



Ministerio
del **Ambiente**

Escenarios de impacto
del cambio climático
sobre la biodiversidad en
el Ecuador continental
y sus implicaciones en el Sistema Nacional
de Áreas Protegidas



Escenarios de impacto
del cambio climático
sobre la biodiversidad en
el Ecuador continental

y sus implicaciones en el Sistema
Nacional de Áreas Protegidas

Francisco Cuesta C.
Andrés Merino-Viteri
Priscilla Muriel
Francis Baquero
Juan F. Freile
Omar Torres
Manuel Peralvo





Ministerio del Ambiente del Ecuador

Calle Madrid 1159 y Andalucía
Código Postal: 170517 / Quito – Ecuador
Tel. 593-2 398-7600
www.ambiente.gob.ec

Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina - CONDESAN

Oficina en Lima-Perú:	Oficina en Quito-Ecuador:
Av. La Molina 1895	Germán Alemán E12-123
Lima 12	y Carlos Arroyo del Río
Tel. +51 1 618 9400	Tel. +593 2 2248491
condesan@condesan.org	
www.condesan.org	

Escuela de Ciencias Biológicas- Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE)

Av. 12 de Octubre 1076 y Roca
Quito, Ecuador
Tel. +593 2 299 17 00
webmaster@puce.edu.ec

Con el apoyo de:

Cooperación Alemana, implementada por la GIZ

Proyecto “Iniciativa Trinacional: Fortalecimiento de los Sistemas Nacionales de Áreas Naturales Protegidas en Colombia, Ecuador y Perú” (IT)
Av. Los Incas 172, piso 6, El Olivar, San Isidro
Lima 27, Perú
Tel. +51 1 4420 888
www.giz.de www.itiniciativatrinacional.info

Revisión técnica:

Ministerio del Ambiente del Ecuador:

- ✿ Lorena Tapia, Ministra de Ambiente
- ✿ Subsecretaría de Cambio Climático:
Andrés Hubenthal, Alexandra Olivo y María José Galarza
- ✿ Subsecretaría de Patrimonio Natural:
Christian Terán, Francisco Prieto, David Veintimilla y Marcela Torres.

GIZ:

- ✿ David Suárez-Duque

Edición general:

Andrés Merino-Viteri², Priscilla Muriel², Francisco Cuesta C.¹, Gabriela Maldonado²

- 1 Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (Condesan)
- 2 Escuela de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Foto de portada:

Murray Cooper

Diseño y diagramación:

Verónica Ávila Diseño Editorial

Cítese como:

Cuesta, F., Merino-Viteri, A., Muriel, P., Baquero, F., Freile, J., Torres, O., Peralvo, M. 2015. Escenarios de impacto del cambio climático sobre la biodiversidad del Ecuador continental y sus implicaciones en el sistema nacional de áreas protegidas. Ministerio de Ambiente del Ecuador. CONDESAN. Escuela de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.

Fuentes de información temática:

Los mapas de distribución presente de las especies de flora y fauna utilizados en este estudio fueron producidos en el marco del Estudio Identificación de Vacíos y Prioridades de Conservación en el Ecuador Continental – IVPC (CONDESAN, PUCE, MAE; GIZ). Los mapas potenciales futuros de las mismas fueron elaborados utilizando la siguiente información:

- ✿ Bases de datos del Museo QCAZ y Herbario QCA, Escuela de Biología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador
- ✿ Bases de datos de aves y plantas (Juan Fernando Freile)
- ✿ Bases de datos de biodiversidad (Francisco Cuesta – CONDESAN)

La validación de la distribución presente de las especies estuvo a cargo de: Juan Fernando Freile (Aves), Andrés Merino-Viteri (Anfibios), Priscilla Muriel (Angiospermas y Helechos) y Omar Torres (Reptiles).

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo de la Cooperación Alemana al Desarrollo implementada por la GIZ, a través de su Proyecto “Iniciativa Trinacional: Fortalecimiento de los Sistemas Nacionales de Áreas Naturales Protegidas en Colombia, Ecuador y Perú” (IT).

Contenido

Presentación / pág. **9**

Lista de acrónimos / pág. **10**

Literatura citada / pág. **76**

Resumen / pág. **11**

Antecedentes / pág. **16**

Introducción / pág. **19**

Métodos / pág. **23**

Paso 1: Consolidación de las variables ambientales y biológicas / pág. **25**

Variables climáticas para el período actual (1960-2000) / pág. 25

Variables climáticas futuras (2050) / pág. 29

Base de datos de registros de especies / pág. 32

Paso 2: Modelos de la distribución potencial presente y futura de las especies / pág. **34**

Paso 3: Análisis de sensibilidad climática / pág. **37**

Resultados / pág. **43**

Modelos de nicho / pág. **44**

Sensibilidad de especies al cambio climático / pág. **45**

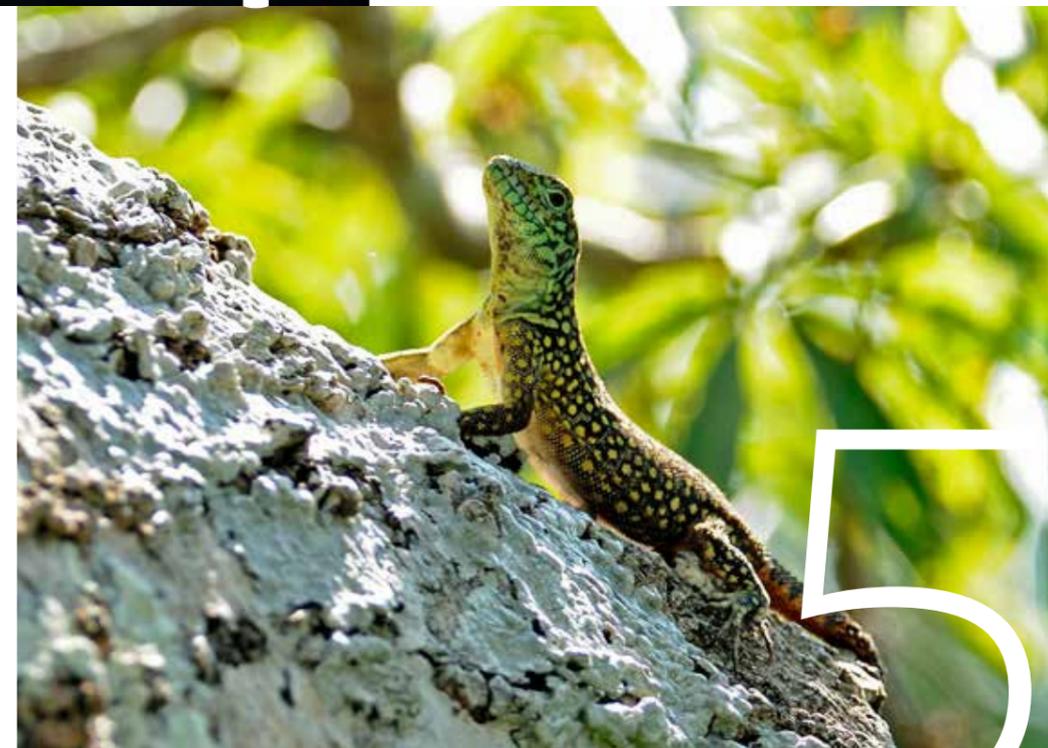
Cambio en los patrones de diversidad en el Ecuador continental / pág. 49

Discusión / pág. **65**

Implicaciones sobre la biodiversidad (aspectos biológicos) / pág. **66**

Implicaciones para el manejo del PANE / pág. **67**

Limitaciones del ejercicio / pág. **72**





Presentación



El clima de la Tierra cambia, pero ahora parece que lo hace de manera más rápida. Las variaciones planetarias del clima tienen causas naturales y también se generan por la acción de los seres humanos; estas se producen a diversas escalas de tiempo y afectan a la temperatura, la lluvia, la nubosidad y las corrientes marinas, entre otros elementos importantes del clima. El cambio climático tiene una particularidad, existe una gran incertidumbre, no se sabe, cómo ni cuándo serán afectadas con exactitud, las personas, las sociedades, los ecosistemas y la naturaleza, aunque ya se han documentado ciertas tendencias.

El cambio climático es considerado una de las mayores amenazas sobre la diversidad biológica del mundo; según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), muchas especies de fauna y flora están en peligro de extinción por causa de este cambio y sus efectos asociados. Esto puede tener impactos, no solamente sobre la biodiversidad misma, sino sobre los ecosistemas, sus funciones y servicios ambientales.

Ante escenarios de clima cambiante, las áreas protegidas del Ecuador son indispensables para la conservación de la diversidad biológica y la provisión de servicios ambientales. Por eso, trabajamos en el fortalecimiento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) como una estrategia que contribuya a reducir la vulnerabilidad de la sociedad y del patrimonio natural del Ecuador. El cuidado y protección de bosques, páramos, humedales y manglares conservados en el SNAP, es fundamental en la mitigación y la adaptación al cambio climático del país, pues capturan gases de efecto invernadero que regulan la provisión de servicios ambientales.

El Ministerio del Ambiente de Ecuador, responsable de conservar el patrimonio natural y de la gestión del cambio climático a nivel nacional, presenta en este libro información de base, para emprender y fomentar la implementación de medidas de adaptación y mitigación, para la gestión de este recurso estratégico del Ecuador.

Lorena Tapia Núñez
Ministra del Ambiente del Ecuador

Lista de acrónimos

ANR	Área Nacional de Recreación
CBD	Convenio de Diversidad Biológica
GADs	Gobiernos Autónomos Descentralizados
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
PANE	Patrimonio de Áreas Naturales del Estado
PN	Parque Nacional
RB	Reserva Biológica
RE	Reserva Ecológica
RPF	Reserva de Producción de Fauna
RVS	Reserva de Vida Silvestre
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas



Resumen

El Ecuador es reconocido como uno de los países megadiversos del planeta, lo que implica que en su pequeño territorio posee una gran riqueza de organismos vivos. Esta gran riqueza, en la actualidad, es parte fundamental de la visión del Estado que promueve un nuevo modelo de desarrollo del país. El uso sostenible de la biodiversidad y de los servicios ambientales que generan los ecosistemas es esencial para la consecución de esta visión. Sin embargo, los ecosistemas y la biodiversidad que albergan están amenazadas por diferentes causas, principalmente de origen antrópico, de manera directa e indirecta.

Frente a estas amenazas, el establecimiento de áreas protegidas estatales y privadas ha sido quizá la más efectiva estrategia de conservación *in-situ* de la biodiversidad. Sin embargo, una relativamente reciente y creciente amenaza, el cambio climático, podría tener impactos de diferentes tipos en los organismos vivos y en los ecosistemas, incluso dentro de las áreas protegidas.

Este estudio pionero, reporta una primera aproximación de los posibles escenarios que la biodiversidad del país puede enfrentar si consideramos los cambios climáticos propuestos por predicciones del clima futuro. Se utilizaron 667 especies entre angiospermas, helechos, anfibios,



reptiles y aves, como indicadores de biodiversidad. Los registros de presencia de especies provienen de bases de datos curadas por científicos con experiencia en cada uno de estos grupos, de varias instituciones y personas. La información climática presente y futura fue obtenida de sitios en línea que proveen los datos generados por varios centros de investigación del mundo. El análisis de los potenciales impactos del cambio del clima se realizó a dos niveles: a) cambios a nivel de todo el territorio nacional y b) sobre cada uno de las áreas protegidas continentales del Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE) creadas hasta febrero del 2013, cuando inició esta iniciativa.

La metodología aplicada se dividió en tres etapas: 1) La generación, preparación y validación de la información biológica y climática necesaria; 2) El desarrollo de modelos potenciales de distribución presente y futura de las especies, y 3) La construcción de métricas de sensibilidad de las especies al cambio del clima para cada una de las especies modeladas. Las métricas generadas a escala de pixel y de área protegida son, principalmente, la pérdida total de especies, porcentaje de cambio de riqueza de especie y tasa de recambio de especies. Este estudio analizó el impacto generado por los potenciales cambios del clima predichos para el año 2050, bajo dos escenarios de

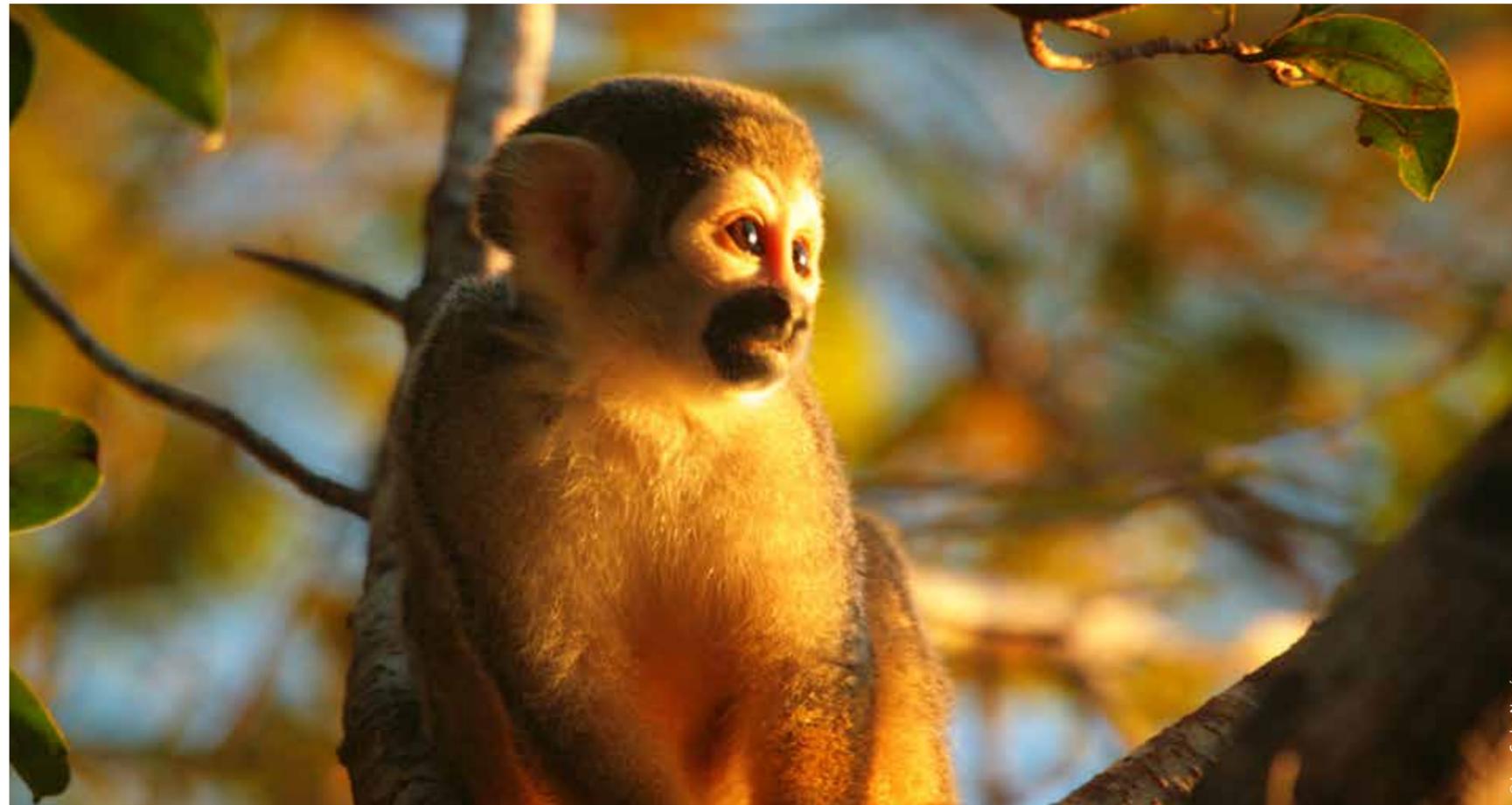
emisiones de gases de efecto invernadero (responsables del cambio del clima): A1B y A2A. Adicionalmente, se analizó dos potenciales respuestas de las especies a estos cambios: 1) una capacidad de desplazamiento sin límite que permitiría que las especies colonicen cualquier parte del territorio donde el clima futuro sea idóneo, y 2) una capacidad de desplazamiento limitada donde las especies solo podrán sobrevivir en sitios de su distribución presente donde se mantengan las condiciones climáticas adecuadas.

