater & Salvin | Hormiguero de cola negra | 46 | NT |
| 13 | <i>Formicarius rufifrons</i> Blake | Gallito-hormiguero de frente rufa | 38 | NT |
| 14 | <i>Phaethornis koepckeae</i> Weske & Terborgh | Ermitaño de Koepcke | 34 | NT |
| 15 | <i>Zimmerius villarejoi</i> Álvarez Alonso & Whitney | Moscareta de Mishana | 27 | VU |
| 16 | <i>Neopelma chrysocephalum</i> Pelzeln, | Saltarín-tirano de cresta azafrán | 26 | VU |
| 17 | <i>Hemitriccus minimus</i> Tod | Tirano-todí de zimmer | 25 | NT |
| 18 | <i>Crax globulosa</i> Von Spix | Paujil carunculado | 21 | EN |
| 19 | <i>Herpsilochmus gentryi</i> Whitney & Álvarez Alonso | Hormiguero antiguo | 17 | NT |
| 20 | <i>Percnostola arenarum</i> Isler, Álvarez Alonso, Isler & Whitney | Hormiguero de Allpahuayo | 17 | VU |

NT: casi amenazada; VU: vulnerable; EN: en peligro.

VARIABLES AMBIENTALES

Para el modelamiento se utilizaron 35 variables ambientales: 21 variables climáticas, 9 variables de suelo y 5 variables de terreno o fisiográficas. Las variables climáticas se obtuvieron de la base de datos WorldClim – Global Climate Data, las variables de evapotranspiración potencial anual e índice de aridez, fueron calculadas a través de los datos bioclimáticos, las variables de suelo se obtuvieron de SoilGrids – ISRIC World Soil Information, mientras que las variables de terreno corresponden a la variación de altitud; analizadas mediante el paquete *raster* en el programa R.

| N° | VARIABLE | TIPO DE VARIABLE |
|----|--|------------------|
| 1 | BI01: Temperatura promedio anual | Climáticas |
| 2 | BI02: Rango medio diario (temp max – temp min; promedio mensual) | |
| 3 | BI03: Isotermalidad (BI01/BI07 * 100) | |
| 4 | BI04: Estacionalidad en temperatura (coeficiente de variación) | |
| 5 | BI05: Temperatura máxima del período más caliente | |
| 6 | BI06: Temperatura mínima del período más frío | |
| 7 | BI07: Rango anual de temperatura (BI05-BI06) | |
| 8 | BI08: Temperatura media en el trimestre más lluvioso | |
| 9 | BI09: Temperatura promedio en el trimestre más seco | |
| 10 | BI010: Temperatura promedio en el trimestre más caluroso | |
| 11 | BI011: Temperatura promedio en el trimestre más frío | |
| 12 | BI012: Precipitación anual | |
| 13 | BI013: Precipitación en el período más lluvioso | |
| 14 | BI014: Precipitación en el período más seco | |
| 15 | BI015: Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) | |
| 16 | BI016: Precipitación en el trimestre más lluvioso | |
| 17 | BI017: Precipitación en el trimestre más seco | |
| 18 | BI018: Precipitación en el trimestre más caluroso | |
| 19 | BI019: Precipitación en el trimestre más frío | |
| 20 | Evapotranspiración potencial anual | |
| 21 | Índice de aridez | |
| 22 | Densidad aparente del suelo | Suelo |
| 23 | Contenido de grava | |
| 24 | Contenido de arcilla | |
| 25 | Contenido de limo | |
| 26 | Contenido de arena | |
| 27 | Capacidad de intercambio catiónico | |
| 28 | Contenido de carbono orgánico | |
| 29 | Contenido de nitrógeno | |
| 30 | pH del suelo | |

| N° | VARIABLE | TIPO DE VARIABLE |
|----|--------------------------------------|-------------------------|
| 31 | Aspecto | Terreno o fisiográficas |
| 32 | Dirección del flujo de agua | |
| 33 | Pendiente | |
| 34 | TPI: Índice de posición topográfica | |
| 35 | TRI: Índice de rugosidad del terreno | |

METODOLOGÍA PARA EL MODELAMIENTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

El modelamiento del impacto del cambio climático en aves se realiza en cinco etapas, las cuales se describen a continuación. Asimismo, para mayor detalle se recomienda revisar el Anexo 1 o visitar la plataforma SERFOR Educa en el siguiente link <https://aulav.serfor.gob.pe/moodle/>

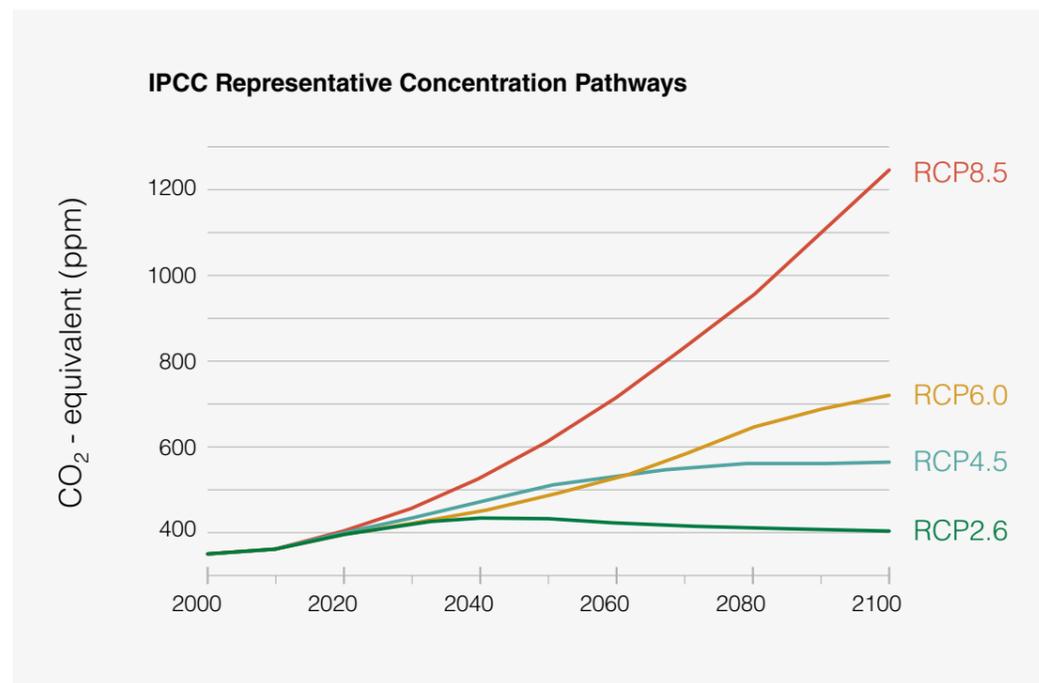
- Etapa 01. Selección de variables ambientales para eliminar la colinealidad:** Las variables colineales pueden aumentar la incertidumbre en el resultado de los algoritmos empleados para el modelamiento de los nichos ecológicos. Por ello, se requiere seleccionar un subgrupo de variables no colineales para la modelación. El análisis de colinealidad se hizo tanto para las condiciones climáticas presentes, como futuras; las variables se seleccionaron con base a los factores de inflación de varianza (VIF), reteniendo solo aquellas con VIF menores a 5 (Braunisch et al., 2013).
- Etapa 02. Filtración de los puntos de presencia para reducir el efecto del sesgo espacial:** Muchos reportes de presencia de la especie de interés en un solo nicho ecológico causan sesgo espacial, reduciendo el desempeño del modelamiento. Para evitarlo se consideró un solo punto de presencia por cada nicho ecológico definido, utilizando el llamado método de filtración ambiental (Varela et al., 2014), el cual brindó mejores resultados que el método de filtración geográfico basado en cuadrículas de tamaño definido.
- Etapa 03. Selección de puntos de pseudo-ausencia:** La pseudo-ausencia representa a los nichos ecológicos con condiciones idóneas para el desarrollo de la especie, pero donde no se ha registrado su presencia. Los nichos con puntos de pseudo-ausencia se seleccionaron de acuerdo al método del *target group* descrito por Phillips et al. (2009) y Mateo et al. (2010); a partir de una área definida por un polígono de casco convexo, alrededor de todos los puntos de presencia, extendido con un buffer equivalente al 10 % del eje más grande del polígono (Acevedo et al., 2012).
- Etapa 04. Modelamiento de nichos ecológicos:** El modelamiento se realizó utilizando conjuntos compuestos de hasta 9 algoritmos, por medio del paquete *BiodiversityR* para R (Kindt, 2018). Los algoritmos considerados son: algoritmo de entropía máxima (MAXENT); random forest (RF); modelos de regresión potenciada generalizada (GBM); modelos lineales generalizados (GLMSTEP); modelos aditivos generalizados (GAMSTEP, MGCV); análisis discriminante flexible (FDA); soporte de máquinas de vectores (SVM); splines de regresión adaptativa multivariante (EARTH).

Los algoritmos se validan de forma cruzada utilizando bloques espaciales con el paquete *blockCV* para R (Valavi et al., 2019). Los pesos de los algoritmos en cada uno de los modelos de conjunto se optimizan utilizando la función *ensemble.tune* del paquete *BiodiversityR*. Los algoritmos retenidos en el modelo de conjunto se calibraron nuevamente utilizando todos los puntos de presencia y pseudo-ausencia y las predicciones finales del conjunto se realizaron utilizando los pesos previamente optimizados.

Cada modelo fue evaluado a través de las métricas AUC y cross validated-AUC (cv-AUC). El primero indica cuánto de la distribución obtenida corresponde a los puntos de presencias, mientras que el cv-AUC indica cuánto el modelo es capaz de predecir presencias en áreas donde no fue calibrado y, por lo tanto, indica cuán confiable es para las proyecciones futuras.

5. **Eta 05. Proyecciones futuras por impacto del cambio climático:** Para las proyecciones futuras, se considera el horizonte temporal 2040-2069 y dos escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. El RCP4.5 hace referencia a un escenario de estabilización, teniendo en cuenta la disminución de emisiones según lo establecido en el Acuerdo de París (Tribett et al., 2017); mientras que el RCP8.5 es el escenario más pesimista (ver figura abajo).

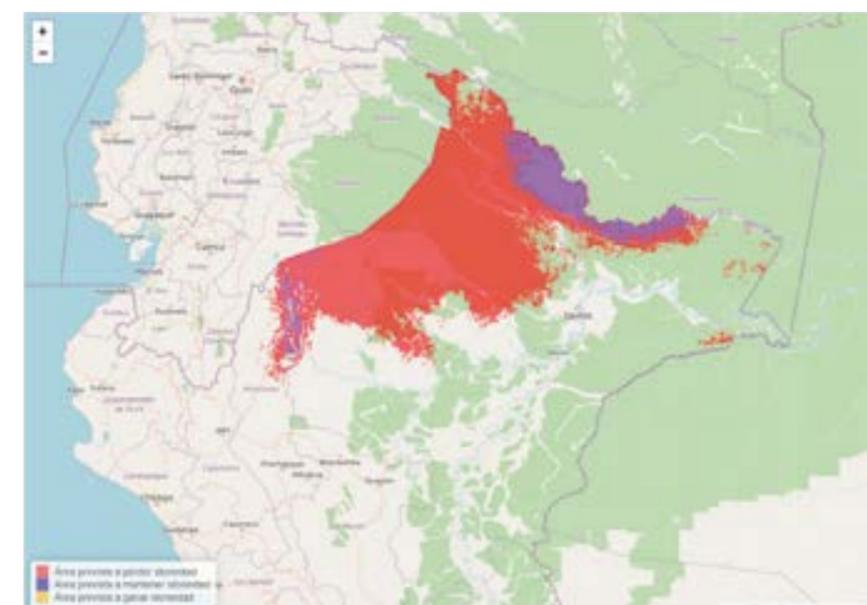
Los dos escenarios de emisión proyectan las condiciones climáticas futuras, caracterizadas con los denominados modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés), los cuales son modelados empleando el mapa de distribución de cada especie o nicho ecológico (Etapa 04). Para fines de este estudio utilizamos cinco GCM de cambio climático obtenidos del Portal de Cambio de la CCAFS: CESM1 (CAM5), GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MIROC5 y MPI-ESM-LR (Ramírez Villegas & Jarvis, 2010). De acuerdo a las coincidencias de los modelos de circulación general sobre la distribución se presentan 1 o 2 proyecciones futuras del área idónea. Es decir, para algunas especies existe coincidencia en 4 de los 5 modelos de circulación general, por ello se presenta una fila de mapas. En otras especies existe menor coincidencia entre los modelos circulación general y por ello se presentan 2 filas de mapas.



La figura muestra las diferencias en términos de emisiones de CO₂ para los dos escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. Como se puede observar, en el horizonte temporal 2040-2069, el escenario RCP4.5 tiene menos emisiones del escenario RCP8.5. Por lo tanto, las variaciones de temperatura y precipitación serán menos drásticas.

VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA HERRAMIENTA EN LÍNEA

Los resultados de la modelación de especies se presentan en las siguientes secciones del documento, además se incluyen las fichas técnicas para cada especie y síntesis del impacto climático sobre las 20 especies modeladas. Los mapas que muestran los cambios de las distribuciones presentes y futuras también están disponibles en la herramienta en línea: https://biodiversityinternational.shinyapps.io/cambio_climatico_SERFOR/. La cual permite seleccionar las especies y el periodo temporal (presente, y proyecciones futuras para el 2050 – RCP4.5 y 2050 – RCP8.5).





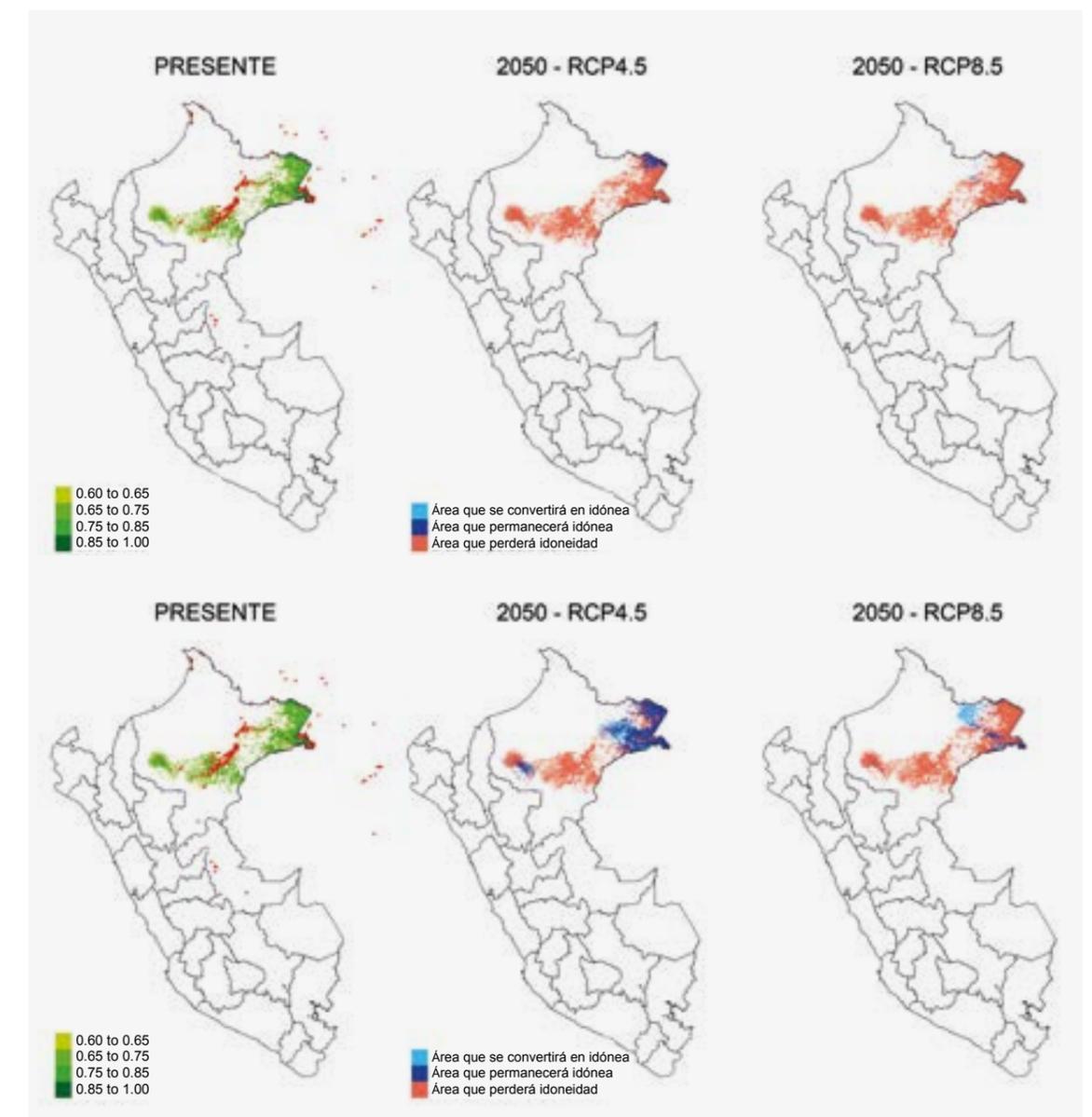
Amazona festiva

(Loro de lomo rojo)

Para *Amazona festiva* se presentan 2 filas de mapas relacionadas con las proyecciones futuras del cambio en el área idónea.

La fila superior muestra que usando 4 de 5 modelos de circulación general, se perdería (color rojo) el 94 % del área idónea del presente usando el escenario de emisión RCP4.5 y 99 % en el caso de RCP8.5. Asimismo, se conservaría mayor área idónea (color azul) en el escenario RCP4.5.

La fila inferior muestra el área idónea actual y los cambios de idoneidad que ocurrirían usando 3 de los 5 modelos de circulación general. Sin embargo, estas proyecciones de escenario futuro reportan menor coincidencia entre los modelos utilizados.



2 FICHAS TÉCNICAS DE LAS 20 ESPECIES

| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 263 |
| AUC | 0.94 |
| cv-AUC | 0.72 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, Random Forest, GAMSTEP, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío, BIO3: Isotermalidad |

Se presentan los cambios de área para la primera fila de mapas:

| PRESENTE | | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------|
| | | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 75966 km ² | Área estable | 6 % |
| Rango altitudinal | 62-254 m | Área de expansión | 0 % |
| Rango de temperatura | 25.6-27.2 °C | Área de contracción | -94 % |
| Rango de precipitación | 1722-3106 mm | Cambio neto | -94 % |
| | | | -98 % |

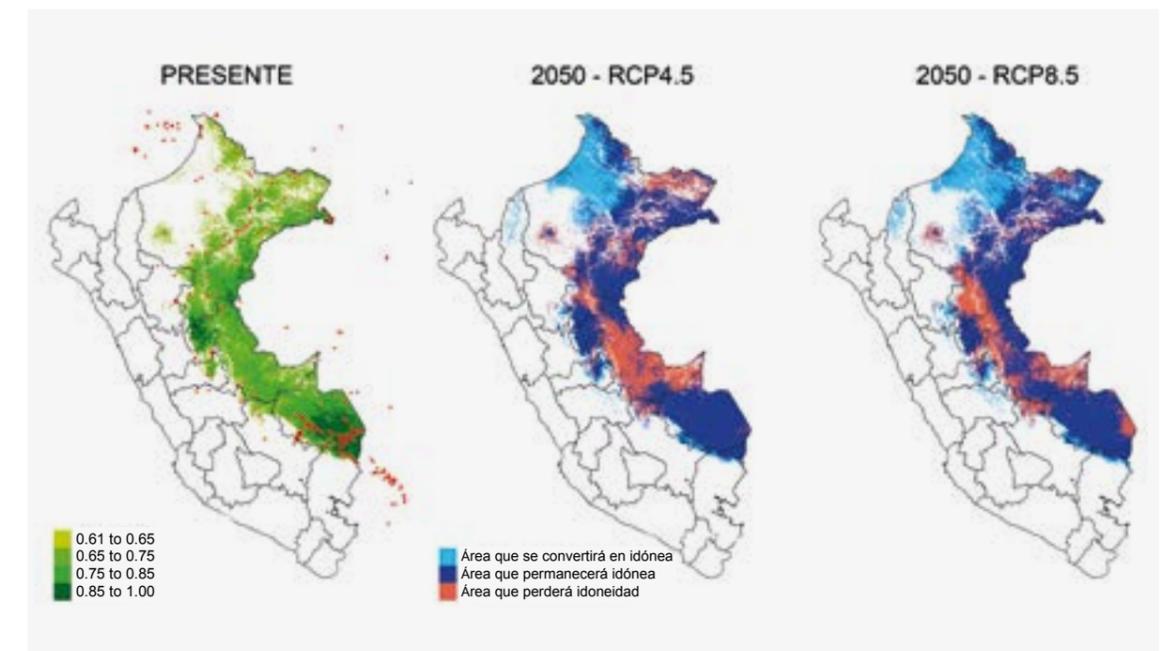


Ara chloropterus

(Guacamayo rojo y verde)

En el primer mapa se presenta la distribución actual de *Ara chloropterus*, señalándose de color verde oscuro el área más idónea, es decir, con condiciones que favorecen el desarrollo de la especie y en verde claro el área menos idónea.

En los dos siguientes mapas presentamos las proyecciones de la especie para el año 2050. En color rojo se distingue el área que potencialmente perderá idoneidad, equivalente al 27 % del área idónea del presente en el escenario de emisión RCP4.5 y 22 % en RCP8.5. En consecuencia, en el escenario de emisión moderado (RCP4.5), el 73 % del área conservará la idoneidad (color azul) y el 23 % se convertirá en idónea (color celeste). Mientras que en el escenario extremo (RCP8.5), el 78 % del área conservará idoneidad y el 28 % se convertirá en idónea.



| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 346 |
| AUC | 0.88 |
| cv-AUC | 0.79 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GLMSTEP, GAMSTEP, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BIO18: Precipitación en el trimestre más caluroso, BIO14: Precipitación en el período más seco |

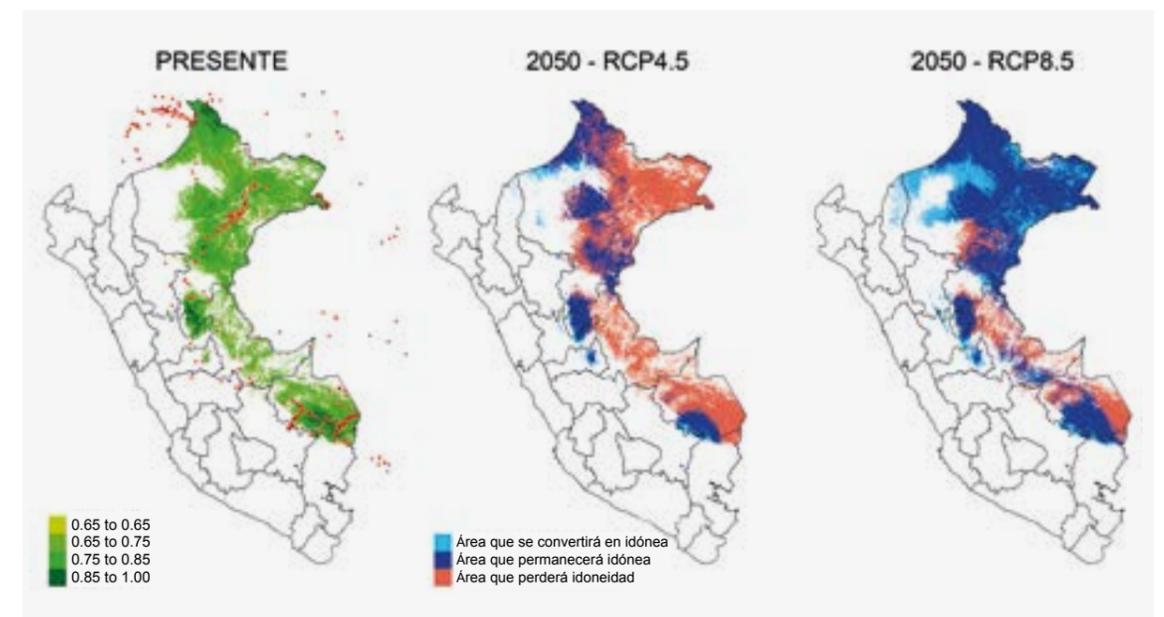
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 390933 km ² |
| Rango altitudinal | 62-1319 m |
| Rango de temperatura | 20.6-27.20 °C |
| Rango de precipitación | 1238-6294 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 73 % | 78 % |
| Área de expansión | +23 % | +28 % |
| Área de contracción | -27 % | -22 % |
| Cambio neto | +4 % | +6 % |



Ara macao

(Guacamayo escarlata)

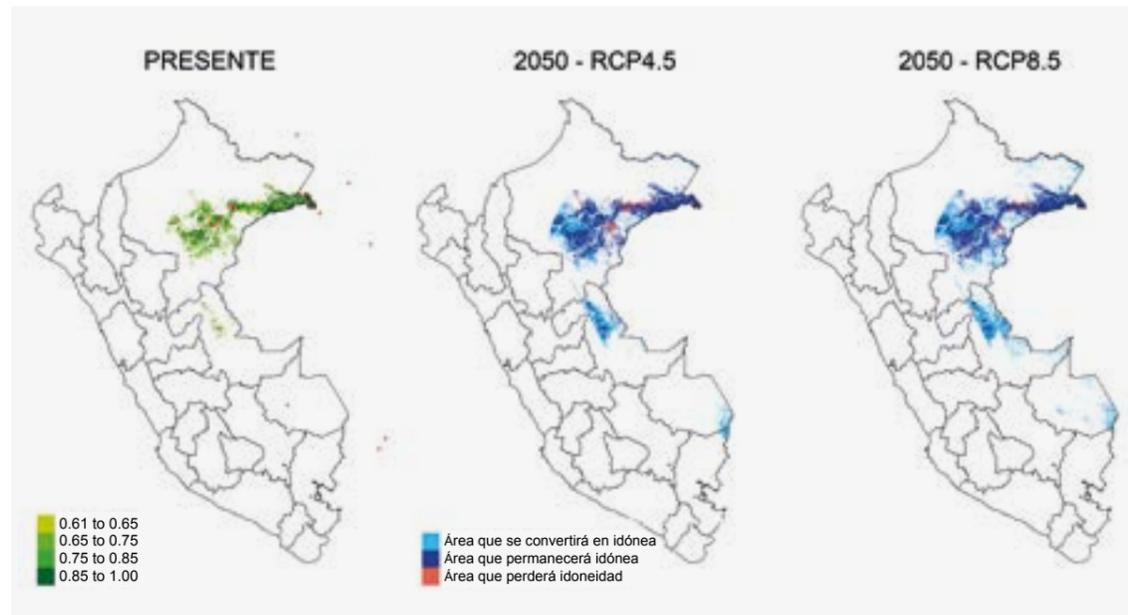


| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 415 |
| AUC | 0.93 |
| cv-AUC | 0.77 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío, BIO18: Precipitación en el trimestre más caluroso |

| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 356483 km ² |
| Rango altitudinal | 62-1019 m |
| Rango de temperatura | 22.1-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1489-6238 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 35 % | 79 % |
| Área de expansión | +5 % | +27 % |
| Área de contracción | -65 % | -21 % |
| Cambio neto | -60 % | -6 % |

Crax globulosa
(Paujil carunculado)