Los resultados muestran que existirán cambios en la distribución de las especies hacia el futuro. Algunas especies mostrarán, como era de esperar, expansiones de sus rangos de distribución pero también existirán contracciones de los rangos de distribución especialmente en especies con rangos de distribución restringida o especies amenazadas. Estos cambios provocarán inevitablemente cambios en la estructura de las comunidades bióticas de los ecosistemas. Los resultados fueron bastante similares entre los dos escenarios de emisiones (A1B y A2A) pero fueron considerablemente diferentes dependiendo del escenario de desplazamiento aplicado. Los patrones generales mostraron desplazamientos verticales ascendentes desde la zona amazónica hacia los Andes, lo cual es similar a otros estudios realizados en otras partes

del mundo. Adicionalmente, se logró determinar zonas de mayor estabilidad en cuanto al recambio futuro de especies. Estas zonas se encuentran en el pie de monte oriental y en amplias zonas de la costa.

También es relevante mencionar que las métricas aplicadas mostraron que las áreas de mayor exposición a los impactos no son espacialmente congruentes entre, ni dentro, de los grupos biológicos estudiados. Esto quiere decir, por ejemplo, que las localidades con un mayor número de especies pérdidas para los anfibios difiere de las áreas de las aves. Lo mismo sucede con aquellas donde habrá mayor porcentaje de pérdida y también de las áreas con mayores tasas de recambio. Adicionalmente, las áreas también se diferenciaron para las tres métricas dentro de cada uno de los grupos.

Estos resultados aplicados a las reservas continentales del PANE limitan la identificación de las áreas protegidas donde se proyectan los mayores cambios para todos los grupos biológicos o escenarios utilizados en este estudio. Sin embargo, algunas de las localidades con mayor prevalencia en las métricas analizadas son: (1) la región oriental del PN Yasuní, (2) la RPF Cuyabeno, (3) reservas pequeñas en los Andes centrales como la RPF Chimborazo, PN Cotopaxi o PN Cajas, (4) las zonas



altas de las reservas de las estribaciones orientales de la cordillera oriental como los parques nacionales Sangay, Sumaco, y Cayambe Coca. Sin embargo, también cabe mencionar que muchos cambios se proyectan en zonas donde el PANE no tiene representatividad como el pie de monte oriental y la región costera en los límites de las provincias de Guayas, Santa Elena, Manabí y Los Ríos, todas ellas con una alta concentración de especies endémicas.

Estos resultados tienen implicaciones en el diseño de las estrategias que pueden ser aplicadas para generar un sistema de áreas protegidas más resiliente y minimizar sus impactos. Con base en los resultados podemos asumir que las estrategias van a tener que ser diferenciadas para el grupo de especies en que nos estemos enfocando. Las estrategias deberán considerar las especies más vulnerables, que por lo general son las especies endémicas o con rangos de distribución restringida. Con respecto al manejo del PANE se debe considerar estrategias de manejo del paisaje que facilite la migración vertical de las especies, la identificación de las zonas de mayor estabilidad climática y la articulación del PANE con los otros subsistemas a zonas donde se predicen los mayores cambios (i.e. pérdida y recambio de especies), muchas de las cuales carecen de algún grado de protección.

El manejo de los cuatro subsistemas del SNAP tiene la oportunidad y responsabilidad de articular diferentes tipos de acciones de conservación a diferentes niveles administrativos que permitan aplicar una estrategia coordinada para minimizar los potenciales efectos negativos del cambio climático sobre este importante recurso estratégico del Ecuador, su megabiodiversidad.



Antecedentes

La diversidad biológica está en riesgo y Ecuador y su megabiodiversidad no son una excepción. Las tasas de extinción que se están experimentando en nuestro planeta en el presente, son entre 100 y 1 000 veces mayores a las tasas naturales (Pimm *et al.*, 1995) y sus causas son múltiples (WWF, 2014). Destrucción de hábitats, sobreplotación, contaminación, enfermedades infecciosas y especies introducidas están entre las más estudiadas (Balmford y Bond, 2005; Butchart *et al.*, 2010). A esto se suman los impactos del cambio climático que se prevee causaran cambios importantes en las comunidades bióticas de los ecosistemas. Frente a este escenario, varios científicos han propuesto una sexta extinción masiva (Barnosky *et al.*, 2011).

La extinción de especies puede tener consecuencias ecológicas, económicas e incluso sociales. Entre las consecuencias ecológicas podemos considerar efectos en las cadenas tróficas que pueden producir extinciones secundarias o efectos en procesos de interacción de las especies, como por ejemplo la polinización, que en muchos casos son parte de los bienes y servicios ambientales que nos brindan los ecosistemas. La alteración o pérdida de estos bienes y servicios implicaría gastos económicos muy altos y pondría en peligro a los grupos humanos más vulnerables (Sala *et al.*, 2005). También, la pérdida de una especie

puede implicar la pérdida de medicinas potenciales que podrían curar enfermedades emergentes que enfrenta la humanidad en el presente o podría enfrentar en el futuro. A esto se suma la pérdida de símbolos intangibles como especies vinculadas a prácticas culturales, y religiosas.

El Estado Ecuatoriano ha dado pasos importantes para incorporar a la biodiversidad en la planificación y políticas nacionales, a partir de los mandatos constitucionales que evidencian el aporte de ésta al bienestar humano y la importancia de su conservación (Artículos 14, 57, 71-74, 83, 313, 315, 317, 395, 396, 414 de la Constitución). Sobresalen en este sentido la incorporación del Objetivo 7 en el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 que plantea políticas y metas específicas para la conservación y uso sustentable del patrimonio natural (Senplades, 2013). Bajo estas orientaciones, el Ecuador está diseñando la Estrategia Nacional de Biodiversidad y Plan de Acción 2015-2020 cuyo objetivo es asegurar el mantenimiento y acceso justo a los bienes y servicios ecosistémicos asociados a la conservación de la biodiversidad (MAE, 2014a).

Complementariamente y a partir del 2012 entra en vigencia la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025 que, reconociendo los efectos de este fenómeno sobre la biodiversidad, establece como

lineamiento de acción para el 2015 el consolidar y potenciar la implementación de medidas que permiten aumentar la capacidad de respuesta de las especies y ecosistemas frente a los impactos del cambio climático (MAE, 2012).

El proceso de transformación de la matriz productiva y la matriz energética que impulsa el actual gobierno, se sustenta en el uso de la biodiversidad y los servicios que brindan los ecosistemas. El cambio de la matriz productiva contempla el paso de ser un país primario exportador a ser un país que sustenta sus ingresos en una economía diversificada, donde se potencie el bioconocimiento y los servicios ecosistémicos (Senplades, 2013). La transformación de la matriz energética está directamente relacionada a la función de regulación hídrica que brindan, sobre todo, los ecosistemas de montaña y que sería la base de operación de los grandes proyectos hidroeléctricos y multipropósito impulsados (MAE, 2014a). Es por lo tanto imprescindible que estos procesos vengán de la mano de estrategias y acciones efectivas que promuevan la conservación de la biodiversidad.

Un mecanismo clave para instrumentar estas disposiciones es el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), estrategia nacional de conservación que por su importancia ha sido instituida en el Art. 405 de la Constitución Política del Ecuador, el cual establece que el SNAP:

“garantizará la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas”. La constitución establece al Estado como único ente rector y regulador, quien deberá además garantizar la sostenibilidad financiera del sistema, y fomentar la participación en su administración y gestión. A partir de este mandato constitucional, se ha estructurado al SNAP en cuatro subsistemas a través de los cuales se pretende abarcar todo el conjunto de áreas privadas y estatales que se encuentran bajo esquemas de protección (Tabla 1). La Estrategia Nacional de Cambio Climático hace un especial énfasis en el fortalecimiento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas como medida para incrementar la capacidad de respuesta de los ecosistemas terrestres y su biodiversidad frente a los impactos del cambio climático, incluyendo metas específicas para el incremento de superficie bajo este esquema de protección, y la inclusión de criterios de adaptación al cambio climático en la planificación y gestión de las áreas protegidas del país (MAE, 2014b).



Introducción

La conservación in situ de la diversidad biológica se ha basado hasta ahora en la implementación, manejo y preservación de hábitats naturales. Por esta razón, las áreas protegidas y otros esquemas de manejo del paisaje son componentes fundamentales de las estrategias nacionales y mundiales de conservación *in situ* de la diversidad biológica. La finalidad del Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas (Ervin y Gidda, 2012) desarrollado en el marco del Convenio de Diversidad Biológica (CBD), es apoyar el establecimiento y mantenimiento de sistemas nacionales y regionales de áreas protegidas completos, eficazmente gestionados y ecológicamente representativos.

En América Latina las áreas protegidas ascienden a un total de 1 949, abarcando una superficie de 211 millones de hectáreas, o el 10,4% del área continental de los 22 países. Ecuador posee 49 áreas protegidas que forman parte del Patrimonio Natural del Estado (PANE) y abarcan una extensión de alrededor de 4 871 986 hectáreas, equivalentes al 19% del territorio del país (Elbers, 2011). La intención de proteger la biodiversidad del país es notoria y ha conducido a la inclusión de una superficie considerable de la vegetación remanente del país dentro del PANE.

Sin embargo, este porcentaje no considera los otros tres subsistemas parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP). Estos subsistemas incluyen a los sistemas de áreas protegidas de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs), a las reservas pertenecientes a comunidades indígenas y afroecuatorianas y finalmente a las iniciativas privadas de conservación¹. Hasta la fecha una sola reserva del subsistema de los GADs ha sido incluida como parte del SNAP.

Pese a ello, es necesario considerar que los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres sugieren fuertes interrupciones de las comunidades bióticas. Específicamente, los organismos terrestres enfrentarán procesos de extinciones locales, desplazamientos altitudinales o alterar procesos locales ecosistémicos claves, como cambios en los patrones fenológicos (Araújo *et al.*, 2004; Araújo y Rahbek, 2006; Feeley y Silman, 2010; Laurance *et al.*, 2011; Loss *et al.*, 2011).

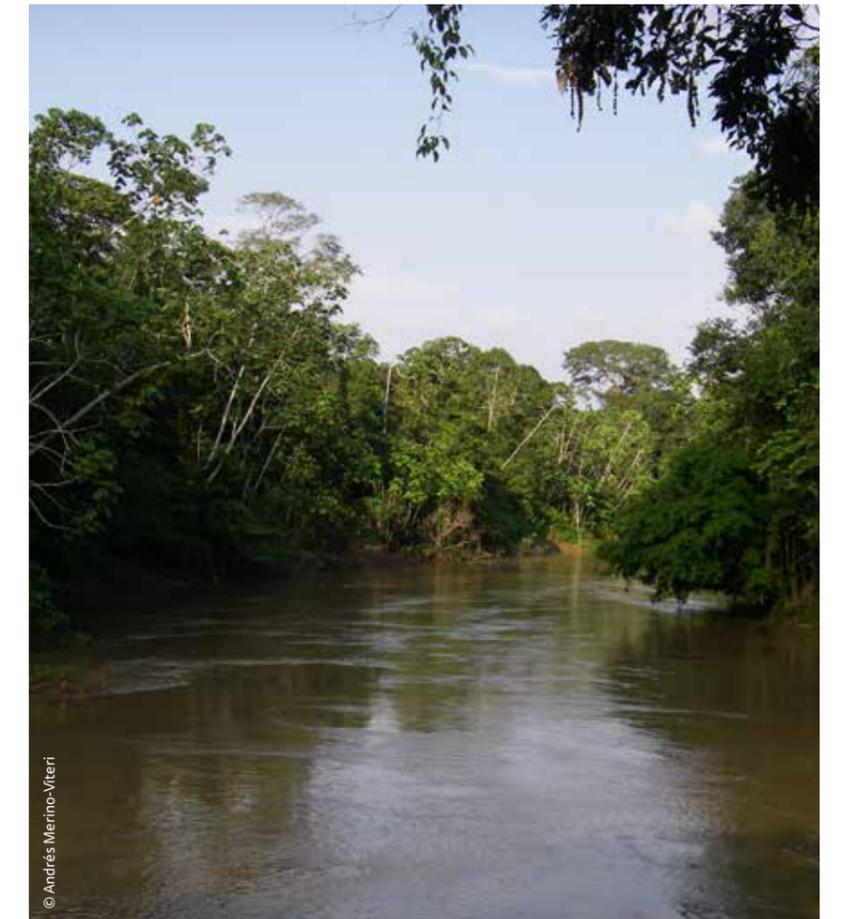
Varios estudios concuerdan que muchas de las especies que se encuentran actualmente representadas en los sistemas nacionales de áreas protegidas se verán afectadas por estos procesos de migración producto del desplazamiento de las condiciones climáticas actuales

¹ Aunque algunas de las iniciativas de conservación de actores adicionales al MAE han existido desde hace mucho tiempo, su integración al SNAP es reciente y su desarrollo como subsistemas está aun en proceso inicial de implementación (Ver Tabla 1).

T A B L A 1. Organización del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP).