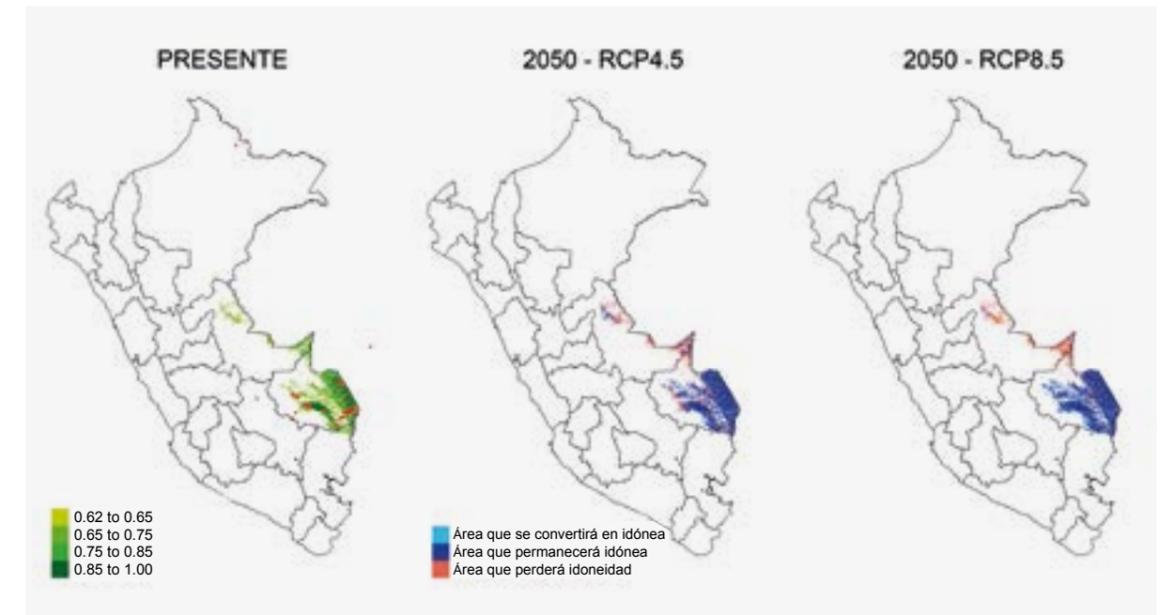


| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 40 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.68 |
| Algoritmos incluidos | GBM, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, TRI: Índice de rugosidad del terreno, BIO2: Rango medio diurno |

| PRESENTE | |
|------------------------|--------------|
| Total área idónea | 54294 km² |
| Rango altitudinal | 62-359 m |
| Rango de temperatura | 25-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1663-3106 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 91 % | 95 % |
| Área de expansión | +74 % | +116 % |
| Área de contracción | -9 % | -5 % |
| Cambio neto | +65 % | +111 % |

Formicarius rufifrons
(Gallito-hormiguero de frente rufa)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 72 |
| AUC | 0.92 |
| cv-AUC | 0.75 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, Random Forest, GAMSTEP, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO4: Estacionalidad en temperatura, TRI: Índice de rugosidad del terreno, contenido de nitrógeno |

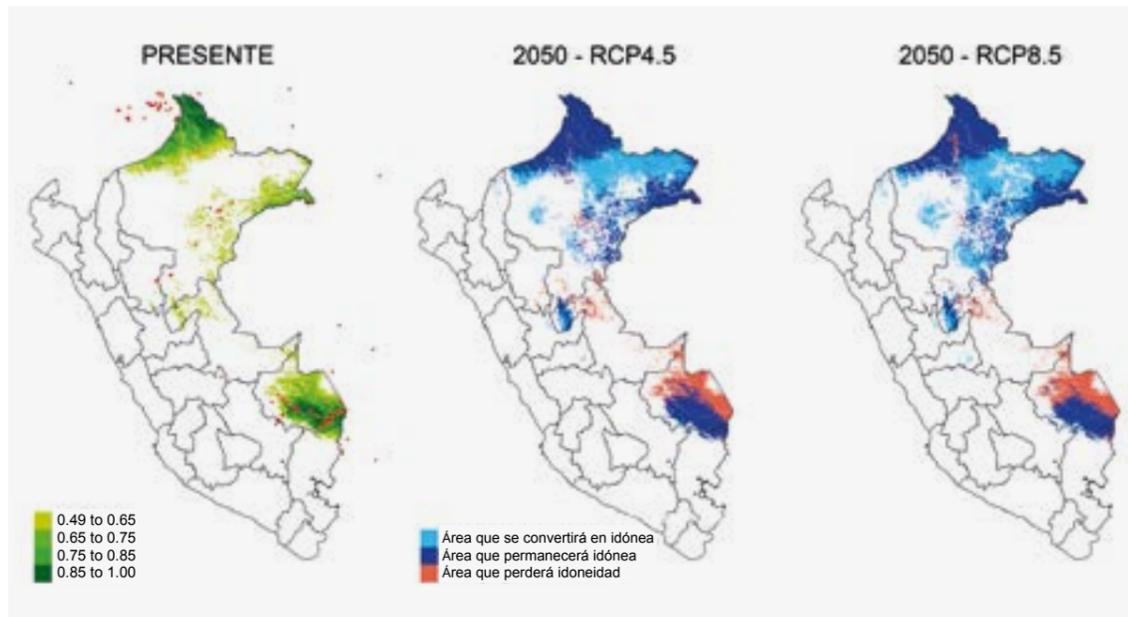
| PRESENTE | |
|------------------------|--------------|
| Total área idónea | 47819 km² |
| Rango altitudinal | 143-535 m |
| Rango de temperatura | 23.9-26.5 °C |
| Rango de precipitación | 1625-3977 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 77 % | 78 % |
| Área de expansión | +4 % | +9 % |
| Área de contracción | -23 % | -22 % |
| Cambio neto | -19 % | -13 % |



Harpia harpyja

(Águila harpía)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 140 |
| AUC | 0.94 |
| cv-AUC | 0.80 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, pendiente, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío |

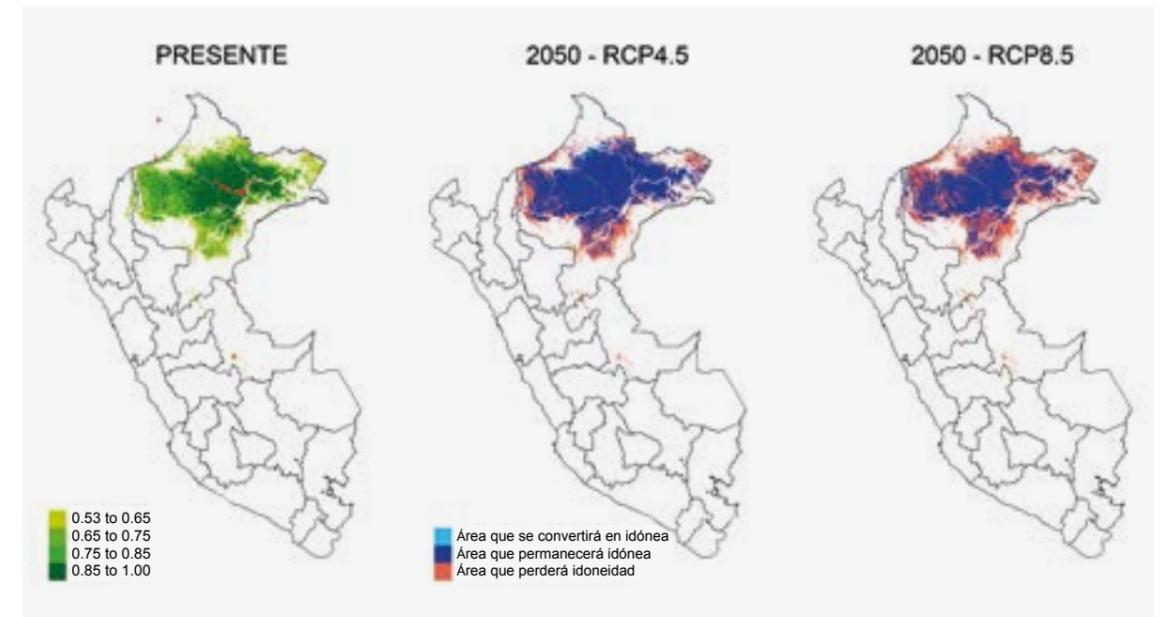
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 190961 km ² |
| Rango altitudinal | 62-1844 m |
| Rango de temperatura | 18.8-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1630-5294 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 78 % | 78 % |
| Área de expansión | +50 % | +64 % |
| Área de contracción | -22 % | -22 % |
| Cambio neto | +28 % | +42 % |



Hemitriccus minimus

(Tirano-Todi de Zimmer)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 59 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.91 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, RF, GLMSTEP, GAMSTEP, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | TRI: Índice de rugosidad del terreno, BIO4: Estacionalidad en temperatura, contenido de arena |

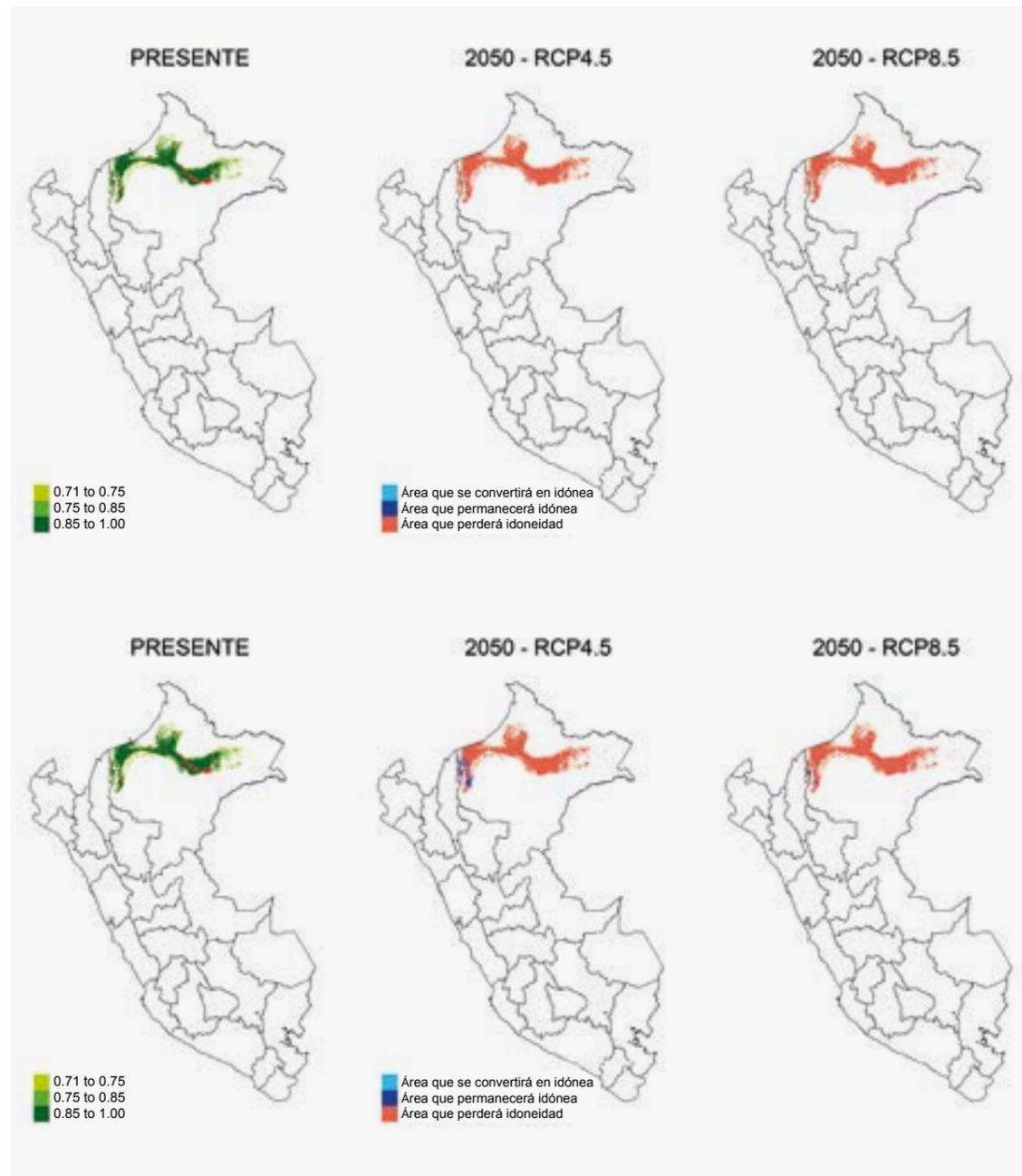
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 212599 km ² |
| Rango altitudinal | 73-544 m |
| Rango de temperatura | 24.8-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1542-4302 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 76 % | 59 % |
| Área de expansión | +1 % | 0 % |
| Área de contracción | -24 % | -41 % |
| Cambio neto | -23 % | -41 % |



Herpsilochmus gentryi

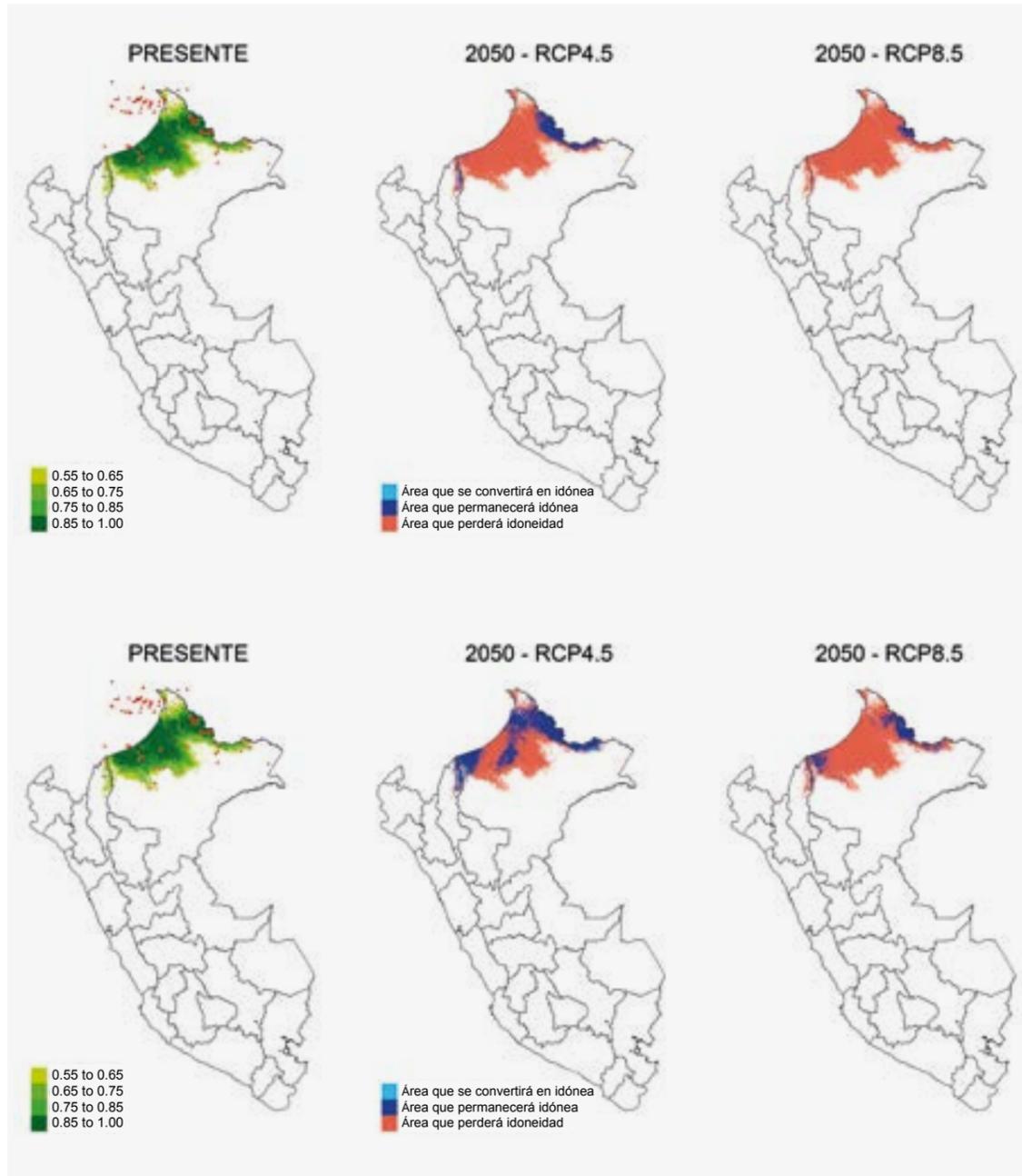
(Hormiguero antiguo)



| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 63 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.96 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, RF, GLMSTEP, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, pendiente, TRI: Índice de rugosidad del terreno |

| PRESENTE | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 54095 km ² | |
| Rango altitudinal | 81-759 m | |
| Rango de temperatura | 23.8-26.9 °C | |
| Rango de precipitación | 2140-3084 mm | |
| | Área estable | 0 % |
| | Área de expansión | 0 % |
| | Área de contracción | -100 % |
| | Cambio neto | -100 % |