SUBSISTEMA	DESCRIPCIÓN
Subsistema Patrimonio de Áreas Protegidas del Estado (PANE)	Abarca aproximadamente 20% del territorio nacional con 48 áreas en territorio de propiedad y bajo administración del Estado. El subsistema está distribuido a lo largo de las 24 provincias ecuatorianas y cubre las cuatro regiones geográficas principales.
Subsistema de Gobiernos Autónomos Descentralizados (APG)	Son áreas protegidas declaradas y administradas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados. Al 2014, la única área protegida reconocida bajo este subsistema es el área de conservación municipal "Siete Iglesias" al sur de la provincia de Morona Santiago.
Subsistema de Áreas Protegidas Comunitarias (APC)	Incluye áreas protegidas en territorios indígenas y afroecuatorianos. Este subsistema está actualmente en estructuración. Destacan la propuesta del pueblo Shuar Arútam en la Cordillera del Cóndor y la Gran Reserva Chachi en la Provincia de Esmeraldas.
Subsistema de Áreas Protegidas Privadas (APPR)	Espacios naturales de dominio privado y relevancia ecológica que se encuentran bajo protección legal, y cuya gestión está sometida a un manejo sustentable. El subsistema está en proceso de estructuración a partir de los lineamientos para la declaración de áreas privadas que deberá emitir próximamente el MAE.

Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador





© Andrés Merino-Viteri

y la aparición de climas noveles, no análogos con las condiciones actuales (Jurasinski y Kreyling, 2007; Kharouba y Kerr, 2010; Dawson *et al.*, 2011; Virkkala *et al.*, 2012; Popescu *et al.*, 2013; Alagador *et al.*, 2014). Un estudio reciente realizado en la red de áreas protegidas de la Comunidad Europea reporta que, de acuerdo a los modelos de cambio climático para el 2080, el 58% ($\pm 2,6\%$) de las especies de plantas vasculares y vertebrados terrestres perderán su nicho climático al interior de las reservas europeas, planteado un gran reto al futuro (Araújo *et al.*, 2011). Hole *et al.* (2009) demostraron que redes articuladas de áreas protegidas pueden tener un rol fundamental en la disminución de los impactos más fuertes del cambio del clima, al menos para áreas de importancia para las aves en África.

Bajo estos escenarios, es evidente que aparte de promover un manejo exitoso de las áreas protegidas, se requiere pensar en esquemas complementarios de planificación del territorio que permita facilitar procesos de migración y desplazamiento de las entidades biológicas que se pretende conservar en las reservas actuales ante los efectos futuros del cambio climático.



Métodos

Este estudio tiene por objetivo generar un primer análisis básico sobre los posibles impactos del cambio climático en la biodiversidad del Ecuador continental con énfasis en las áreas que conforman el PANE.

Específicamente se busca realizar un análisis preliminar de las áreas protegidas continentales del PANE con mayor probabilidad de ser afectadas por el cambio del clima, bajo dos escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero.

Esta aproximación implica varios pasos que incluyen la consolidación de una base de datos de localidades de presencia de diferentes grupos biológicos y una base de datos de información climática presente y futura, la generación de modelos potenciales de distribución de especies y el análisis de los cambios en la distribución futura de los organismos, tanto a nivel del país, como a nivel de cada una de las áreas del PANE. La metodología es similar a la propuesta por Ramirez-Villegas *et al.* (2014).

La información validada de localidades de los organismos de estudio permite la elaboración de modelos potenciales de distribución presente y futura para cada especie en estudio, los cuales son analizados bajo dos diferentes

escenarios relacionados con la capacidad de las especies de moverse en el paisaje en el transcurso del tiempo: a) un escenario de desplazamiento sin limitaciones que considera que las especies son capaces de llegar a cualquier sitio del país donde las condiciones ambientales sean idóneas en el futuro (desplazamiento sin límites, de aquí en adelante) y b) un escenario donde las especies son únicamente capaces de sobrevivir en sitios de ocupación presente que en el futuro mantengan las condiciones de idoneidad climática (desplazamiento limitado de aquí en adelante).

La cuantificación de dichos cambios de distribución en cada escenario de clima futuro, así como en cada escenario de desplazamiento de las especies ayuda a identificar patrones de respuesta de la biodiversidad, tanto a nivel de grupos taxonómicos, en todo el territorio continental, así como en cada una de las áreas del PANE.

Los pasos metodológicos se encuentran esquematizados en la Figura 1. A continuación se describe en detalle en qué consiste cada uno de ellos.

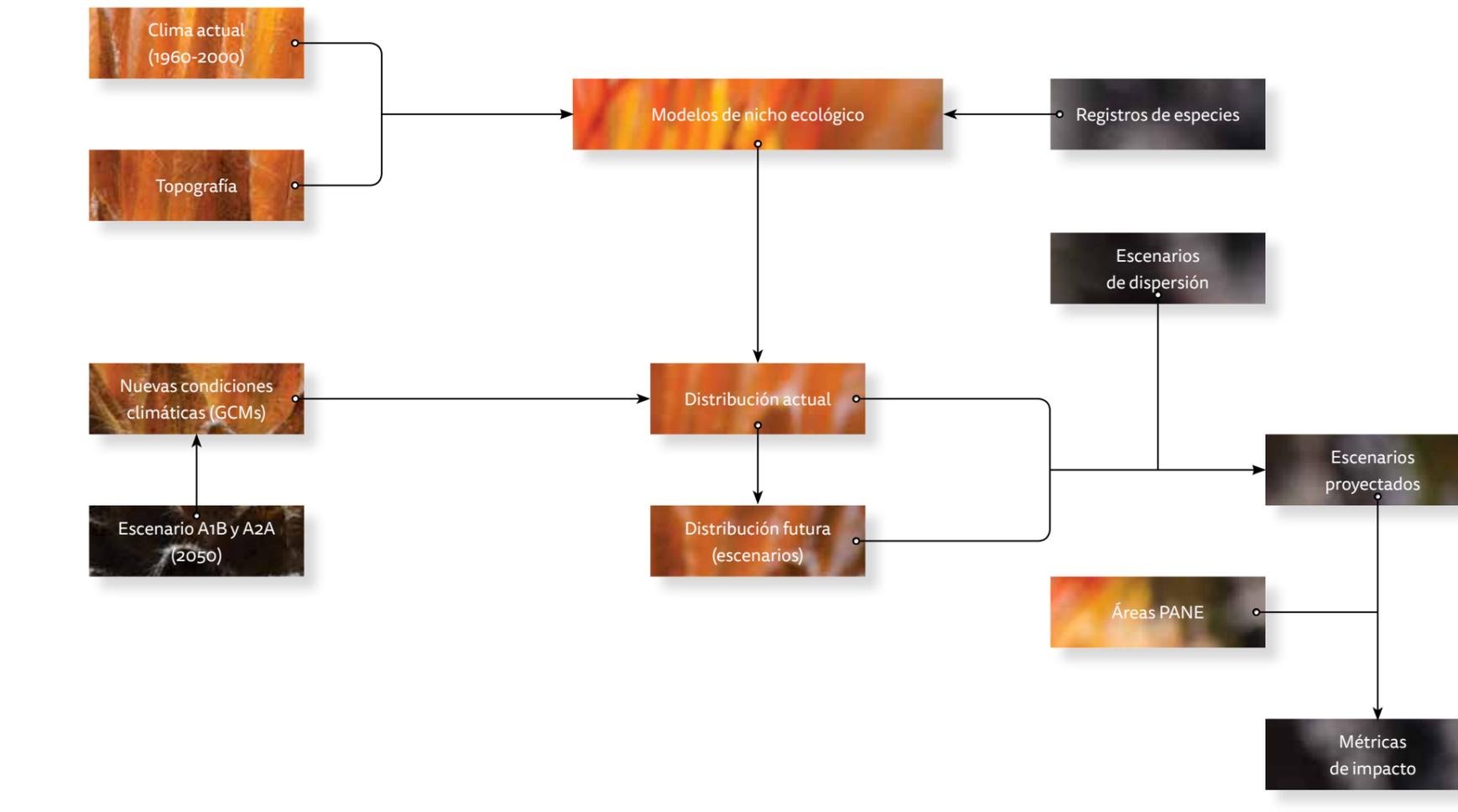


FIGURA 1. Esquema del protocolo metodológico para modelar los impactos del cambio climático en las áreas del PANE a nivel de un grupo de especies (aves, reptiles, anfibios y plantas vasculares).

Paso 1: Consolidación de las variables ambientales y biológicas

Se enfoca en la recopilación y generación de las variables climáticas actuales y futuras, así como de las variables fisiográficas y recopilación de los datos de registros de las especies para el desarrollo de los análisis de impacto y sensibilidad climática.

A través de esta actividad se consolidó una base cartográfica en formato raster a 1 km² de resolución con la siguiente información:

Variables climáticas para el período actual (1960-2000)

Las variables climáticas utilizadas (p.ej. temperatura mínima promedio mensual, temperatura media anual, y otras cinco variables bioclimáticas), disponibles en WorldClim a una resolución de 1 km² (<http://www.worldclim.org>), se cortaron y georeferenciaron para el Ecuador continental. Adicionalmente, se calcularon dos capas con índices bioclimáticos a partir de las variables climáticas base. Las variables topográficas se calcularon a partir de una capa de 90 m de resolución de la misión topográfica Radar Shuttle (SRTM, por sus siglas en inglés) re-escalada a 1 km² (Tabla 2).

T A B L A 2 . Variables bioclimáticas y topográficas seleccionadas para el desarrollo de los modelos de nicho de las especies de plantas, anfibios, reptiles y aves.

TIPO	VARIABLE	DESCRIPCIÓN	FUENTE
Bioclimáticas	Bio12	Precipitación total anual	http://www.worldclim.org/current
	Bio15	Estacionalidad de la precipitación total (coeficiente de variación)	
	Bio17	Precipitación total del trimestre más seco	
	Bio04	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100)	
Calculadas	lo	Índice ombrotérmico	
	lo_d2	Índice ombrotérmico del bimestre más seco	
Topográficas	Tri	Índice de rugosidad del terreno: raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre la celda focal y las ocho celdas vecinas adyacentes	Ruggedness.aml, disponible en http://www.blm.gov/nstc/ecosysmod/surfland.html y calculada en base a Riley <i>et al.</i> (1999).
	Topo scales	Índice de exposición topográfica: mide la exposición topográfica (e.g. valles, cuchillas) a diferentes escalas e integra estas mediciones en una cuadrícula única	Toposcale.aml, creada por Niklaus E. Zimmermann. Archivo AML disponible en: http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml4_1.html



Posteriormente, se realizaron análisis estadísticos para estimar el grado de correlación entre las variables y seleccionar el set final para desarrollar los modelos. Para esto, se obtienen 2 000 puntos al azar, separados por al menos 1 km entre sí, de entre todas las localidades de la base de datos consolidada a partir de los registros de ocurrencia de las especies de estudio. Se obtuvo una tabla por medio de la extracción de los datos de cada capa para las localidades seleccionadas al azar.

Luego, se desarrolló un análisis de método no ponderado de grupos pareados con aritmética media (UPGMA, por sus siglas en inglés) y una matriz de correlaciones con el fin de evaluar qué variables (de las 12 utilizadas) son similares entre sí y cuáles varían de la misma manera, respectivamente. Así, se alimenta el modelo potencial de distribución sólo con variables que aportan con información adicional a los resultados. Se escogieron las variables que no fueron agrupadas cercanamente entre sí en el UPGMA (el coeficiente de aglomeración fue 0,803 para el UPGMA con datos estandarizados y 0,821 para el análisis con datos no estandarizados) y que tienen valores menores a 0,7 en la matriz de correlación (Figuras 2 y 3, respectivamente).

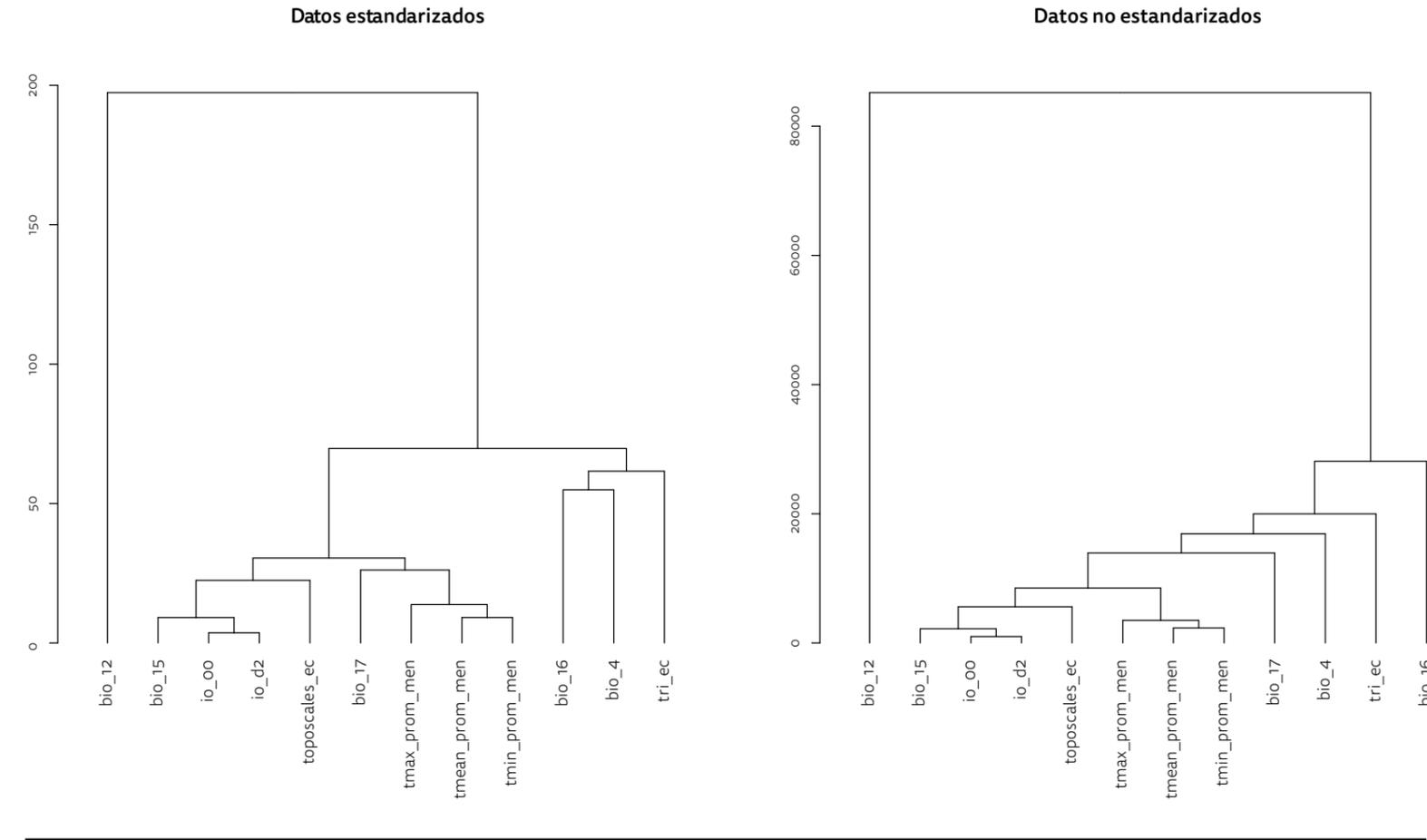


FIGURA 2. Análisis de agrupamiento de las variables bioclimáticas y fisiográficas para seleccionar el set final de variables con las que realizar los modelos de nicho. Las observaciones se generaron a partir de 2 000 puntos al azar, separados por al menos 1 km entre sí.

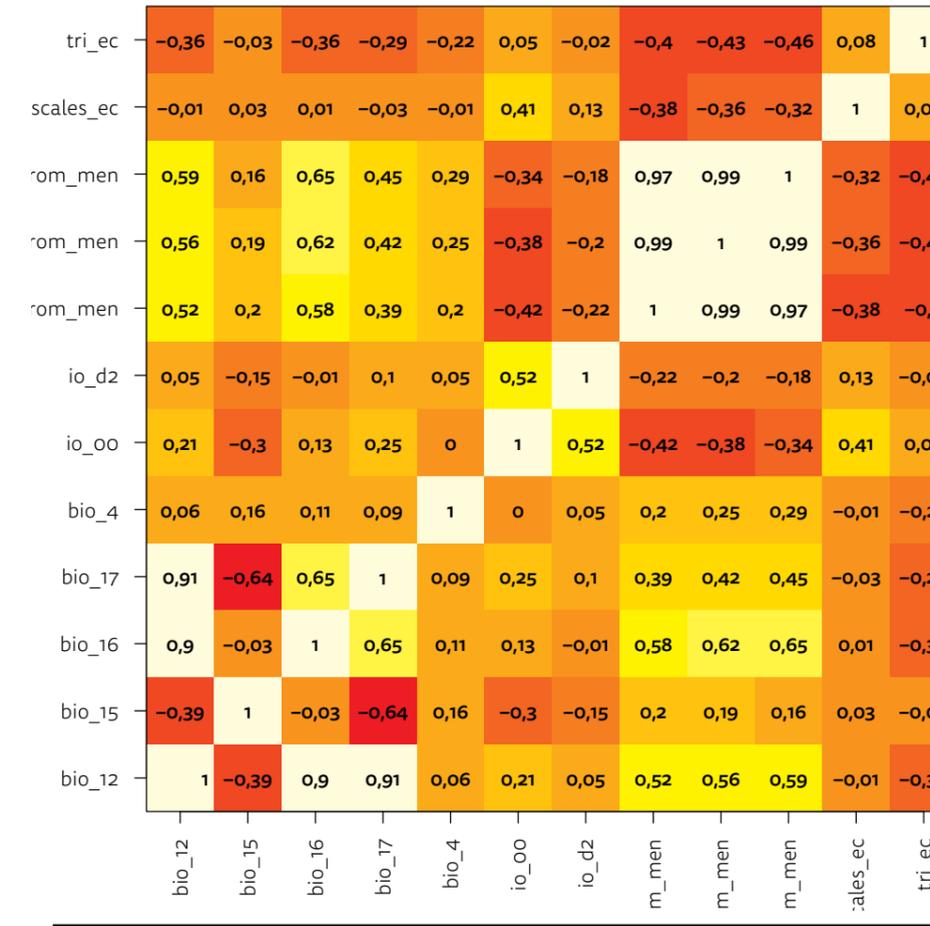


FIGURA 3. Matriz de correlación de las variables bioclimáticas y fisiográficas derivadas a partir de 2 000 puntos al azar, separados por al menos 1 km entre sí. Los colores se basan en los índices de correlación. Valores cercanos a 1 en color crema y valores con baja correlación, color rojo.

Finalmente, se seleccionaron ocho variables para la generación de los modelos: cuatro bioclimáticas, dos derivadas de las capas primarias y dos topográficas. Las variables, su descripción y fuente se encuentran detalladas en la Tabla 2.

Variables climáticas futuras (2050)

Las variables climáticas se generaron a 1 km² de resolución para los escenarios de emisiones futuras de gases de efecto invernadero A1B y A2A, para el período 2050 (2030-2060), para todos los modelos de circulación global disponibles en el portal de información del World Climate Research Programme's (WCRP's): Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset (Recuadro 1). Los modelos disponibles, de los cuales se obtuvo el clima futuro, corresponden a ocho modelos para el escenario A1B y seis para el escenario A2A (Tabla 3). A partir de esta información se generaron dos tipos de análisis. El primero a nivel de especies utiliza el mismo grupo de ocho variables utilizadas para generar los modelos presente y futuros y determinar las especies más sensibles por su disminución del rango climático de ocurrencia; el segundo análisis se concentra en analizar los posibles impactos de las anomalías climáticas (considerada como exposición al cambio del clima;

RECUADRO 1.

La proyección del clima futuro

El estudio del clima futuro es una tarea que múltiples centros de investigación del mundo han tomado seriamente (ver Tabla 3). Cada uno de ellos con sus equipos de científicos han desarrollado fórmulas matemáticas que explican el funcionamiento del clima, las cuales son validadas con datos reales (de temperatura y precipitación principalmente) colectados en estaciones meteorológicas alrededor del mundo. Si los resultados de la aplicación de estas fórmulas logran predecir de manera certera las condiciones registradas en el presente, se las utiliza para modelar el clima futuro. Estas representaciones del clima futuro son conocidas como Modelos de Circulación Global (GCM por sus siglas en inglés). Hasta el año 2013, una de las variables utilizadas para la generación de los modelos del clima eran los potenciales escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (de aquí en adelante SRES, por sus siglas en inglés) que correspondían a diferentes realidades demográficas, sociales, económicas, tecnológicas o medioambientales del planeta. Así los SRES estaban clasificados en familias (A1, A2, B1 y B2) y grupos (FI, T, B). Así por ejemplo, un SRES A1 representa un modelo con el desarrollo alternativo de tecnologías de energía, aunque en el A1FI aún existe gran dependencia de combustibles fósiles; en el A1T principalmente fuentes energéticas no fósiles y en el A1B, utilizado en este estudio, un punto intermedio entre estas condiciones. La familia de escenarios A2, de la cual un escenario también se utilizó en este estudio, implican un crecimiento poblacional continuo, el desarrollo económico se da a nivel regional y el desarrollo tecnológico es más lento que en las otras familias de escenarios (Climático, 2000). Cada uno de los escenarios implica la predicción de concentraciones de gases de efecto invernadero específicos, las cuales potencialmente producirán consecuencias también específicas en el clima y por consiguiente en las especies y ecosistemas.



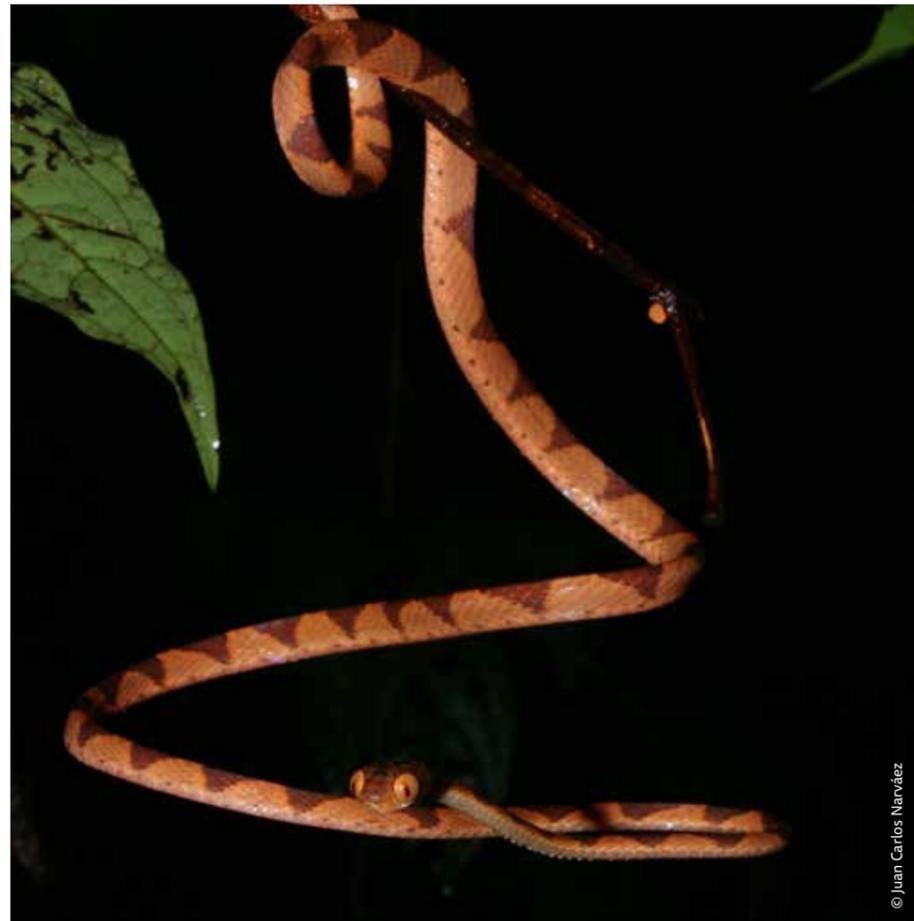
TABLA 3. Detalle de los escenarios de emisión, modelos y variables climáticas utilizadas para generar los análisis de impacto en la biodiversidad del Ecuador continental, al año 2050

MODELO*	ORIGEN	ESCENARIO	
		SRES A1B	SRES A2A
BCCR_BCM2.0	Noruega	x	x
CNRM-CM3	Francia	x	x
CSIRO-Mk3.0	Australia	x	x
GFDL-CM2.0	Estados Unidos	x	x
INM-CM3.0	Rusia	x	
MIROC3.2-HIRES	Japón	x	x
MRI-CGCM2.3.2A	Japón	x	x
NCAR-CCSM3.0	Estados Unidos	x	

Para todos los modelos, las variables consideradas en los análisis aquí presentados son: precipitación total anual, temperatura máxima mensual, temperatura media mensual, temperatura mínima mensual.

TABLA 4. Número de registros de especies por cada grupo seleccionado como indicadores de la biodiversidad del Ecuador continental

GRUPO	REGISTROS TOTALES		PRESENCIAS VÁLIDAS	
	NÚMERO	PORCENTAJE (%)	NÚMERO	PORCENTAJE (%)
Anfibios	4 009	16,7	3 382	19,3
Aves	5 569	23,1	5 466	31,3
Reptiles	4 369	18,2	1 748	10,0
Angiospermas	8 607	36,0	5 857	34,0
Helechos	1 507	6,0	1 026	6,0
Total	24 061	100,0	17 479	100,0



© Juan Carlos Narváez

Figura 4) en las áreas protegidas del PANE, por medio de alguna métrica de impacto (ver Paso 3, más abajo; consideradas como la sensibilidad al cambio climático).

Base de datos de registros de especies

La base de datos consolidada contiene registros de presencias para especies de aves, plantas vasculares, anfibios y reptiles del Ecuador, y cuenta con un total de 24 061 registros, de los que el 42% (10 114 registros) corresponden a plantas vasculares y el 23,1% (5 569 registros) a las aves (Tabla 4).

El promedio de registros por especie es de 29 ($\pm 29,4$), el mínimo es un registro y el máximo 257. El 50% de las especies ($n = 400$) tiene 22 o más registros y solo el 25% de las especies ($n = 200$) tienen menos de 11 registros. De estas últimas, 60 especies tienen igual o menos de cinco registros.

Se recomienda el modelamiento de la distribución potencial de una especie si existen 15 o más registros únicos válidos. Sin embargo, con el fin de mantener dentro del análisis especies endémicas o de rango restringido, que por lo general, tienen pocos registros o pocas localidades únicas, se utilizaron todas las especies con más de

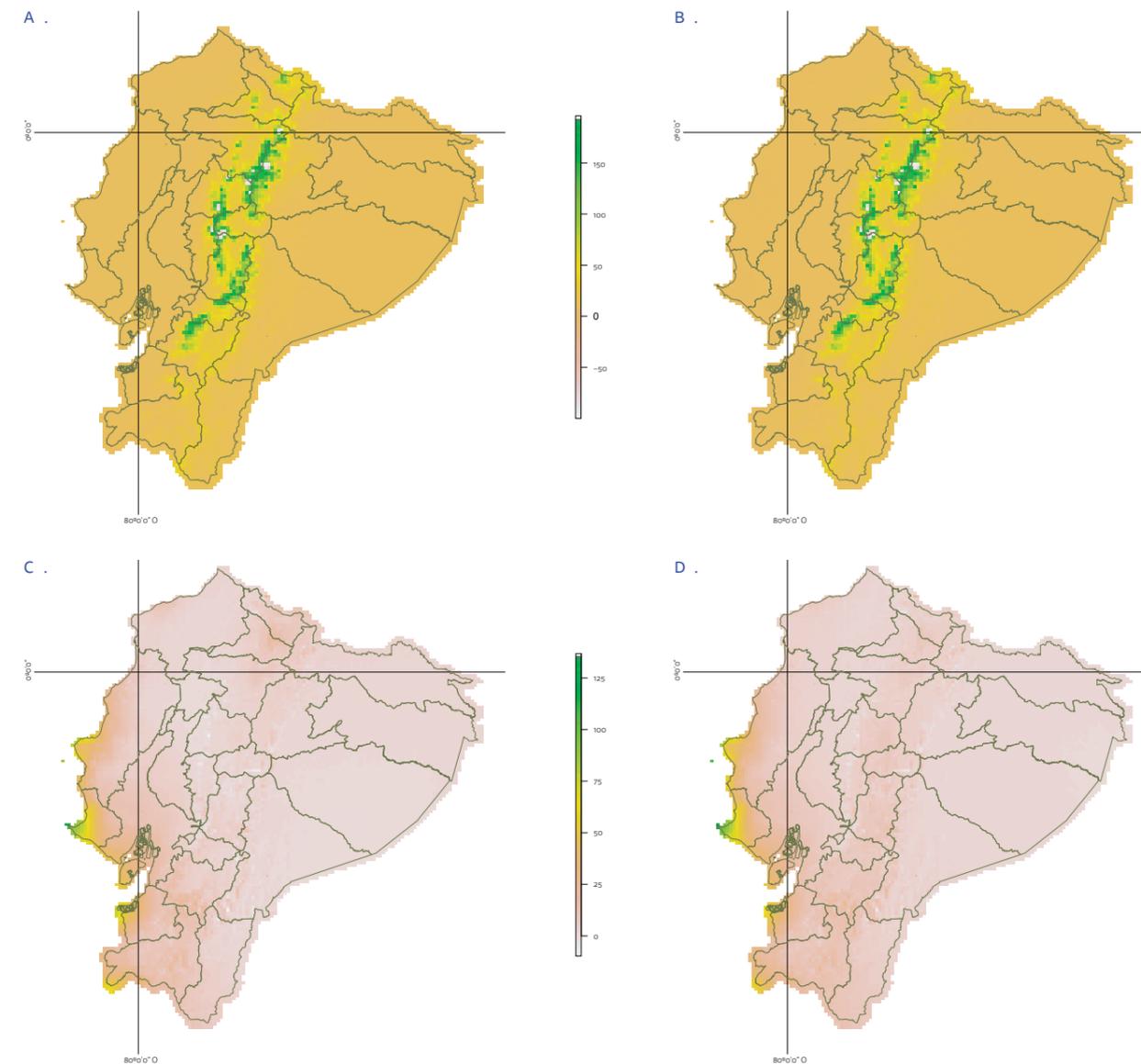


FIGURA 4. Porcentaje de cambio de las condiciones de temperatura mínima (a y b) y precipitación (c y d) para los dos escenarios de emisiones, A1B y A2A (derecha e izquierda, respectivamente) para el año 2050. Para una mejor visualización los mapas fueron re-escalados a una resolución de 5 km².

cinco registros válidos, siguiendo las recomendaciones de Guisan and Thuiller (2005) y Marmion *et al.* (2009) (n=667 especies). El resto de especies fueron excluidas (64 especies).