Mitu salvini
(Paujil de Salvin)



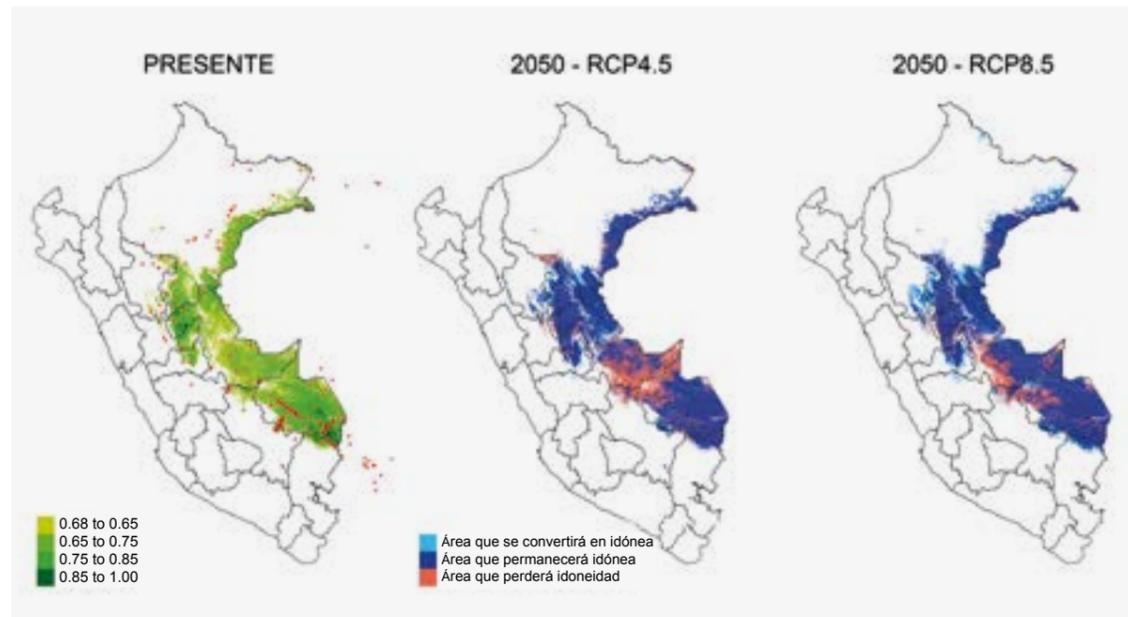
| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 98 |
| AUC | 0.92 |
| cv-AUC | 0.77 |
| Algoritmos incluidos | GBM, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, EARTH, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, contenido de arcilla, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío |

| PRESENTE | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 118908 km ² | |
| Rango altitudinal | 73-854 m | |
| Rango de temperatura | 23.4-26.7 °C | |
| Rango de precipitación | 2043-3430 mm | |
| | Área estable | 14 % |
| | Área de expansión | 0 % |
| | Área de contracción | -86 % |
| | Cambio neto | -86 % |



Mitu tuberosum

(Paujil de pico afilado)



| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| Nº puntos | 258 |
| AUC | 0.83 |
| cv-AUC | 0.74 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GLMSTEP, GAMSTEP, EARTH, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BIO14: Precipitación en el período más seco, BIO4: Estacionalidad en temperatura |

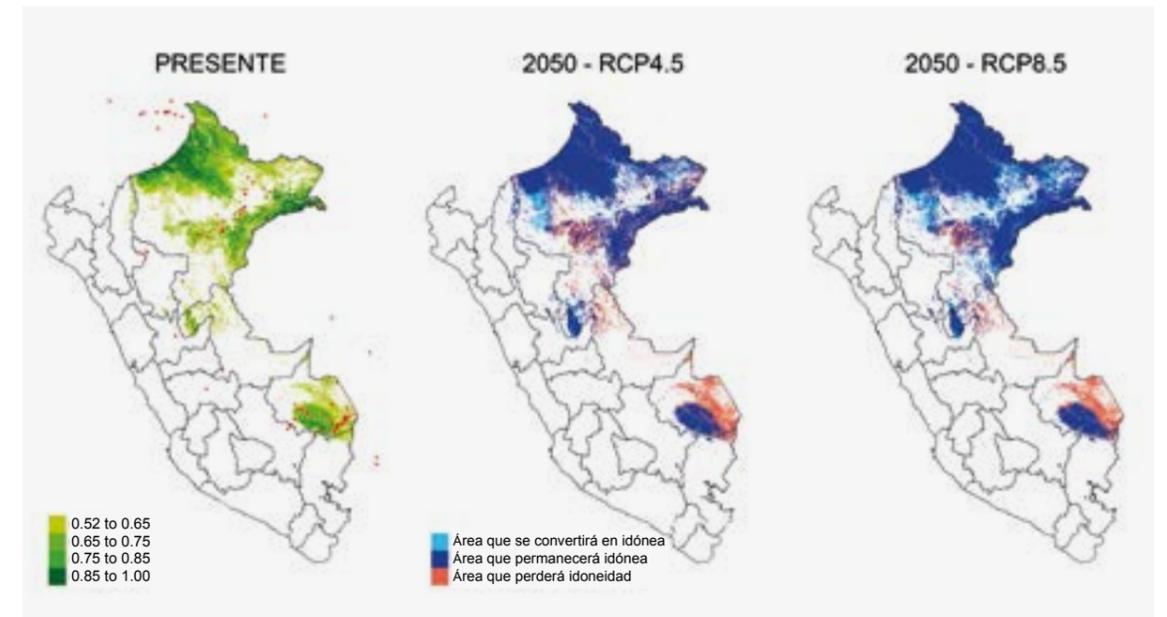
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 244924 km ² |
| Rango altitudinal | 63-1478 m |
| Rango de temperatura | 20.5-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1354-5478 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 80 % | 88 % |
| Área de expansión | +6 % | +14 % |
| Área de contracción | -20 % | -12 % |
| Cambio neto | -14 % | +2 % |



Morphnus guianensis

(Águila crestada)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| Nº puntos | 106 |
| AUC | 0.96 |
| cv-AUC | 0.70 |
| Algoritmos incluidos | GBM, Random Forest, GAMSTEP, MGCV, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO14: Precipitación en el período más seco, BIO4: Estacionalidad en temperatura, BIO18: Precipitación en el trimestre más caluroso |

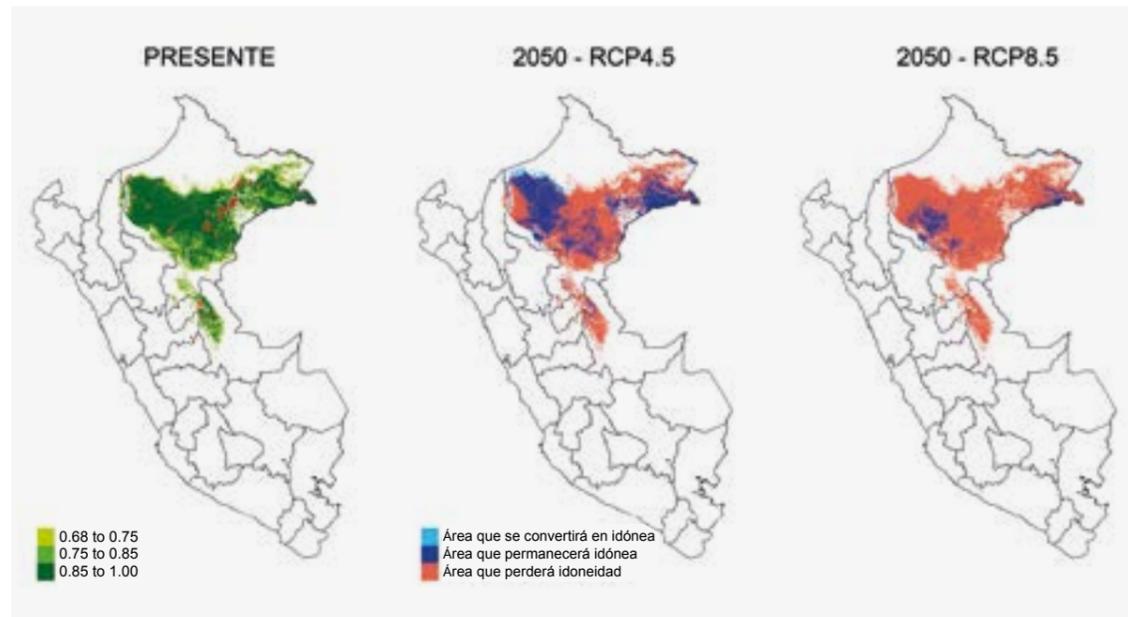
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 278937 km ² |
| Rango altitudinal | 63-1297 m |
| Rango de temperatura | 21.1-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1517-5593 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 80 % | 87 % |
| Área de expansión | +9 % | +17 % |
| Área de contracción | -20 % | -13 % |
| Cambio neto | -11 % | +4 % |



Myrmoborus melanurus

(Hormiguero de cola negra)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 95 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.97 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, RF, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, SVM |
| Tres variables más importantes | TRI: Índice de rugosidad del terreno, BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BIO15: Estacionalidad de la precipitación |

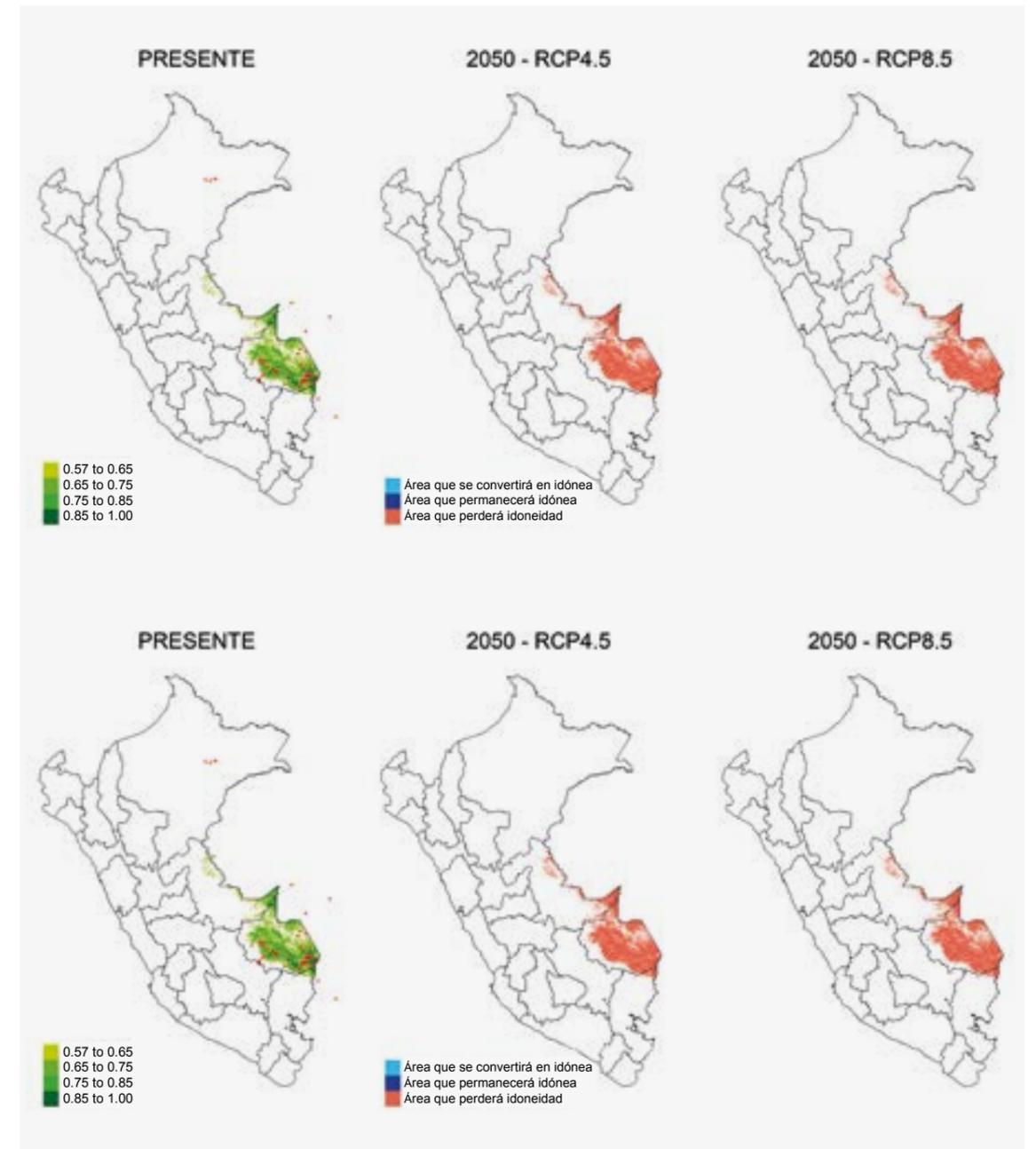
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 213969 km ² |
| Rango altitudinal | 62-288 m |
| Rango de temperatura | 25.6-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1353-4120 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 39 % | 11 % |
| Área de expansión | +2 % | +1 % |
| Área de contracción | -61 % | -89 % |
| Cambio neto | -59 % | -88 % |