Paso 2: Modelos de la distribución potencial presente y futura de las especies

La distribución de las especies seleccionadas en el Ecuador se construyó a partir del uso del programa de libre acceso MaxEnt (Phillips y Dudík, 2008) (Ver Recuadro 2). MaxEnt integra datos de ocurrencia de especies y variables de nicho (p. ej. clima, topografía, tipos de hábitats) espacialmente explícitas (Phillips *et al.*, 2006).

Se desarrolló una rutina en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2014) para la generación automática de los modelos distribución de especies. La rutina determina qué proceso realizar para cada especie escogiendo entre las siguientes opciones:

i. **Especies con menos de cinco registros válidos:** no son tomadas en cuenta para el análisis.

ii. **Especies con cinco o más registros:** se guía el proceso entre dos opciones.

- **Para especies con más de 15 registros válidos** se corre el algoritmo de Máxima Entropía (*MaxEnt*) que utiliza únicamente datos de presencia. Se divide el set de presencias en dos subgrupos: uno para el entrenamiento del modelo (70% de datos) y el otro para la evaluación del mismo (30% restante). Para complementar la evaluación del modelo, se escogen 2 000 puntos al azar del área de estudio que estén separados entre sí por al menos 1 km. La evaluación del modelo genera un umbral que determinar la presencia y ausencia de la especie. Este umbral está determinado por el valor en el cual se obtuvo el valor máximo de la suma de las tasas de positivos verdaderos y negativos verdaderos (*Maximum training sensitivity plus specificity*, en inglés) para realizar la transformación de los mapas de probabilidad a coberturas binarias (Liu *et al.*, 2005).

- **Para las especies con registros entre cinco y 14 registros:** se realiza el mismo procedimiento y se obtienen los mismos productos,

RECUADRO 2 .

Modelando donde viven las especies

Un modelo de distribución de una especie es una representación geográfica de las zonas donde una especie podría estar presente. Estos modelos por lo general están basados en correlaciones estadísticas entre variables continuas (como la temperatura media anual) y/o categóricas (como los tipos de ecosistemas) que se encuentran en matrices de datos que representan las coordenadas de una región geográfica determinada. Por esta razón, este tipo de modelos también son conocidos como modelos correlativos de distribución. El programa de computación *MaxEnt* utiliza el algoritmo de máxima entropía para producir un mapa de la idoneidad de cada celda del mapa para la presencia de dicha especie (nicho potencial). El programa genera valores conocidos como umbrales que indican un nivel de idoneidad que aseguraría o no que la especie esté presente en esa celda. Este mapa binario de presencia/ausencia debe ser validado por un experto en esa especie pues la distribución de una especie no necesariamente está limitada exclusivamente por el clima. Por ejemplo, una zona puede tener el clima ideal pero no tener presente el alimento para esa especie o puede contener una enfermedad que impide su presencia o por competencia con especies similares. Desde el punto de vista ecológico, este tipo de modelamiento puede representar el área de donde una especie puede encontrar muchos de los recursos, principalmente abióticos, para poder sobrevivir, o sea su nicho fundamental, sin embargo, no todas las especies ocupan todo este espacio geográfico como se

mencionó anteriormente. Principalmente factores bióticos (alimento, predadores, enfermedades, etc.) o al imposibilidad de llegar a ciertas zonas geográficas (barreras geográficas como cañones de ríos, montañas, etc.) impiden que se colonice todo el nicho fundamental. El área realmente ocupada por un tipo de organismo es conocida como el nicho realizado de la especie. Los cambios del clima propuestos a futuro tendrán consecuencias en los ambientes donde viven las especies. Bellard y colaboradores (2014) proponen que las especies podrían responder a dichos cambios en tres direcciones por medio de respuestas evolutivas o de cambios en sus características fenotípicas: a) moviéndose en el espacio (desplazamientos geográficos a zonas de clima idóneo), b) adaptando aspectos de su historia natural (fenología o ciclos circadianos) a nuevos tiempos o épocas donde las condiciones climáticas sean idóneas y c) cambiando aspectos fisiológicos para sobrevivir en ambientes con nuevas condiciones ambientales. El modelamiento hecho en este estudio principalmente evalúa los potenciales cambios en el primer aspecto, cambios en la distribución espacial de las especies hacia el 2050.

con la excepción de que para la generación y evaluación del modelo se utilizan el 100% de los datos de ocurrencia. El uso de la totalidad de los puntos busca compensar el desempeño de los modelos ya que se conoce que el rendimiento depende del número de presencias (Stockwell y Peterson, 2002).

En todos los casos, se evaluó la calidad de los modelos producidos. Los puntos de validación se utilizan para evaluar la exactitud de cada modelo, utilizando el Área Bajo la Curva (AUC –*area under the curve*– por sus siglas en inglés) de la curva ROC (análisis de sensibilidad y especificidad) (Guisan y Zimmermann, 2000; Guisan y Thuiller, 2005). El AUC mide la habilidad del modelo de discriminar entre sitios donde la especie está presente versus donde está ausente (Phillips *et al.*, 2006). Valores cercanos a 1 indican que el modelo es efectivo (Figura 5).

Los modelos de distribución potencial fueron validados por un experto en cada grupo para obtener un mapa remanente de distribución que se ajuste al nicho realizado de la especie en base de su conocimiento sobre la distribución geográfica de las mismas (Guisan y Zimmermann, 2000; Marmion *et al.*, 2009) (Recuadro 2). Dependiendo del caso se procedió a un arreglo

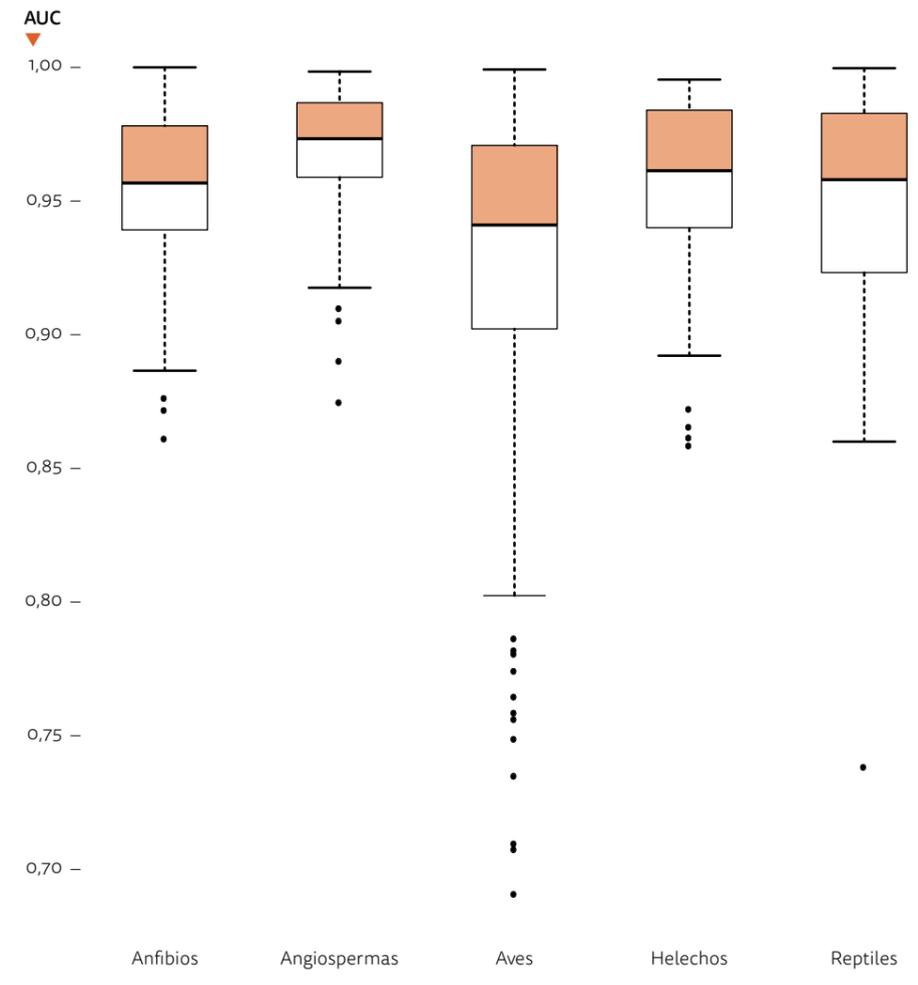


FIGURA 5. Rendimiento de los modelos de nicho para las especies de anfibios (n = 105); aves (n = 252), plantas vasculares (n = 268), y reptiles (n = 87) medido a través del Área bajo la Curva (AUC) a partir del 30% de los registros de ocurrencia. Los valores medios del AUC se presentan a través de las líneas negras horizontales de las cajas que representan el rango inter-cuartil de los datos, mientras que las patillas simbolizan los centiles 5 y 95.



© Ricardo Jaramillo

manual del modelo. Cabe mencionar que todo el proceso de generación de los mapas de distribución remanente presentes no fue parte de este estudio, sino fue un producto del proyecto *Identificación de Vacíos y Prioridades de Conservación en el Ecuador Continental* (Cuesta *et al.*, 2013).

Finalmente, se repitió este mismo proceso para la generación de modelos de distribución potencial futura de cada especie y, posteriormente, calcular las métricas de impacto (ver más adelante). Cabe mencionar que los modelos de distribución futura no fueron validados por los expertos debido a que no existen criterios para evaluar la distribución futura de ninguna especie. Los modelos futuros no fueron editados por los expertos y se consideró que la distribución potencial predicha estará disponible para cada una de las especies en el futuro. Los resultados fueron analizados independientemente en base de los dos escenarios de desplazamiento propuestos.

Paso 3: Análisis de sensibilidad climática

Los análisis realizados se concentran en dos niveles: a) cambios en la distribución de las especies en el Ecuador continental y b) los mismos cambios sobre la superficie de cada una de las áreas continentales del PANE, creadas

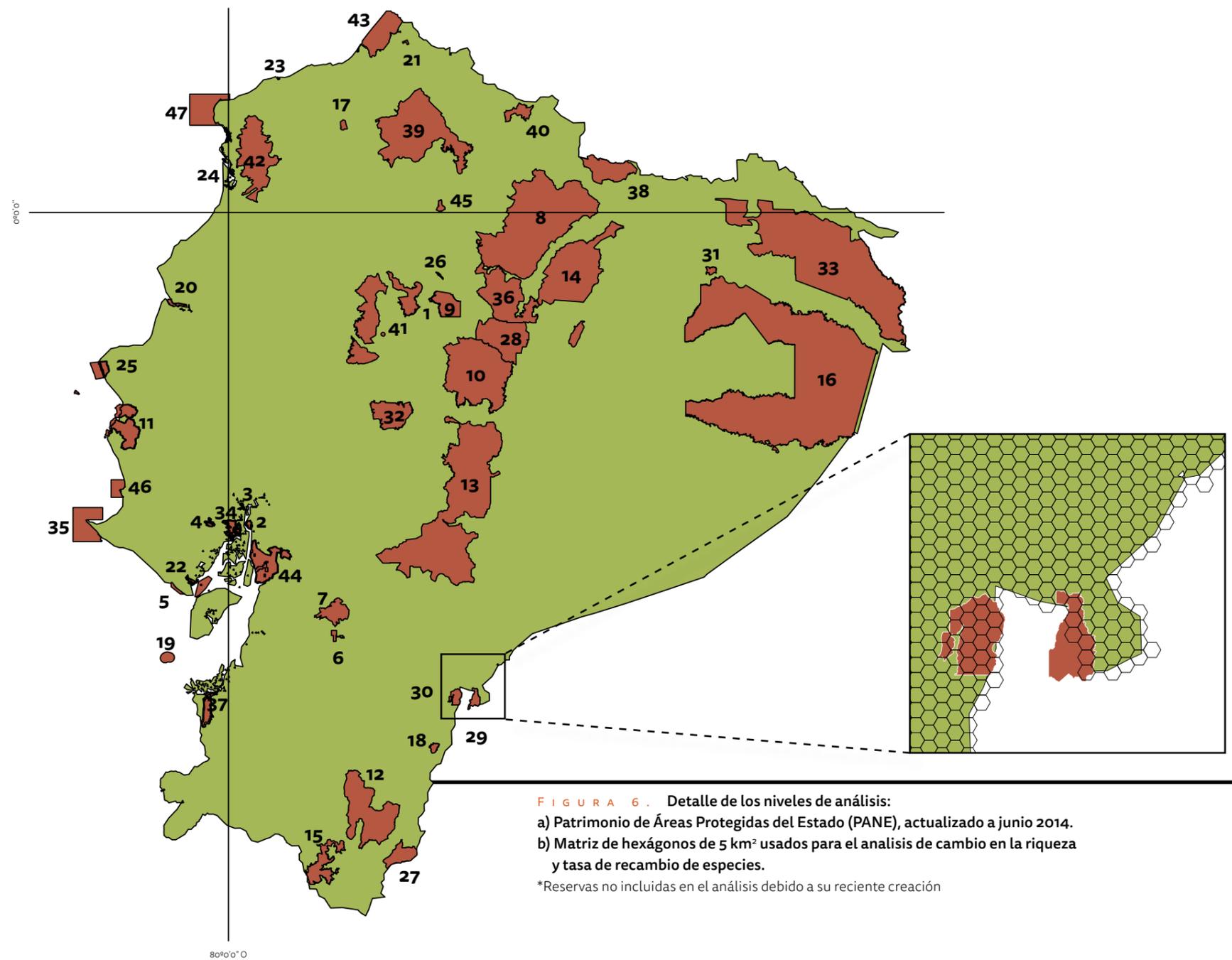


FIGURA 6. Detalle de los niveles de análisis:
 a) Patrimonio de Áreas Protegidas del Estado (PANE), actualizado a junio 2014.
 b) Matriz de hexágonos de 5 km² usados para el análisis de cambio en la riqueza y tasa de recambio de especies.
 *Reservas no incluidas en el análisis debido a su reciente creación

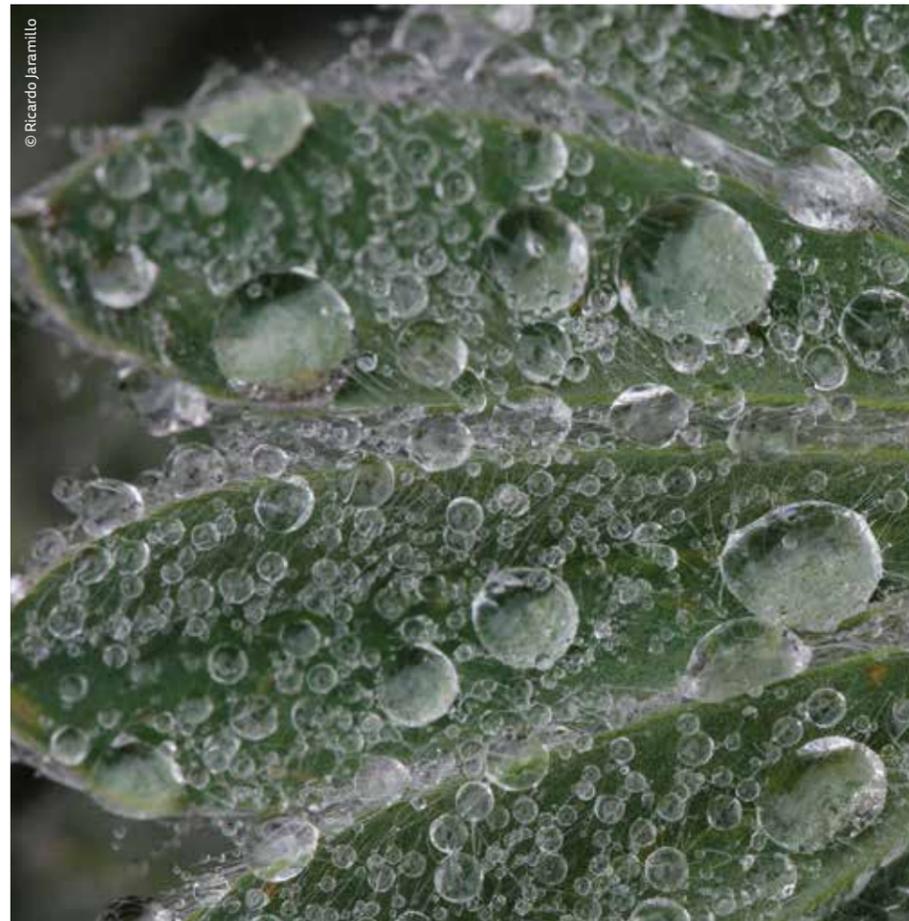
- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | Área Nacional de Recreación El Boliche | 25 | Refugio de Vida Silvestre Pacoche |
| 2 | Área Nacional de Recreación Isla Santay | 26 | Refugio de Vida Silvestre Pasochoa |
| 3 | Área Nacional de Recreación Los Samanes | 27 | Reserva Biológica Cerro Plateado |
| 4 | Área Nacional de Recreación Parque Lago | 28 | Reserva Biológica Colonso Chalupas |
| 5 | Área Nacional de Recreación Playas de Villamil | 29 | Reserva Biológica El Cóndor30 Reserva Biológica El Quimi |
| 6 | Área Nacional de Recreación Quimsacocho | 31 | Reserva Biológica Limoncocha |
| 7 | Parque Nacional Cajas | 32 | Reserva de Producción de Fauna Chimborazo |
| 8 | Parque Nacional Cayambe Coca | 33 | Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno |
| 9 | Parque Nacional Cotopaxi | 34 | Reserva de Producción de Fauna Manglares el Salado |
| 10 | Parque Nacional Llanganates | 35 | Reserva de Producción de Fauna Puntilla de Santa Elena |
| 11 | Parque Nacional Machalilla | 36 | Reserva Ecológica Antisana |
| 12 | Parque Nacional Podocarpus | 37 | Reserva Ecológica Arenillas |
| 13 | Parque Nacional Sangay | 38 | Reserva Ecológica Cofán Bermejo |
| 14 | Parque Nacional Sumaco Napo-Galeras | 39 | Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas |
| 15 | Parque Nacional Yacuri | 40 | Reserva Ecológica El Ángel |
| 16 | Parque Nacional Yasuní | 41 | Reserva Ecológica Los Illinizas |
| 17 | Refugio de Vida Silvestre El Pambilar | 42 | Reserva Ecológica Mache Chindul |
| 18 | Refugio de Vida Silvestre El Zarza | 43 | Reserva Ecológica Manglares Cayapas Mataje |
| 19 | Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara | 44 | Reserva Ecológica Manglares Churute |
| 20 | Refugio de Vida Silvestre Islas Corazón y Las Islas Fragatas | 45 | Reserva Geobotánica Pululahua |
| 21 | Refugio de Vida Silvestre La Chiquita | 46 | Reserva Marina El Pelado |
| 22 | Refugio de Vida Silvestre Manglares El Morro | 47 | Reserva Marina Galera San Francisco |
| 23 | Refugio de Vida Silvestre Manglares Estuario del Río Esmeraldas | | |
| 24 | Refugio de Vida Silvestre Manglares Estuario del Río Muisne | | |

hasta febrero del 2013 (Figura 6a). En este estudio se excluyó al PN Galápagos por no ser una reserva continental y la RM de Galápagos, el RVS Isla Santa Clara, la RM El Pelado, RPF Puntilla Santa Elena y la RM Galera San Francisco por ser áreas marinas.

A nivel de especies, esta actividad se concentró en el análisis de la diferencia entre los modelos de distribución futuros con los presentes (representada por su nicho realizado), lo que permite evaluar el grado de sensibilidad de cada uno de ellas a partir de métricas de impacto. Este método sigue las recomendaciones dadas por Anderson (2013).

A nivel de cada una de las áreas del PANE, las métricas de impacto (p. ej. cambios en la diversidad Alfa y Beta) así como los cambios en los rangos de distribución de las especies modeladas permiten identificar las áreas protegidas más vulnerables a cambios en la representatividad de los grupos biológicos que actualmente albergan en su interior, al mismo tiempo que permiten identificar los grupos de especies más sensibles por la pérdida de su rango climático.

A partir de los modelos de nicho se generaron las diferentes métricas de impacto para los escenarios de emisión



A2A y A1B, para dos modelos de desplazamiento: sin límites y limitado.

Para estimar ganancia y pérdida de especies y posteriormente la tasa de recambio de especies, se utilizó una matriz que cubre la superficie del Ecuador continental (Figura 6b), dividida en 50 684 unidades de análisis (hexágonos de 5 km²). Se utilizó esta unidad de análisis en lugar de píxeles debido a que es la unidad analítica con la que se llevó a cabo el último estudio de vacíos de conservación del SNAP del Ecuador y por lo tanto permite realizar comparaciones futuras entre estos resultados y el estudio referido (Cuesta *et al.*, 2013). Se considera que una especie está presente en un hexágono si al menos un píxel (1 km²) de presencia es registrado en alguno de los aproximadamente cinco píxeles que forman el hexágono. Se considera que una especie está ausente cuando ningún píxel de presencia es registrado en ninguno de los píxeles que conforman el hexágono. La ganancia se cuantifica por la sumatoria de especies que no se encontraban en el presente pero aparecen en los escenarios futuros y se cuantifica la pérdida de especies por medio de la sumatoria de las especies que están en el modelo presente pero desaparecen en los modelos futuros.

Con estos insumos se estimaron las siguientes métricas:

a. Cambio en el rango geográfico a nivel de cada especie (expresado en área y porcentaje del área presente), a partir de estimar el área de permanencia, área ganada y área perdida promedio para cada grupo taxonómico para cada escenario de emisión y desplazamiento.

$$\text{Cambio geográfico} = \text{Área potencial futura} - \text{Área distribución presente} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

$$\text{Porcentaje \% de cambio de área} = \frac{\text{Cambio geográfico} * 100}{\text{Área distribución presente}} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

$$\text{Cambio geográfico} = \text{Área potencial futura} - \text{Área distribución presente} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

$$\text{Ganancia} = \text{Área futura} - (\text{Área futura} - \text{Área presente}) \quad [\text{Ecuación 4}]$$

$$\text{Pérdida} = \text{Área presente} - (\text{Área futura} - \text{Área presente}) \quad [\text{Ecuación 5}]$$

b. Porcentaje de cambio al interior de cada área protegida de la riqueza de especies y para cada grupo de especies.

$$\text{Porcentaje \% de cambio de riqueza} = \frac{(\text{Riqueza futura} - \text{riqueza presente}) * 100}{\text{Riqueza presente}} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

c. Tasa de recambio a nivel de especie y área protegida a nivel de hexágono.

$$\text{Recambio spp} = 100 * \frac{(\text{Riqueza futura} - \text{riqueza presente}) * 100}{\text{Riqueza presente}} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Estas métricas se generaron a través de una rutina desarrollada para la plataforma de análisis R (R Core Team, 2014), a través de la cual, a partir de los mapas binarios de distribución realizada presente y potencial futura para los dos escenarios de emisión (A2A y A1B) y considerando una capacidad de desplazamiento sin límites y limitada, se realizó un análisis para evaluar la presencia de cada especie sobre la matriz de hexágonos de 5 km² que cubre el territorio continental del país.

La sumatoria del número de especies ganadas y pérdidas se obtiene del análisis de un reporte (matriz binaria producida por la rutina en R), de la presencia o ausencia de cada una de las especies de cada grupo, en cada uno de los hexágonos, para los tres escenarios (presente, A1B y A2A), como se ilustra en la Tabla 5.

Posteriormente, se realizó un análisis específico por grupo taxonómico para cada hexágono, para determinar si cada especie analizada (en el presente) se mantuvo en los escenarios futuros o se extinguió (Tabla 5, hexágonos H1 y H2/H3 respectivamente). Así mismo, se determinó cuantas especies nuevas se reportan en cada uno de los escenarios futuros para cada hexágono bajo el escenario de desplazamiento sin límites (Tabla 5, hexágonos H4 y Hi). Se realizó el mismo análisis pero para todos los

T A B L A 5 . Matriz binaria que reporta la presencia o ausencia de cada especie modelada en cada una de las celdas de análisis (hexágonos) para las condiciones climáticas actuales (presente) y los dos escenarios de cambio futuro, A1B y A2A.

HEXÁGONO	PRESENTE	ESCENARIO	
		A1B	A2A
H1	1	1	1
H2	1	0	0
H3	1	1	0
H4	0	1	1
Hi	0	0	1

Los números 1 representan presencia y los números 0 ausencia de la especie en dicho hexágono.

grupos de manera integrada para derivar métricas de riqueza total para cada uno de los hexágonos para cada escenario de emisiones.

Finalmente, se estimó el recambio en la composición de la comunidad de especies (Ecuación 7) para el escenario de desplazamiento sin límites como un criterio adicional de análisis.

Estas métricas fueron proyectadas en mapas para visualizar geográficamente el impacto para cada escenario de estudio.



Resultados

Modelos de nicho

Se construyeron modelos de nicho presentes y futuros para un total de 667 especies pertenecientes a cinco grupos taxonómicos: anfibios, aves, angiospermas, helechos y reptiles. Las aves son el grupo con mayor cantidad de especies (263), seguidas por las angiospermas (168), anfibios (102), reptiles (82) y helechos (52).

Tabla 6. Área promedio (en hectáreas) de los modelos de nicho en condiciones actuales para cada grupo taxonómico modelado

GRUPO	N	PROMEDIO (HA)	DE ± (HA)
Anfibios	102	3 221 306	2 364 127
Angiospermas	168	4 318 436	2 585 381
Aves*	262	2 452 857	2 236 612
Helechos*	52	4 645 417	2 516 137
Reptiles	81	4 122 878	3 476 261

Los grupos con un asterisco reportan que alguno de los valores extremos superiores (outliers) fueron excluidos del análisis. Las especies excluidas son *Pteris propinqua*, *Patagioenas subvinacea*.

En general *MaxEnt* tuvo un buen desempeño al modelar el nicho de las especies seleccionadas para todos los grupos (Figura 5). El estadístico AUC de los puntos de validación mostró un alto nivel de exactitud de los modelos de predicción para aves (media = 0,91; DE = 0,06) así como para plantas (media = 0,93; DE = 0,05), anfibios (media = 0,92; DE = 0,04) y reptiles (media = 0,92; DE = 0,05).

Las especies de los grupos taxonómicos helechos, angiospermas y reptiles reportan una distribución promedio mayor que los anfibios y las aves en las condiciones climáticas actuales (Tabla 6, Figura 7). Una de las razones es que en el caso de los anfibios y las aves, varias de las especies corresponden a especies con algún grado de amenaza que por lo general suelen ser especies con rangos geográficos restringidos o especies endémicas.