Nannopsittaca dachillea

(Cotorra amazónica)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 86 |
| AUC | 0.91 |
| cv-AUC | 0.73 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, EARTH |
| Tres variables más importantes | BIO4: Estacionalidad en temperatura, TRI: Índice de rugosidad del terreno, BIO7: Rango anual de temperatura |

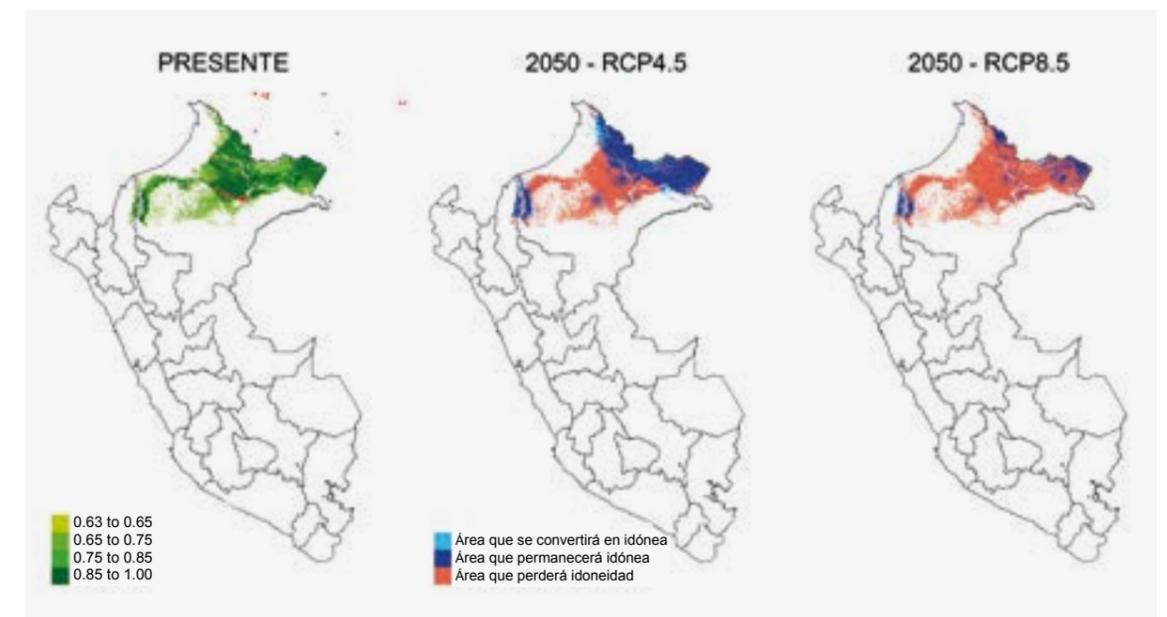
| PRESENTE | |
|------------------------|-----------------------|
| Total área idónea | 69051 km ² |
| Rango altitudinal | 153-619 m |
| Rango de temperatura | 23.9-26.4 °C |
| Rango de precipitación | 1627-4155 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 0 % | 0 % |
| Área de expansión | 0 % | 0 % |
| Área de contracción | -100 % | -100 % |
| Cambio neto | -100 % | -100 % |



Neopelma chrysocephalum

(Saltarín-tirano de cresta azafrán)



| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 64 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.86 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, GLMSTEP, GAMSTEP, SVM |
| Tres variables más importantes | Pendiente, BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BIO15: Estacionalidad de la precipitación |

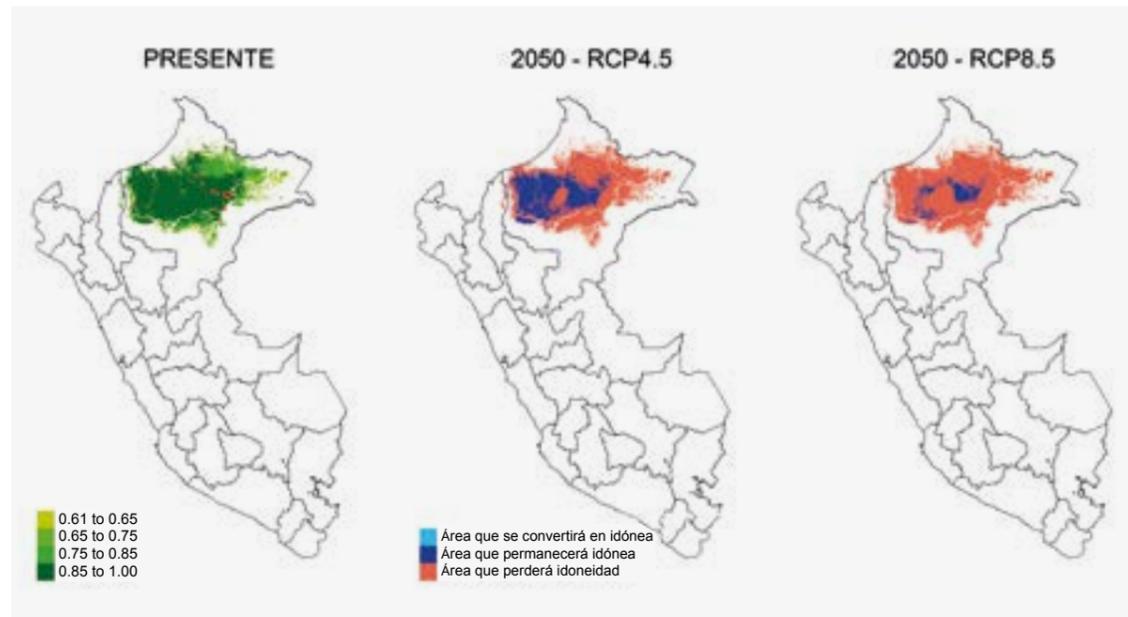
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 138916 km ² |
| Rango altitudinal | 64-452 m |
| Rango de temperatura | 25.4-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 2011-3434 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 49 % | 18 % |
| Área de expansión | +4 % | 0 % |
| Área de contracción | -51 % | -82 % |
| Cambio neto | -47 % | -82 % |



Percnostola arenarum

(Hormiguero de Allpahuayo)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 34 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.96 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, RF, GLMSTEP, MGCV, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, TRI: Índice de rugosidad del terreno, contenido de carbono orgánico |

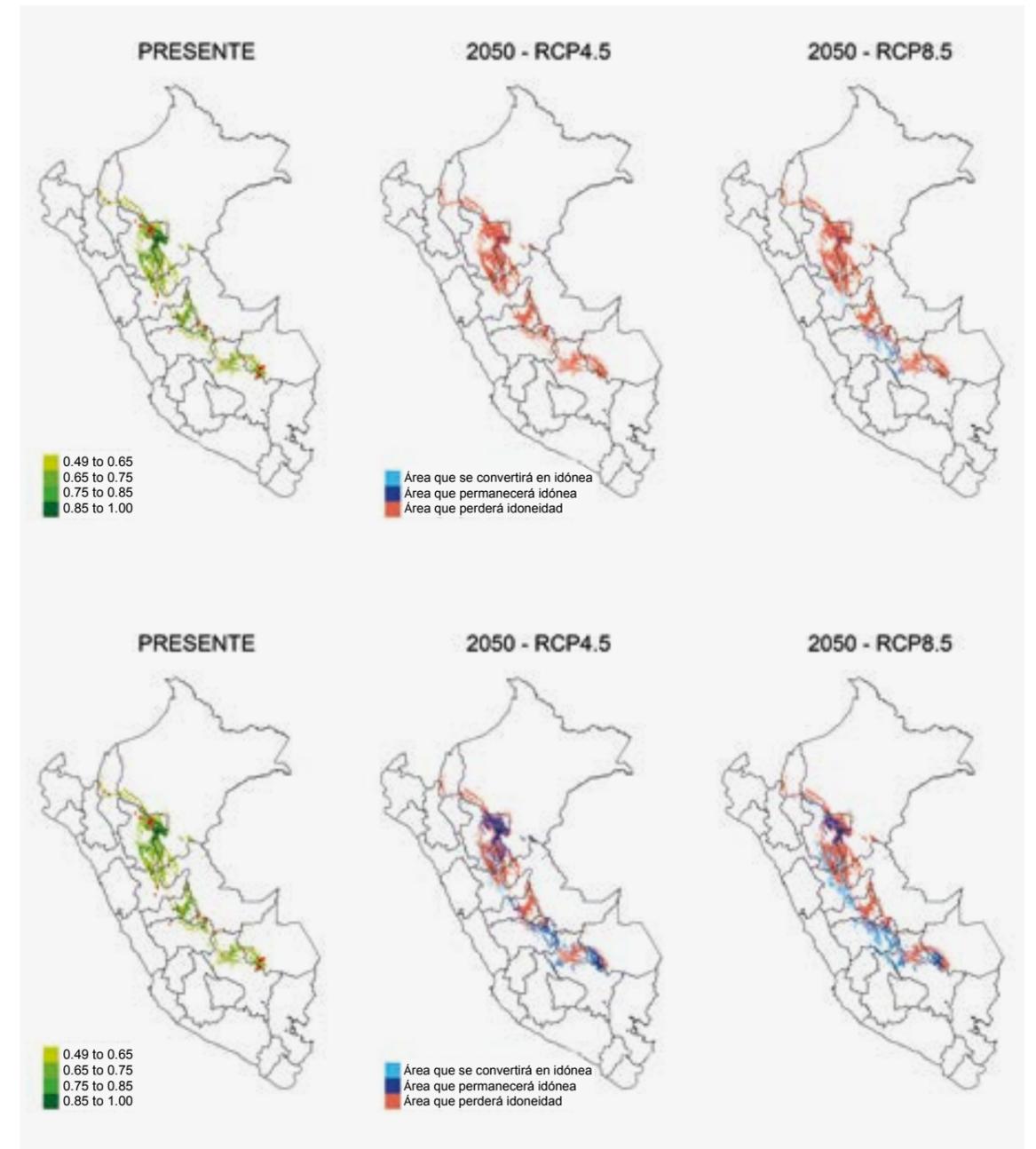
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 161027 km ² |
| Rango altitudinal | 75-305 m |
| Rango de temperatura | 25.3-27.2 °C |
| Rango de precipitación | 1923-3434 mm |

| | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 34 % | 10 % |
| Área de expansión | 0 % | 0 % |
| Área de contracción | -66 % | -90 % |
| Cambio neto | -66 % | -90 % |



Phaethornis koepckeae

(Ermitaño de Koepcke)

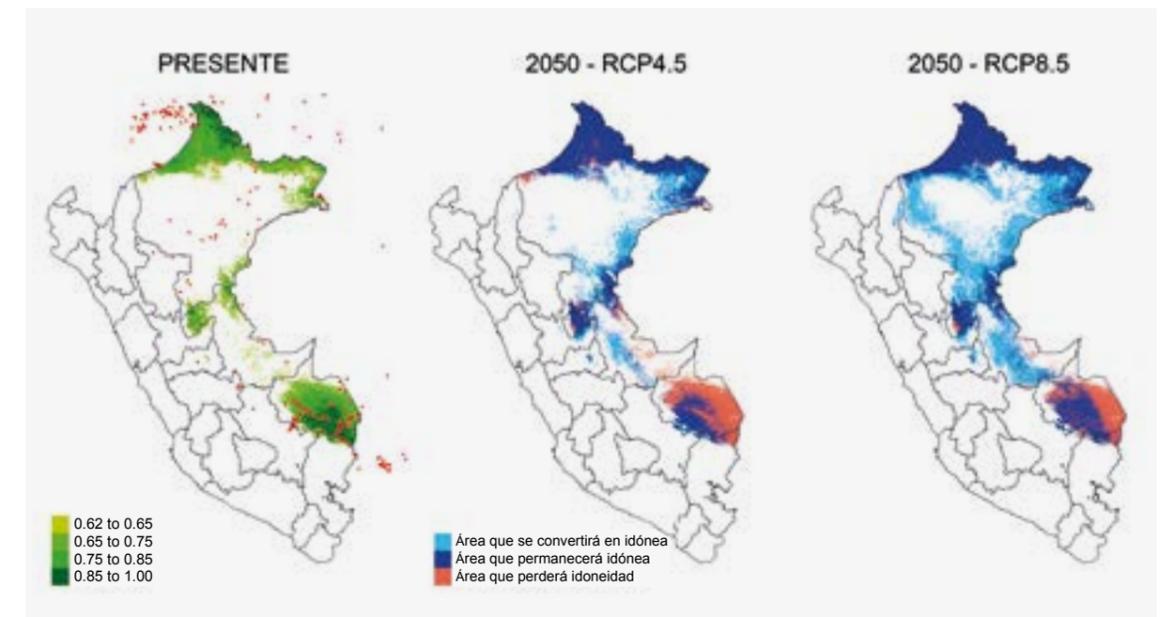


| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| Nº puntos | 84 |
| AUC | 0.90 |
| cv-AUC | 0.67 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, MGCV, EARTH, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO14: Precipitación en el período más seco, BIO18: Precipitación en el trimestre más caluroso, BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso |

| PRESENTE | |
|------------------------|-----------------------|
| Total área idónea | 64910 km ² |
| Rango altitudinal | 62-2410 m |
| Rango de temperatura | 17.1-26.9 °C |
| Rango de precipitación | 741-4843 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 3 % | 0 % |
| Área de expansión | 0 % | 0 % |
| Área de contracción | -97 % | -100 % |
| Cambio neto | -97 % | -100 % |

 **Pipile cumanensis**
(Guan de garganta azul)



| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| Nº puntos | 363 |
| AUC | 0.92 |
| cv-AUC | 0.80 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, Random Forest, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, EARTH, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO19: Precipitación en el trimestre más frío, BIO18: Precipitación en el trimestre más caluroso, BIO4: Estacionalidad en temperatura |

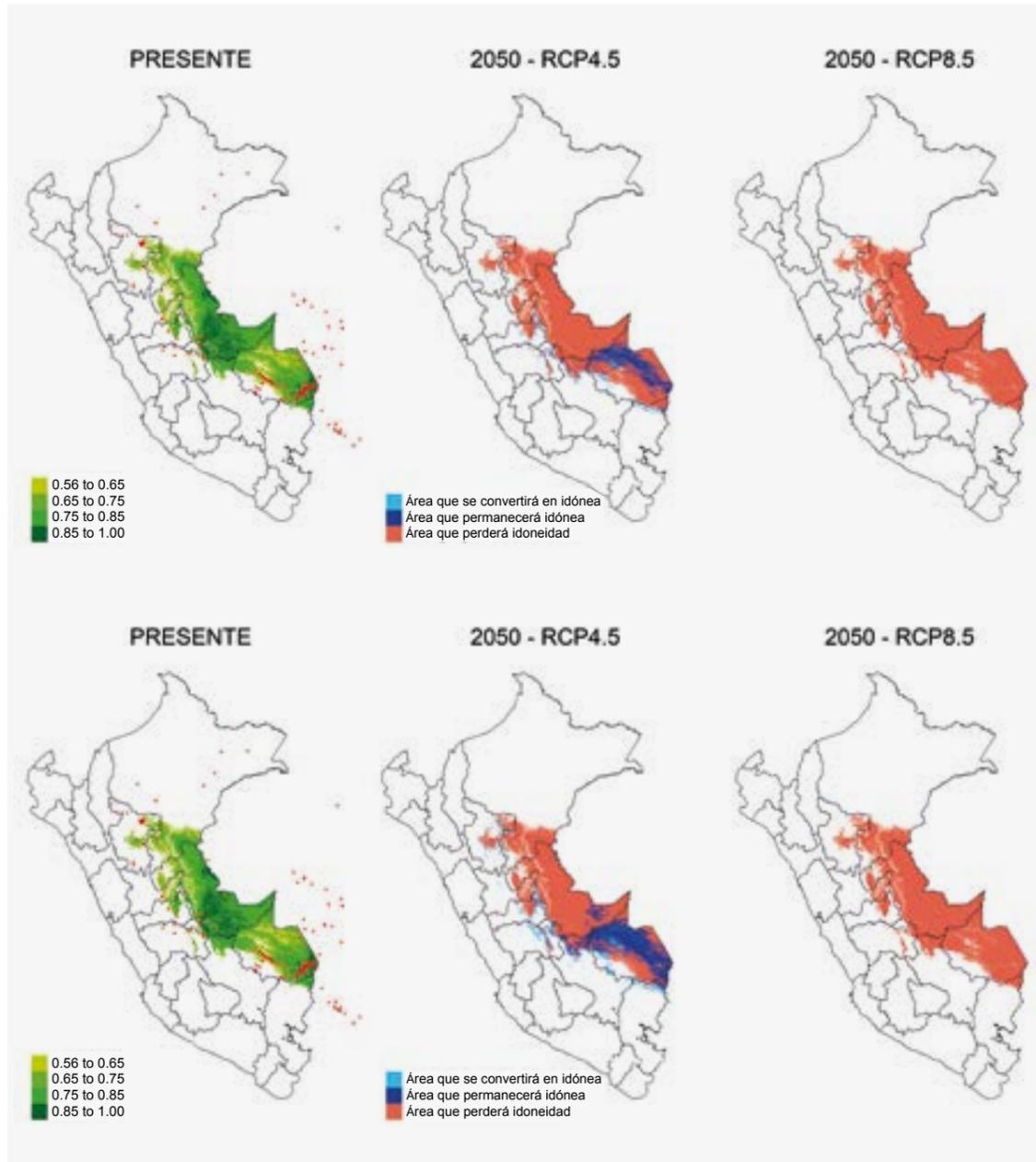
| PRESENTE | |
|------------------------|------------------------|
| Total área idónea | 199711 km ² |
| Rango altitudinal | 63-1003 m |
| Rango de temperatura | 22.1-27.1 °C |
| Rango de precipitación | 1666-5472 mm |

| FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | | |
|---------------------------|--------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Área estable | 73 % | 82 % |
| Área de expansión | +38 % | +89 % |
| Área de contracción | -27 % | -18 % |
| Cambio neto | +11 % | +71 % |



Pteroglossus beauharnaesii

(Aracari de cresta rizada)



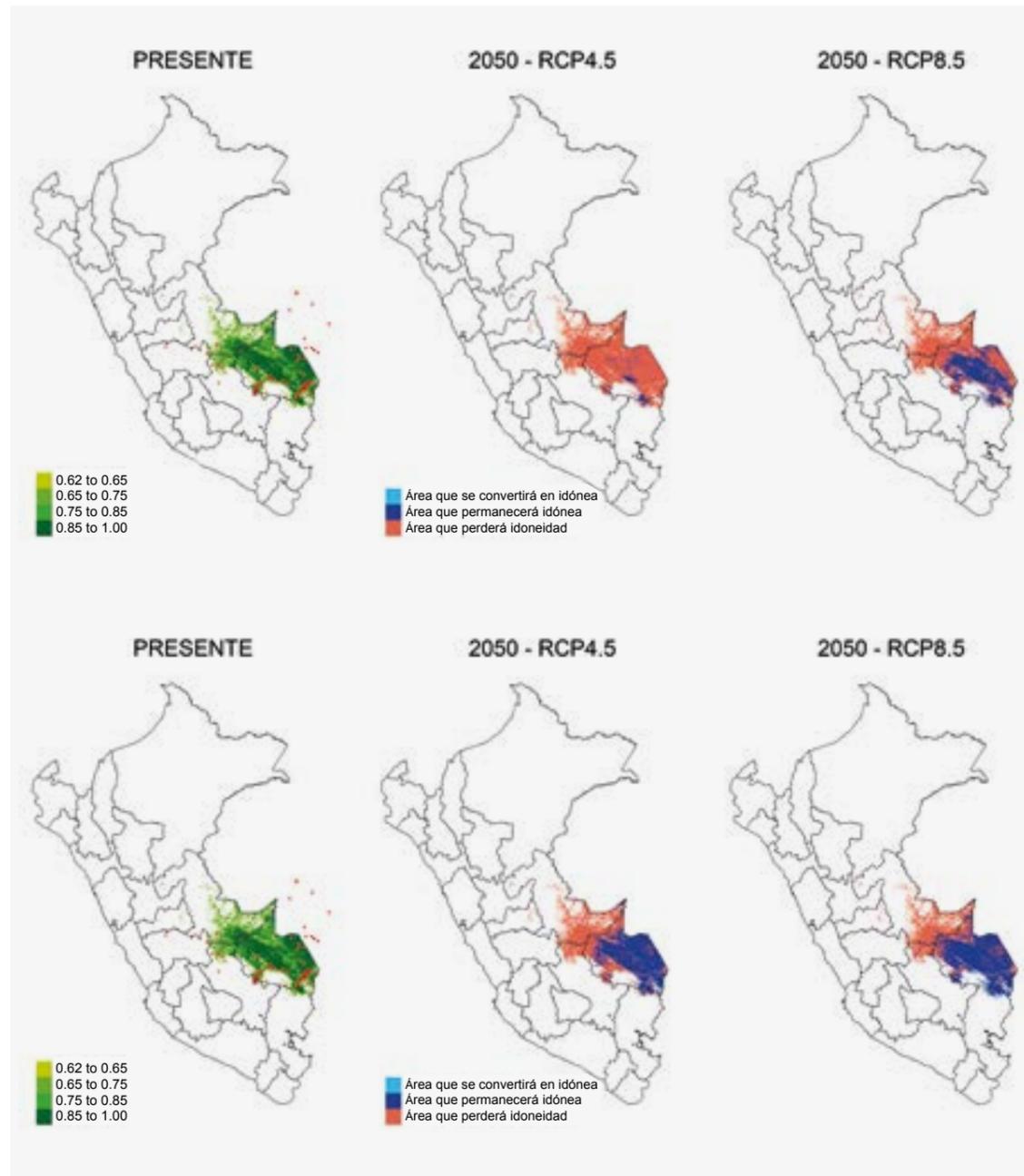
| MODELO | |
|--------------------------------|---|
| N° puntos | 222 |
| AUC | 0.91 |
| cv-AUC | 0.77 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, Random Forest, GAMSTEP, EARTH, FDA |
| Tres variables más importantes | BI08: Temperatura media en el trimestre más lluvioso, BI018: Precipitación en el trimestre más caluroso, TRI: Índice de rugosidad del terreno |

| PRESENTE | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 222673 km ² | |
| Rango altitudinal | 76-1070 m | |
| Rango de temperatura | 23.4-27 °C | |
| Rango de precipitación | 1076-5059 mm | |
| | Área estable | 14 % |
| | Área de expansión | +6 % |
| | Área de contracción | -86 % |
| | Cambio neto | -80 % |



Syndactyla ucayalae

(Pico recurvo peruano)



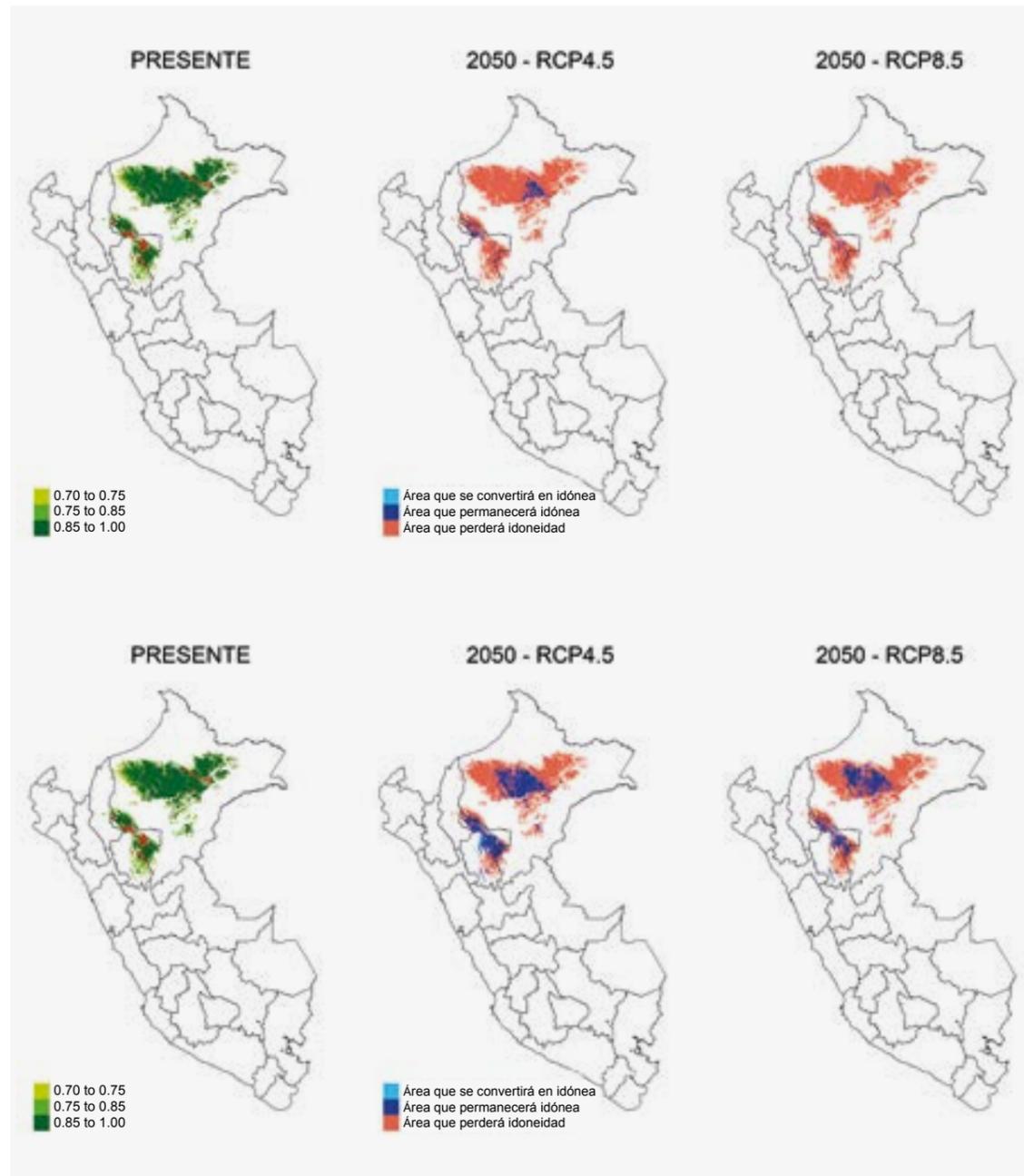
| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| N° puntos | 114 |
| AUC | 0.96 |
| cv-AUC | 0.89 |
| Algoritmos incluidos | Maxent, GBM, RF, GLMSTEP, GAMSTEP, MGCV, FDA, SVM |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío, contenido de limo |

| PRESENTE | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 116845 km ² | |
| Rango altitudinal | 142-1586 m | |
| Rango de temperatura | 19.8-26.5 °C | |
| Rango de precipitación | 1264-5367 mm | |
| | Área estable | 5 % |
| | Área de expansión | 0 % |
| | Área de contracción | -95 % |
| | Cambio neto | -95 % |



Zimmerius villarejoi

(Moscareta de Mishana)