En el caso de los anfibios el 22 % (n = 22) de las especies tuvo un rango menor al millón de hectáreas y 18 especies (40% del total de las especies) un rango inferior a los 2 millones de hectáreas. Las especies restantes tuvieron un rango superior a los 2,6 millones, de las cuales solo el 10 % superior (n = 10) presentaron una superficie mayor a los 7 millones (Tabla 6). Un patrón similar se observó para las aves, donde el 30 % (n = 79) tuvo una distribución inferior al millón de hectáreas y 48 especies

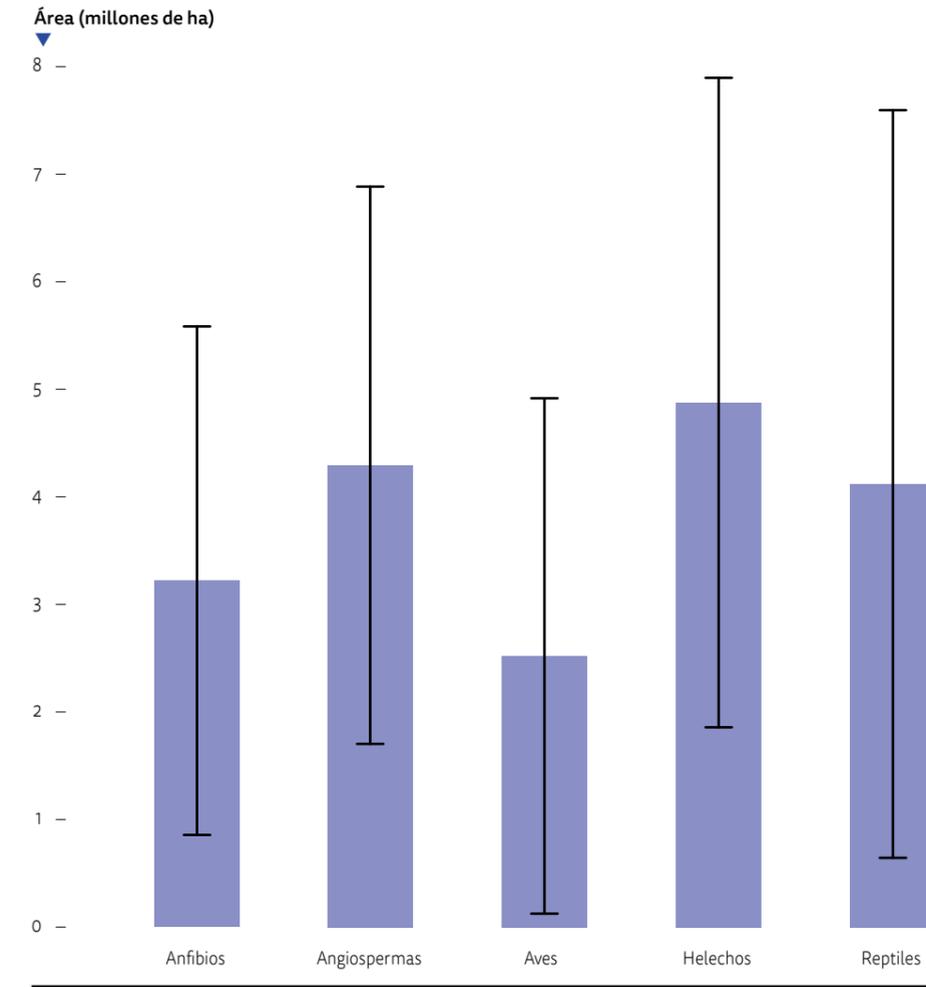


Figura 7. Distribución actual (en hectáreas) de los grupos taxonómicos modelados. Las barras representan el área promedio de los modelos y la barra de error representa una desviación estándar.

más o menos de 1,6 millones (equivalente al 50 % de las especies modeladas). Solo el 25 % de las especies tuvo un área de distribución superior a las 3,5 millones de hectáreas. Los reptiles presentaron un patrón similar a los grupos previos. El 25 % (n = 20) tuvo un área menor al millón de hectáreas y, adicionalmente, 15 especies más tuvieron una distribución entre 1 y 2 millones de hectáreas (Figura 7). Por el contrario, las especies de los grupos de angiospermas y helechos tuvieron una distribución mucho más amplia. En el caso de las angiospermas solo el 8 % (n = 13) presentó una distribución inferior al millón de hectáreas mientras que el 50 % de las mismas (n = 84) tuvo un rango de distribución superior a los 4 millones.

Sensibilidad de especies al cambio climático

Los impactos, a nivel de especies, reportaron tendencias esperadas para los dos escenarios de desplazamiento empleados. Los escenarios con desplazamiento sin límite sugirieron una expansión del nicho climático de las especies; el promedio de cambio es siempre positivo en los dos escenarios de emisión empleados (Tabla 7). Estos cambios pueden llegar a representar una expansión de distribución de hasta el 300 % para las aves en los

dos escenarios. Por el contrario, el escenario de desplazamiento limitado reportó una disminución del área de distribución de todos los grupos taxonómicos para los dos escenarios de emisión. Igualmente al caso anterior, existieron diferencias pequeñas en los impactos proyectados entre los escenarios A1B y A2A, especialmente para el escenario de desplazamiento limitado (Tabla 7).

Las métricas de cambio en los rangos de distribución sugirieron una diferencia importante entre la sensibilidad de los grupos modelados. Las angiospermas en general aparecieron como el grupo más sensible. En los

escenarios de desplazamiento sin límites, su expansión promedio en los dos SRES no superó el 20% mientras que en los escenarios de desplazamiento limitado, su expansión estuvo entre las más altas (Tabla 7).

Un escenario similar se proyectó para los anfibios, los cuales tuvieron un incremento moderado en el escenario A1B, bajo el supuesto de desplazamiento sin límites y un incremento considerable en el escenario A2A. No obstante, incluso en estos dos escenarios de desplazamiento sin límites, un grupo importante de anfibios proyectaron una reducción en su rango de distribución. Un total

Tabla 7. Valores medios y de dispersión de cambio en el rango de distribución de los grupos de especies, expresados en porcentaje de cambio

GRUPO	N	ESCENARIO A1B		ESCENARIO A2A	
		SIN LÍMITES	LIMITADA	SIN LÍMITES	LIMITADA
Anfibios	102	54,2 (±176)	-29,1 (±25)	138,2 (±821)	-28,1 (±24)
Angiospermas	168	17 (±97)	-27,2 (±23)	12,6 (±118)	-30,7 (±25)
Aves*	263	298 (±1224)	-17,2 (±18)	297 (±1299)	-19,5 (±20)
Helechos	52	250,6 (±1333)	-27,1 (±25)	236,9 (±1231)	-28,8 (±24)
Reptiles*	82	217 (±1056)	-36 (±25)	128,7 (±470)	-36,9 (±26)

de 55 especies de las 102 reportaron una contracción severa en los cuatros escenarios, implicando que estas especies podrían ser consideradas como prioridad de conservación. En muchos casos se trata de especies listadas en peligro o vulnerables por su rango restringido inferior a 5 000 km². Este es el caso de especies como *Gastrotheca litonedis*, *Allobates kingsburyi*, *Hyloxalus toachi* y *Epipedobates tricolor*, que además se encuentran distribuidas por fuera de las áreas protegidas, haciéndolas más expuestas a extinciones locales por otras presiones antrópicas como la pérdida de hábitat por deforestación. Valores similares se reportaron para los reptiles mientras que los grupos más resilientes a estos impactos serían las aves y los helechos (Figura 8).

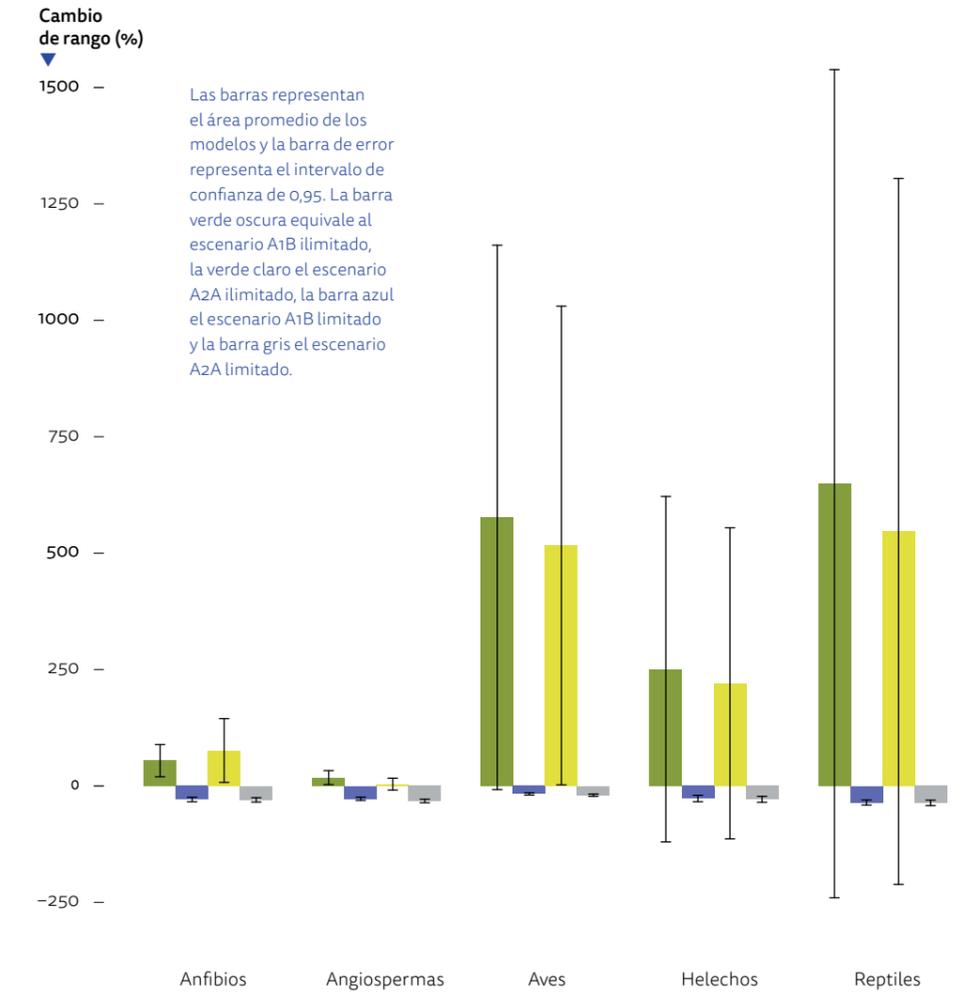


Figura 8. Cambio en el rango de cada grupo taxonómico para cada escenario de emisión (A2A, A1B), para los escenarios de dispersión ilimitada y dispersión limitada.

Los escenarios de desplazamiento limitado proyectaron impactos muy grandes sobre las especies en el Ecuador. En los dos escenarios, los cinco grupos presentaron una reducción del área climática óptima de todas las especies. El grupo de reptiles y anfibios proyectaron una reducción promedio de 36 y 29 %, respectivamente, siendo los dos grupos más afectados. Las aves por el contrario, fueron el grupo con menor afección con 17 y 19 % de reducción para los escenarios A1B y A2A, respectivamente (Figura 9). Estas reducciones sugieren muchos eventos de extinciones locales con posibles implicaciones en la funcionalidad de muchas de estas áreas. El cambio de condiciones ambientales aparte de estar ligado a cambios en los nichos climáticos de las especies, tiene implicaciones importantes en afecciones adicionales en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas andinos, lo cual podría incrementar considerablemente los valores de pérdida de diversidad (Tovar *et al.*, 2013).

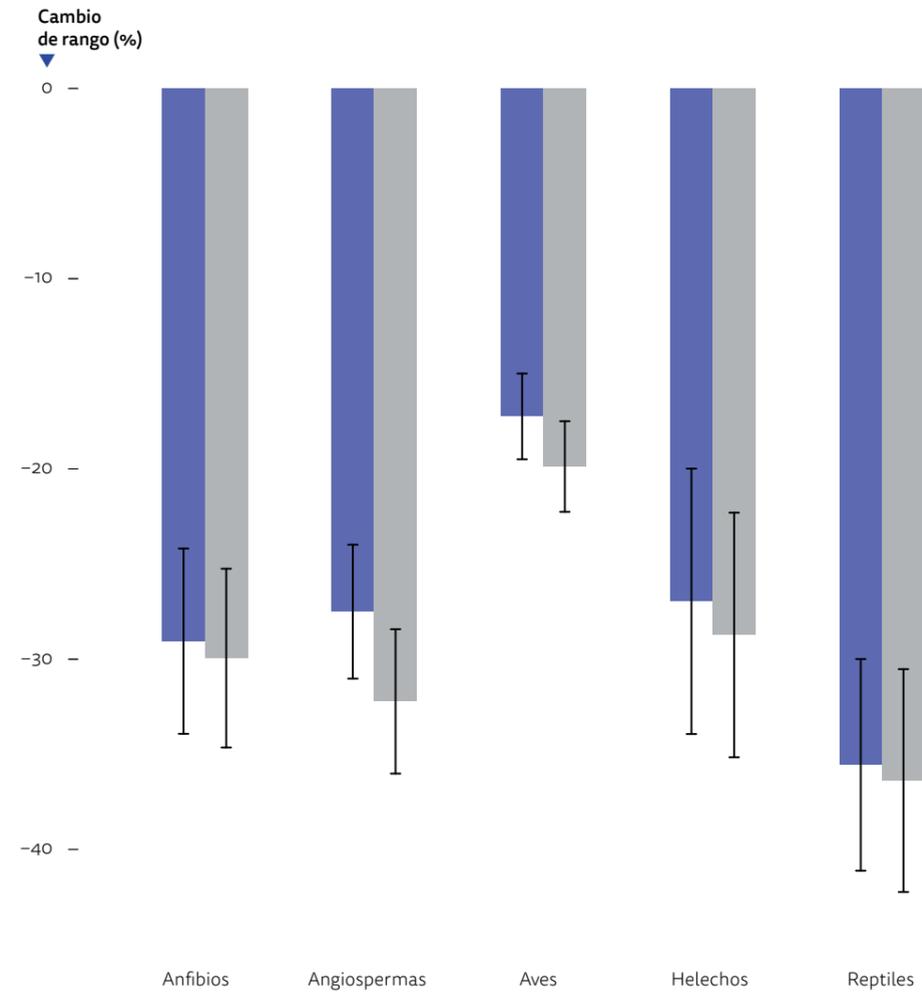


FIGURA 9. Cambio en el rango de las especies en los cinco grupos modelados en el escenario de emisión A1B (barras azules) y A2A (barras grises) para el corte de tiempo 2050 considerando solo el escenario sin capacidad de dispersión.

Cambio en los patrones de diversidad en el Ecuador continental

Los análisis de pérdida de especies por grupos taxonómicos también revelaron diferencias importantes entre ellos pero mostraron un patrón muy similar entre los dos escenarios de emisión. En general, el escenario A2A fue ligeramente más severo que el escenario A1B. Los grupos que reportan una pérdida mayor de especies fueron las angiospermas y los reptiles (Figura 10).