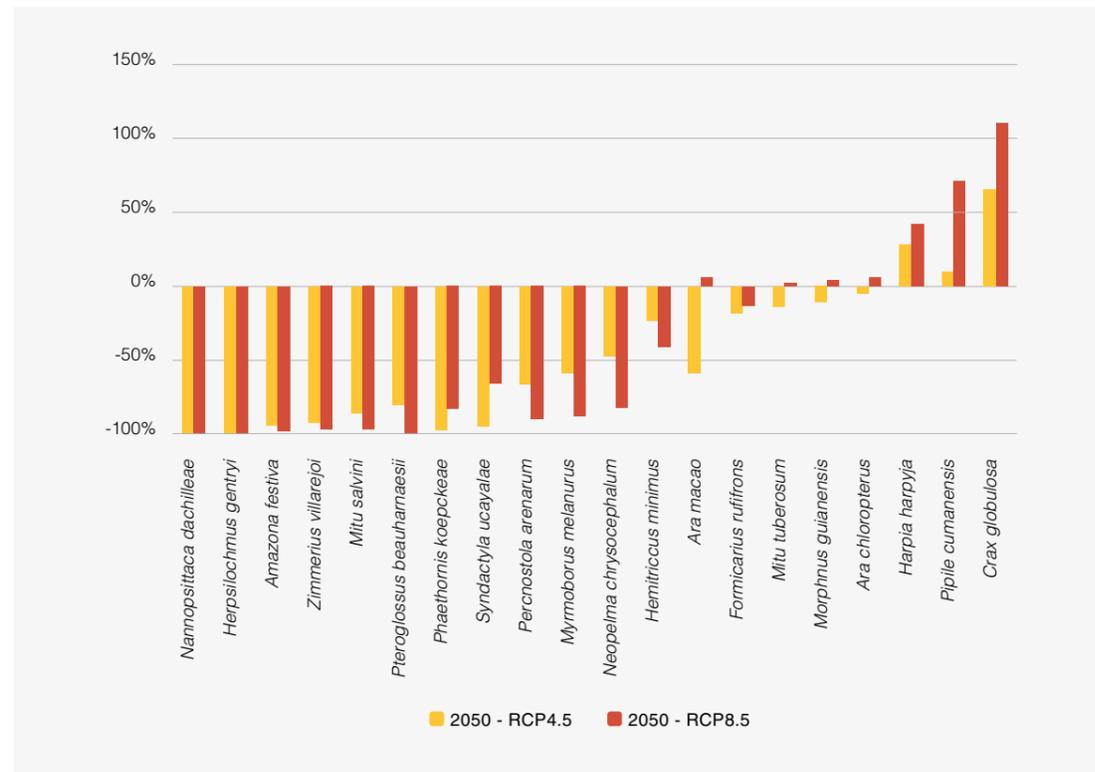


| MODELO | |
|--------------------------------|--|
| Nº puntos | 84 |
| AUC | 0.99 |
| cv-AUC | 0.91 |
| Algoritmos incluidos | GBM, RF, GLMSTEP, MGCV, GAMSTEP, MGCV, FDA |
| Tres variables más importantes | BIO15: Estacionalidad de la precipitación, BIO19: Precipitación en el trimestre más frío, BIO8: Temperatura media en el trimestre más lluvioso |

| PRESENTE | FUTURO – CAMBIO CLIMÁTICO | |
|------------------------|---------------------------|--------|
| | RCP4.5 | RCP8.5 |
| Total área idónea | 115280 km ² | |
| Rango altitudinal | 62-1741 m | |
| Rango de temperatura | 18.7-27.2 °C | |
| Rango de precipitación | 1000-3386 mm | |
| | Área estable | 9 % |
| | Área de expansión | 0 % |
| | Área de contracción | -92 % |
| | Cambio neto | -92 % |

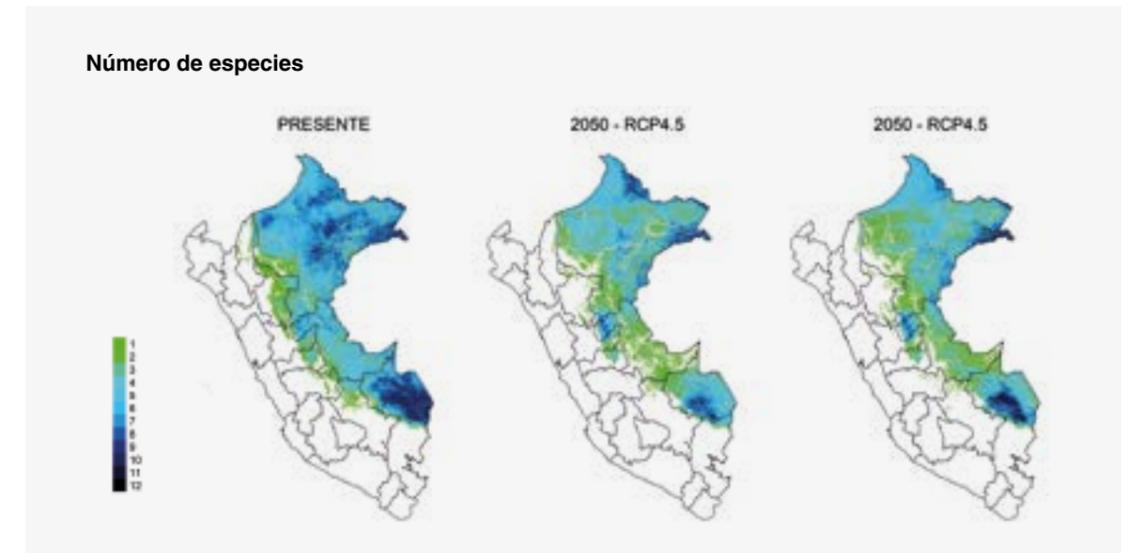
3 SÍNTESIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS 20 ESPECIES

CAMBIO NETO DE ÁREA IDÓNEA EN LAS 20 ESPECIES



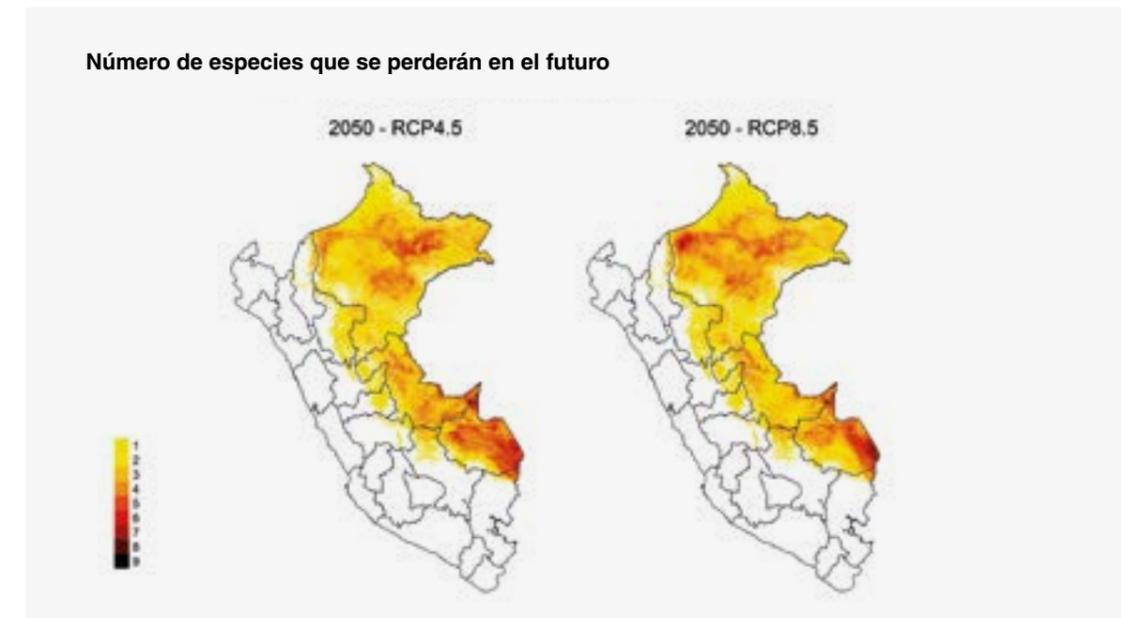
El cambio neto de área idónea a consecuencia del cambio climático varía entre las especies, observándose impactos netos negativos y positivos. Los cambios netos dentro de cada especie son bastante consistentes para los dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), con excepción de la especie *Ara macao*. Los modelos predicen que 14 de las 20 especies podrían experimentar una contracción del área idónea, de las cuales 11 especies perderán más de 50 % del área idónea. Cuatro especies tienen cambio negativo bajo el escenario RCP4.5 y cambio positivo bajo el escenario RCP8.5; mientras se predice que tres especies podrían expandir sus áreas idóneas en el futuro.

MAPA DE LA PÉRDIDA DE ESPECIES



En la actualidad existen 2 áreas de alta idoneidad (color azul oscuro), es decir, con presencia de hasta 12 de las 20 especies modeladas.

Las áreas están ubicadas en Loreto y Madre de Dios, y bajo los dos escenarios de emisiones futuras perderán idoneidad. Para por lo menos 6 de las 12 especies.



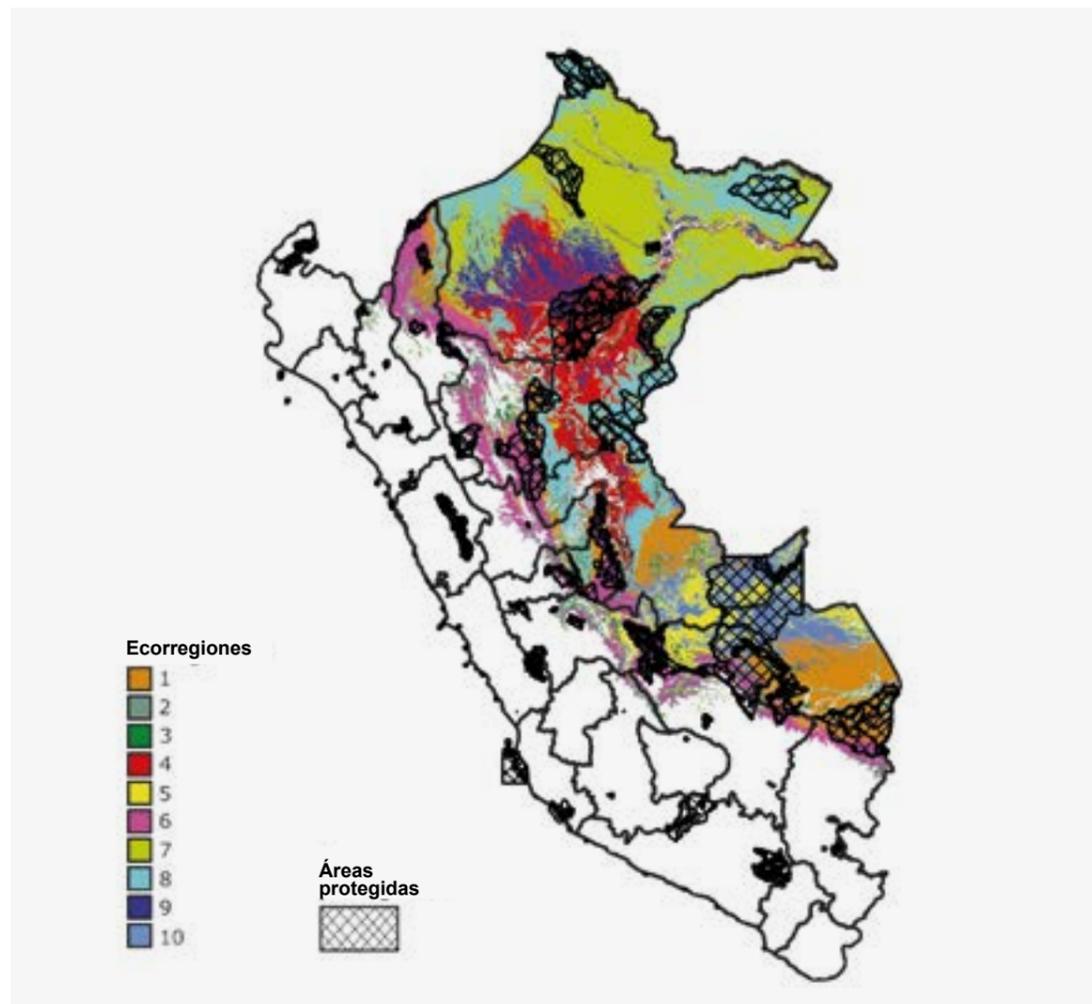
En la mayor parte de la Amazonía peruana se reporta que entre 1 a 5 especies podrían perder idoneidad en ambos escenarios. Las áreas más afectadas por el cambio climático son el centro de Loreto y la región Madre de Dios, donde se perderían hasta 9 de las 20 especies.

SUGERENCIA PARA ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN

Con el fin de mantener la diversidad genética, es fundamental que se conserven poblaciones representativas en cada una de las ecorregiones donde se reportan las especies, este concepto es válido tanto en el presente como en el futuro, visto que estas poblaciones pueden tener diferentes niveles de adaptación y por ende tener una composición genética divergente.

Para este análisis se utilizó el Mapa de las ecorregiones florísticas de la Amazonía Peruana (Chaves et al., 2020) y el Mapa de las Áreas Naturales Protegidas del Perú. Actualmente la mayoría de las ecorregiones amazónicas están suficientemente cubiertas por áreas protegidas y por lo tanto conservan las poblaciones locales de aves. A excepción de la ecorregión 6 (pre cordillera andina), donde las poblaciones de hasta 5 especies no están incluidas en áreas protegidas.

Sin embargo, la situación podría cambiar en el futuro debido a la contracción de las distribuciones idóneas, que cambiarían para hasta 5 de las 20 especies. El cambio sería especialmente drástico en la ecorregión 2 (bajos Andes). La especie más amenazada sería *Mitu salvini*, ya que 4 de sus 7 poblaciones no estarían incluidas en áreas protegidas.



| (*) | PRESENTE | | | FUTURO | | |
|-----|-------------|--|---|-------------|--|---|
| | Nº especies | Especies que están incluidas en áreas naturales protegidas | Especies que NO están incluidas en áreas naturales protegidas | Nº especies | Especies que están incluidas en áreas naturales protegidas | Especies que NO están incluidas en áreas naturales protegidas |
| 1 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | <i>Amazona festiva, Myrmoborus melanurus</i> | 14 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Neopelma chrysocephalum, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Crax globulosa, Mitu salvini</i> |
| 2 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | <i>Mitu salvini</i> | 17 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae</i> | <i>Amazona festiva, Mitu salvini, Neopelma chrysocephalum, Percnostola arenarum, Zimmerius villarejoi</i> |
| 3 | 20 | <i>Amazona festiva, Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu salvini, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Nannopsittaca dachilleae, Neopelma chrysocephalum, Percnostola arenarum, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Pteroglossus beauharnaesii, Zimmerius villarejoi</i> | | 16 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Neopelma chrysocephalum, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Mitu salvini, Myrmoborus melanurus, Percnostola arenarum</i> |
| 4 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | | 16 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Neopelma chrysocephalum, Pipile cumanensis, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Amazona festiva, Mitu salvini, Percnostola arenarum, Syndactyla ucayalae</i> |
| 5 | 18 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | | 13 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Zimmerius villarejoi</i> |
| 6 | 18 | <i>Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Formicarius rufifrons, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | <i>Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Nannopsittaca dachilleae, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi</i> | 12 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Hemitriccus minimus, Neopelma chrysocephalum</i> |
| 7 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | | 17 | <i>Amazona festiva, Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu salvini, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Neopelma chrysocephalum, Percnostola arenarum, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae</i> | <i>Zimmerius villarejoi</i> |
| 8 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Formicarius rufifrons, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | | 17 | <i>Amazona festiva, Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu salvini, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Neopelma chrysocephalum, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae</i> | <i>Percnostola arenarum, Zimmerius villarejoi</i> |
| 9 | 20 | <i>Ara macao, Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Harpia harpyja, Morphnus guianensis, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Myrmoborus melanurus, Zimmerius villarejoi, Phaethornis koepckeae, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Percnostola arenarum</i> | <i>Formicarius rufifrons, Neopelma chrysocephalum, Crax globulosa</i> | 16 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Harpia harpyja, Hemitriccus minimus, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Myrmoborus melanurus, Neopelma chrysocephalum, Percnostola arenarum, Pipile cumanensis, Zimmerius villarejoi</i> | <i>Amazona festiva, Formicarius rufifrons, Mitu salvini, Syndactyla ucayalae</i> |
| 10 | 16 | <i>Ara chloropterus, Pipile cumanensis, Amazona festiva, Mitu tuberosum, Pteroglossus beauharnaesii, Syndactyla ucayalae, Nannopsittaca dachilleae, Formicarius rufifrons, Neopelma chrysocephalum, Hemitriccus minimus, Herpsilochmus gentry, Crax globulosa, Percnostola arenarum</i> | <i>Harpia harpyja, Mitu salvini, Myrmoborus melanurus</i> | 11 | <i>Ara chloropterus, Ara macao, Crax globulosa, Formicarius rufifrons, Harpia harpyja, Mitu tuberosum, Morphnus guianensis, Phaethornis koepckeae, Pipile cumanensis, Syndactyla ucayalae</i> | <i>Zimmerius villarejoi</i> |

ANEXO 1: METODOLOGÍA

1. SELECCIÓN DE ESPECIES

Se colectaron los puntos de presencia de todas las especies aves en la Amazonía Peruana, según eBird/Clements 'Checklist of Birds of the World' (Clements et al., 2019). Los puntos de presencia fueron obtenidos de las siguientes bases: GBIF (Global Biodiversity Information Facility; www.gbif.org), BIEN (Botanical Information and Ecology Network; <http://biendata.org/>), Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR, y ebird (<https://ebird.org/home>). Cabe señalar que, aunque solo se realizó el modelamiento de la distribución para un subconjunto de estas especies, se utilizaron los puntos de presencia de todas las especies como insumo para el modelamiento en la selección de variables.

Luego de coleccionar los datos, se procedió con la selección de las especies para el modelamiento de acuerdo a los siguientes criterios: (i) que las especies estén amenazadas según el Libro Rojo de la Fauna Silvestre Amenazada del Perú (SERFOR, 2018), (ii) que existan como mínimo 15 puntos de presencia en resolución 10 arcmin, y (iii) que por lo menos la mitad de los puntos de presencia se encuentren ubicados en la Amazonía. Los ecosistemas de la Amazonía fueron definidos en función al mapa de ecoregiones terrestres de Olson (Olson & Dinerstein, 2002). Consecuentemente, 20 especies cumplieron con estos criterios y fueron utilizadas para el modelamiento.

2. VARIABLES AMBIENTALES

Para el modelamiento se utilizaron 35 variables ambientales: 21 variables climáticas, 9 variables de suelo y 5 variables de terreno o fisiográficas. Las 19 variables bioclimáticas se obtuvieron de la base de datos WorldClim – Global Climate Data, las variables de evapotranspiración potencial anual e índice de aridez, fueron calculadas a través de los datos bioclimáticos, las variables de suelo se obtuvieron de SoilGrids – ISRIC World Soil Information, mientras que las variables de terreno corresponden a la variación de altitud; analizadas mediante el paquete *raster* en el programa R.

3. MODELAMIENTO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Selección de variables ambientales para eliminar la colinealidad

Las variables colineales pueden confundir los algoritmos que modelan los nichos ecológicos, y por esto se requiere seleccionar un sub grupo de variables no colineales para la modelación. Las variables colineales se eliminaron con base a cálculos escalonados de los factores de inflación de varianza (VIF por sus siglas en inglés), reteniendo solamente variables con un VIF menor a 5. Debido a que la colinealidad entre las variables puede cambiar tanto en fuerza como en dirección, y en condiciones climáticas presentes como futuras, el análisis de colinealidad se llevó a cabo para ambas condiciones, reteniéndose solo las variables con un VIF menor que 5 (Braunisch et al., 2013).

Filtración de los puntos de presencia para reducir el efecto del sesgo espacial

El sesgo espacial de muestreo de los puntos de presencia puede reducir el desempeño de los modelos, por ello, se filtraron los puntos de presencia utilizando el método de filtración ambiental descrito por Varela et al. (2014).

Para este método de filtración, se retiene aleatoriamente un punto para cada celda multidimensional constituida por las variables ambientales. Tanto la dimensión de la celda, así como los componentes principales, fueron definidos para cada especie.

Selección de los puntos de pseudo-ausencia

Los puntos de pseudo-ausencia se seleccionaron de acuerdo al método de *target group* descrito por Phillip et al., 2009 y Mateo et al., 2010. El método implica la selección de puntos dentro de las celdas de cuadrícula de especies que pertenecen a un grupo similar a las modeladas, estas ubicaciones reflejan un sesgo similar al sesgo de muestreo de las especies modeladas, reduciendo de esta manera los efectos de los puntos de presencia espacialmente sesgados en la calibración del modelo. Para el método de *target group* se utilizan todos los puntos de presencia de todas las aves de eBird / Clements checklists.

Como los parámetros de precisión del modelo se inflan fácilmente al extender el rango geográfico, los puntos de pseudo-ausencia se seleccionan con base al área delimitada por un polígono de cápsula convexa (*convex hull*) que se crea alrededor de todos los puntos de presencia, esta cápsula se extiende en una zona de influencia (buffer) correspondiente al 10 % del eje más grande del polígono (Acevedo et al., 2012).

Como varias especies incluían parte de los Andes en el área de la cápsula convexa, se restringió a áreas por debajo de los 2500 msnm. Lo cual permitió mejorar la capacidad de los modelos para distinguir con precisión entre puntos de presencia y ausencia en altitudes más bajas.

Modelamiento de nichos ecológicos

La modelación de los nichos para las especies estudiadas se realizó utilizando hasta 9 algoritmos, mediante el uso de BiodiversityR (Kindt, 2018). Los algoritmos considerados son:

- » Algoritmo de entropía máxima (MAXENT)
- » Random forest (RF)
- » Modelos de regresión potenciada generalizada (GBM)
- » Modelos lineales generalizados (GLMSTEP)
- » Modelos aditivos generalizados (GAMSTEP, MGCV)
- » Análisis discriminante flexible (FDA)
- » Soporte de máquinas de vectores (SVM)
- » Splines de regresión adaptativa multivariante (EARTH)

Los algoritmos se validan de forma cruzada utilizando bloques espaciales con el paquete blockCV para R (Valavi et al., 2019), según la metodología descrita por Fremout et al. (2020). Los pesos de los algoritmos en cada uno de los modelos de ensamble se optimizaron utilizando la función *ensemble.tune* del paquete BiodiversityR, que maximiza el valor AUC de los ensambles optimizando los pesos de los diferentes algoritmos mediante un procedimiento factorial (Kindt, 2018).

Los ensambles se calibraron nuevamente utilizando todos los puntos de presencia y pseudo-ausencia; las predicciones finales de idoneidad del ensamble se hacen utilizando los pesos equivalentes previamente optimizados. Los modelos son evaluados a través de los parámetros de AUC y cv AUC. El AUC indica cuánto de la distribución obtenida corresponde a los puntos de presencia, mientras que el cv AUC indica la capacidad del modelo de predecir presencia en áreas donde no fue calibrado, y por lo tanto indica cuán confiable es para las proyecciones futuras.

Proyecciones futuras por impacto del cambio climático

Una vez calibrado el modelo mediante los puntos de presencia y las variables ambientales, obtenemos la modelación del cambio climático en las proyecciones, utilizando los escenarios futuros.

Para las proyecciones futuras se considera el horizonte temporal 2040-2069 y 2 escenarios de emisión (denominado Representative Concentration Pathways, RCP por sus siglas en inglés) RCP4.5 y RCP8.5. El RCP4.5 hace referencia a un escenario de estabilización, teniendo en cuenta la disminución de emisiones según lo establecido en el Acuerdo de París (Tribett et al., 2017); mientras que el RCP8.5 es el escenario más pesimista.

Las condiciones climáticas futuras se caracterizaron mediante el uso de cinco modelos de circulación general (GCM) de cambio climático obtenidos del Portal de Cambio de la CCAFS (Ramírez Villegas & Jarvis, 2010): CESM1 (CAM5), GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MIROC5 y MPI-ESM-LR.

Se considera que la especie modelada mantendrá la idoneidad a futuro en las áreas donde al menos 4 de los 5 modelos climáticos identifican idoneidad para la especie. Finalmente se define un umbral de MCG que proyecta el área que permanecerá idónea a futuro.

El modelo permite comparar la distribución futura con la distribución presente, identificando las áreas que permanecerán idóneas y aquellas que perderán idoneidad. Cada modelo produce una distribución futura diferente, existiendo un margen de incertidumbre que es necesario considerar.

Debemos tener en cuenta que las proyecciones futuras de idoneidad solo se refieren a las condiciones ambientales (cambio climático) y no abarcan las demás condiciones a las que estarían expuestas la especies, tales como interacciones bióticas con otros organismos (plagas, competencia, etc.), amenazas como la deforestación y sobre explotación, y la capacidad de dispersión.

Bibliografía

- Acevedo, P., Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M., Real, R., 2012. Delimiting the geographical background in species distribution modelling. *Journal of Biogeography* 39, 1383-1390, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2012.02713.x>.
- Brako, L., Zarucchi, J.L., 1993. Catalogue of the flowering plants and gymnosperms of Peru: Catálogo de las angiospermas y gimnospermas del Perú. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 45, 1-1286. Downloaded from <http://legacy.tropicos.org/ProjectAdvSearch.aspx?projectid=5>.
- Braunisch, V., Coppes, J., Arlettaz, R., Suchant, R., Schmid, H., Bollmann, K., 2013. Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography* 36, 971-983, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00138.x>.
- Chaves, P.P., Zuquim, G., Ruokolainen, K., Kalliola, R., Rivero, E.G., Tuomisto, H., 2020. Mapping Floristic Patterns of Trees in Peruvian Amazonia Using Remote Sensing and Machine Learning. *Remote Sensing* 12, 1523.
- Clements, J., Schulenberg, T., Iliff, M., Billerman, S., Fredericks, T., Sullivan, B., Wood, C., 2019. The eBird/Clements Checklist of Birds of the World: v2019. Downloaded from <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>
- Decreto Supremo N° 043-2006-AG, 2006. Aprueban categorización de especies amenazadas de flora silvestre. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Peru, Retrieved from <https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/NAT-3-3-03-DS-043-2006-AG.pdf>.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36, 27-46, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>.
- Fremout, T., Thomas, E., Gaisberger, H., Van Meerbeek, K., Muenchow, J., Briers, S., Gutierrez-Miranda, C.E., Marcelo-Peña, J.L., Kindt, R., Atkinson, R., 2020. Mapping tree species vulnerability to multiple threats as a guide to restoration and conservation of tropical dry forests. *Global Change Biology* 26, 3552-3568, <https://doi.org/10.1111/gcb.15028>.
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J.M., 2007. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica* 31, 361-369, <https://doi.org/10.1016/j.actao.2007.02.001>.
- Kindt, R., 2018. Ensemble species distribution modelling with transformed suitability values. *Environmental Modelling & Software* 100, 136-145, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.009>.
- Knutti, R., Masson, D., Gettelman, A., 2013. Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophysical Research Letters* 40, 1194-1199, <https://doi.org/10.1002/grl.50256>.
- Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A., Real, R., 2008. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 17, 145-151, <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>.

- Mateo, R.G., Croat, T.B., Felicísimo, Á.M., Muñoz, J., 2010. Profile or group discriminative techniques? Generating reliable species distribution models using pseudo-absences and target-group absences from natural history collections. *Diversity and Distributions* 16, 84-94, <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2009.00617.x>.
- Muscarella, R., Galante, P.J., Soley-Guardia, M., Boria, R.A., Kass, J.M., Uriarte, M., Anderson, R.P., 2014. ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution* 5, 1198-1205, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., 2002. The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 199-224, Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/3298564>.
- Phillips, S.J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C.H., Lehmann, A., Leathwick, J., Ferrier, S., 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications* 19, 181-197, <https://doi.org/10.1890/07-2153.1>.
- Ramírez Villegas, J., Jarvis, A., 2010. Downscaling global circulation model outputs: the delta method decision and policy analysis Working Paper No. 1.
- Schlaepfer, D.R., Bradford, J.B., Lauenroth, W.K., Munson, S.M., Tietjen, B., Hall, S.A., Wilson, S.D., Duniway, M.C., Jia, G., Pyke, D.A., 2017. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils. *Nature Communications* 8, 14196, <https://doi.org/10.1038/ncomms14196>.
- SERFOR, 2018. Libro Rojo de la Fauna Silvestre Amenazada del Perú. SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre), Lima, p. 548.
- Tribett, W., Salawitch, R., Hope, A., Canty, T., Bennett, B., 2017. Paris INDCs (Ch. 3). Paris climate agreement: Beacon of hope. Springer International Publishing.
- Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., Guillera-Arroita, G., 2019. block CV: An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution* 10, 225-232, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13107>.
- Varela, S., Anderson, R.P., García-Valdés, R., Fernández-González, F., 2014. Environmental filters reduce the effects of sampling bias and improve predictions of ecological niche models. *Ecography* 37, 1084-1091, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00441.x>.
- Wenger, S.J., Olden, J.D., 2012. Assessing transferability of ecological models: an underappreciated aspect of statistical validation. *Methods in Ecology and Evolution* 3, 260-267, <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00170.x>.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre
Av. Javier Prado Oeste N° 2442, Urb. Oarrantia,
Magdalena del Mar - Lima
T. (511) 225 9005
www.gob.pe/serfor
www.gob.pe/midagri