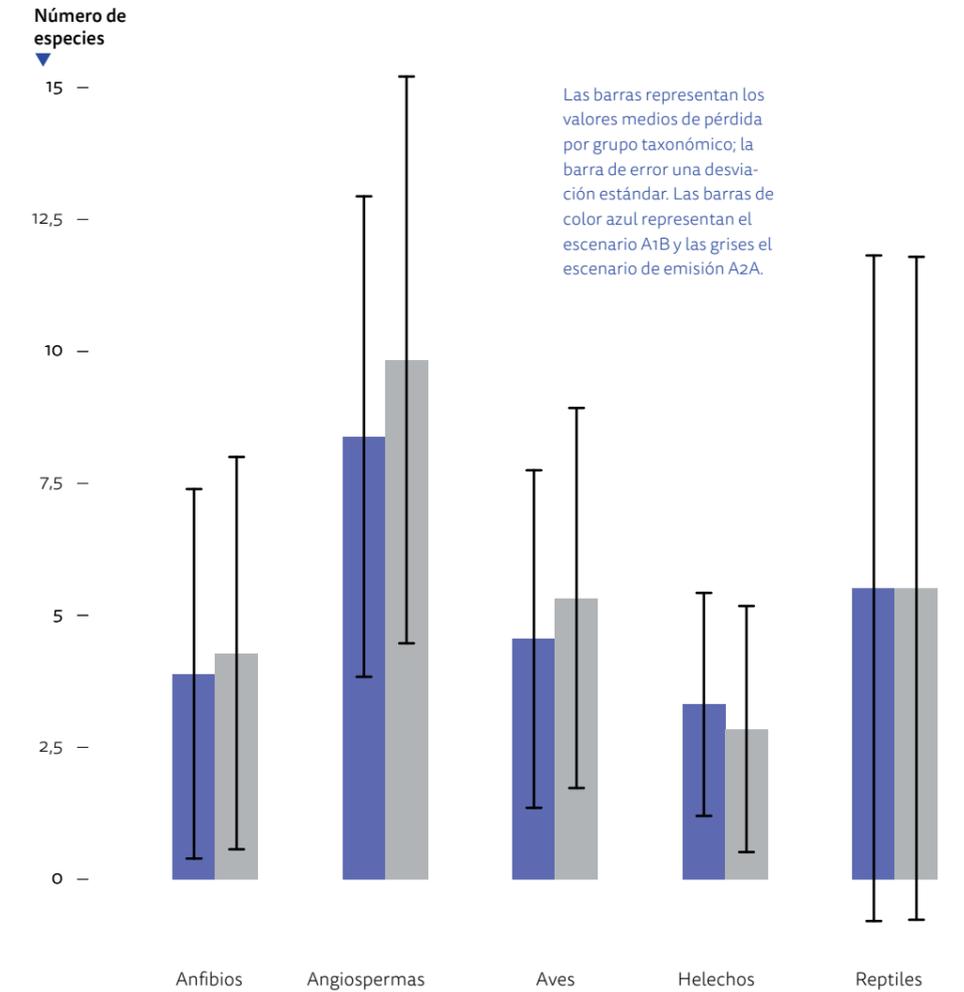


FIGURA 10. Número de especies perdidas por cada 500 ha en el Ecuador continental bajo dos escenarios de emisión.

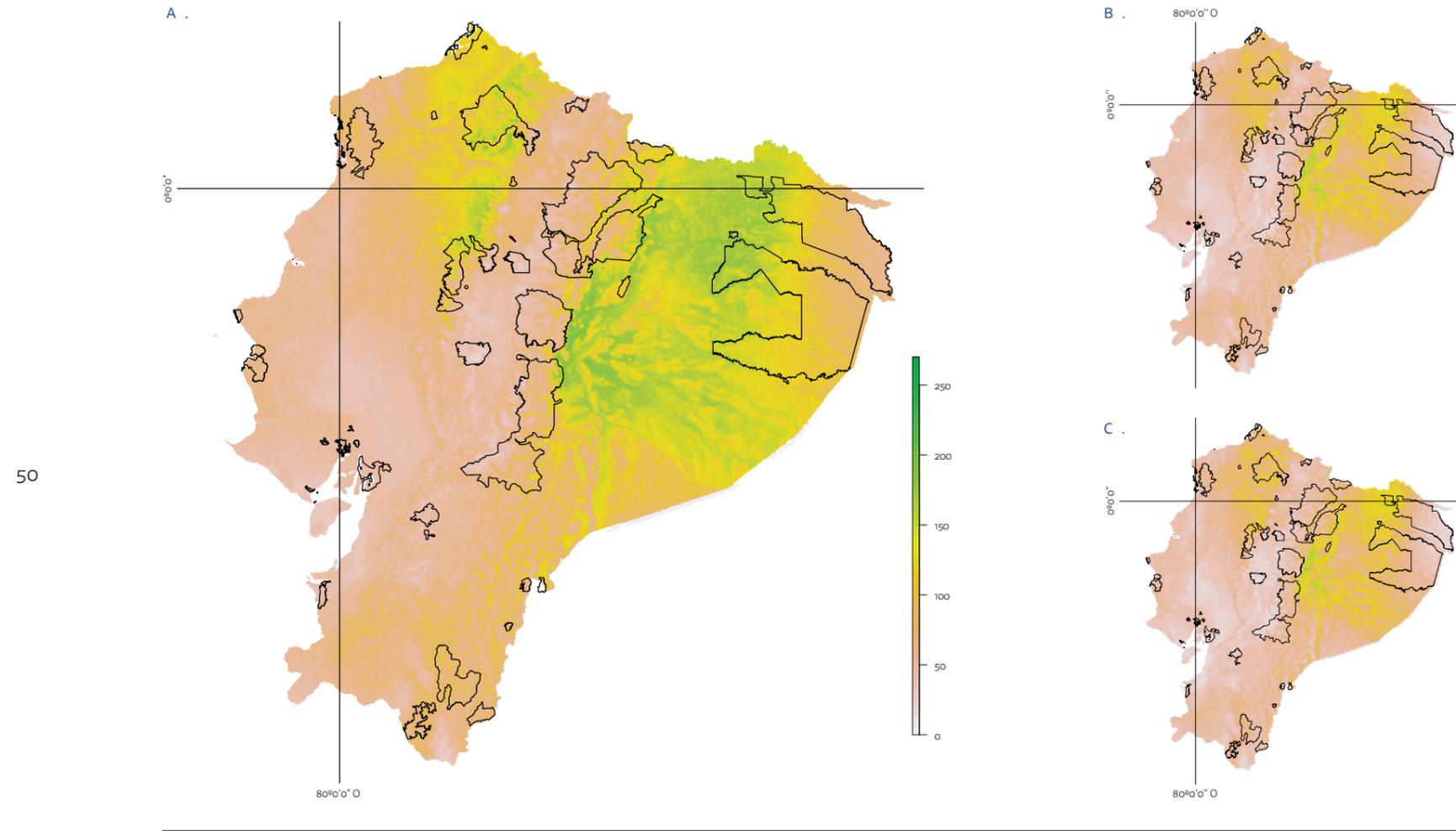


FIGURA 11. Patrones de riqueza de especies en condiciones climáticas actuales y futuras para dos escenarios de emisión (A1B y A2A) para el período 2050 considerando un escenario de desplazamiento limitado.

El recambio en la comunidad biótica debido a extinciones locales y a la colonización de nuevas áreas por expansión del rango climático, muestra potenciales cambios futuros en la configuración de la riqueza biológica del Ecuador (Figura 11).

Las pérdidas proyectadas fueron considerables, en particular para la vertiente externa de los Andes y la Amazonía (Figuras 12a y b para anfibios, por ejemplo). La nueva configuración de acuerdo a los escenarios modelados proyectaron una reducción considerable de áreas donde se concentran actualmente alrededor de 180 especies por cada hexágono. Un porción importante de estas áreas pasaron a tener entre 100 y 120 especies mientras que las zonas restantes ubicadas en el piedemonte andino incrementaron su riqueza de especies a valores alrededor de 280 especies. Estas áreas se concentraron en el piedemonte andino en particular en las áreas de Sumaco, Llanganates y el nor-oriente de Sangay y sus zonas de amortiguamiento (Figura 11).

Estos patrones generales confirmaron un desplazamiento vertical ascendente de las especies de este a oeste como ha sido ya reportado en datos empíricos observados en parcelas permanentes de la amazonía andina peruana y otros ejercicios de modelamiento similares para especies y ecosistemas tropicales (Feeley *et al.*, 2011; Ramírez-Villegas *et al.*, 2014; Tovar *et al.*, 2013).



© Juan Carlos Narváez

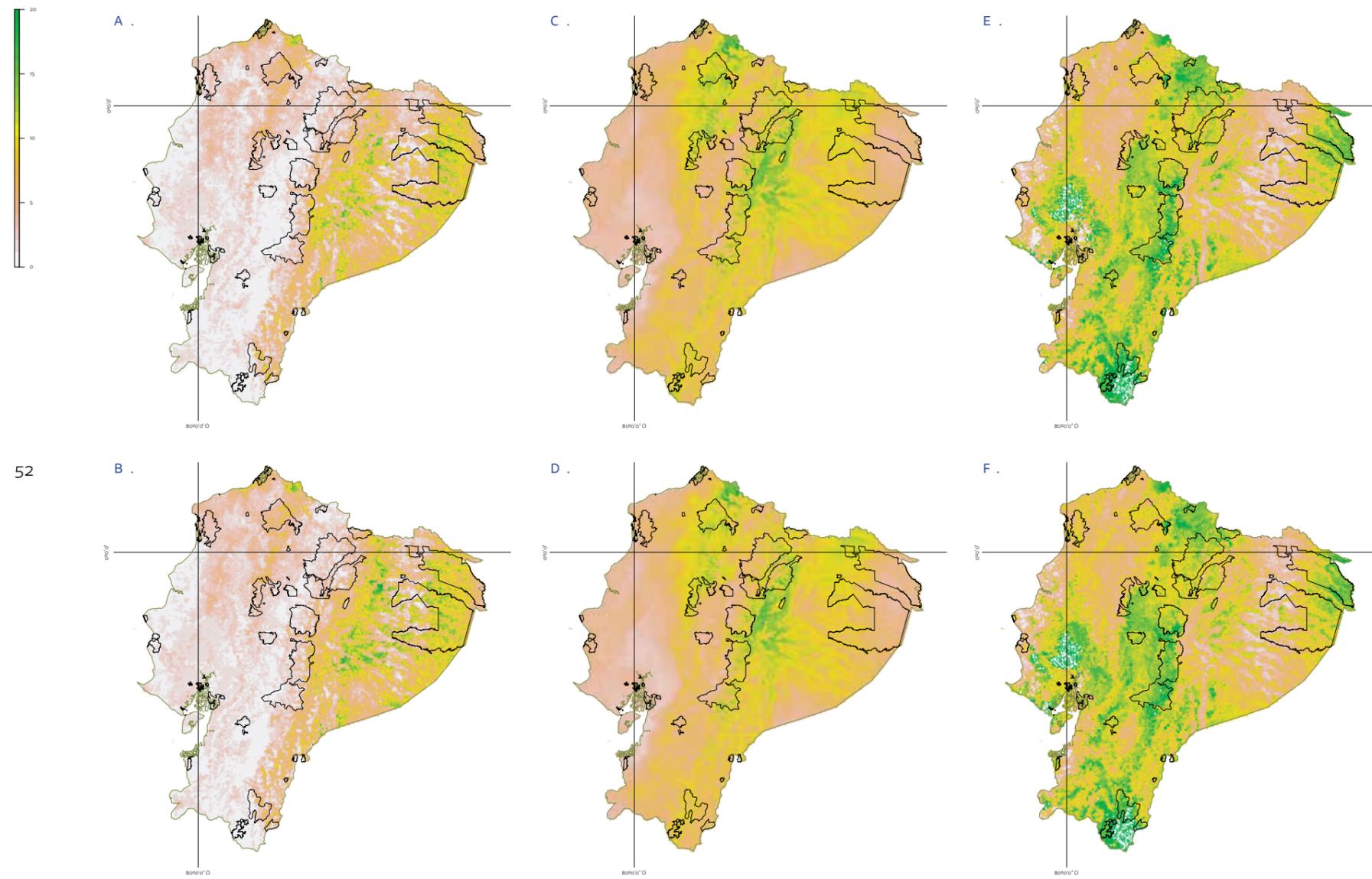


FIGURA 12. Mapas de los cambios en diferentes parámetros de estudio de la diversidad de anfibios en los dos escenarios de emisiones A1B (arriba) y A2A (abajo) para el escenario de desplazamiento sin límites: pérdida de especies (a y b), porcentaje de pérdida de especies (c y d) y tasa de recambio (e y f).

Es importante mencionar que cada uno de los parámetros estudiados de cambios en la riqueza de especies (pérdida de especies, porcentaje de pérdida de especies y tasa de recambio) muestran efectos potenciales en zonas geográficas diferentes dentro de cada uno de los grupos. Por ejemplo, para los anfibios, en el escenario de emisiones A1B y dispersión sin límites, el mapa de pérdida de especies muestra mayores pérdidas en el pie de monte oriental y la amazonia baja norte (Figura 12a), mientras que los mayores porcentajes de pérdida se presentan en las estribaciones de los Andes orientales centro y norte y de los Andes occidentales norte (Figura 12c); mientras que una alta tasa de recambio de especies es evidente a lo largo de todo el callejón interandino, en la cordillera del Cóndor, la Amazonía inundable norte en la frontera con Perú y Colombia y en la zona costera en los límites de las provincias del Guayas, Santa Elena, Manabí y Los Ríos (Figura 12e). Un patrón similar se observa para el escenario de emisiones A2A (Figuras 12b, d y f).

Los patrones de pérdidas espaciales de la diversidad entre los grupos fueron muy diferentes entre sí. Los anfibios reportaron valores promedio de una pérdida media de 3,9 especies por hexágono ($\pm 3,5$) para el escenario A1B y un promedio de 4,1 especies por hexágono ($\pm 3,6$) para el escenario A2A. Si bien el escenario A2A fue un poco más agresivo, las diferencias entre estos dos escenarios no fueron significativas. Las áreas donde se concentraron las pérdidas se ubicaron en áreas de mucha importancia para la biodiversidad del Ecuador Continental (ver Cuesta- *et al.* (2013) para detalles); estas disminuciones podrían implicar pérdidas de entre el 80 y 100% de la riqueza presente, principalmente en algunas zonas de la RPF Cuyabeno, y los Parques Nacionales Yasuní, Llanganates, Sangay y Podocarpus (Figuras 12c y d).

Las angiospermas reportaron una media de pérdida de 8,4 A1B ($\pm 4,5$) y 9,3 ($\pm 5,1$) para el escenario A2A. Para este grupo las áreas de pérdida fueron mucho más focalizadas, con los principales puntos concentrados en el PN Yasuní y la RPF Cuyabeno, en los dos escenarios de emisión modelados. Adicionalmente, otras áreas importantes fueron la

zona occidental del PN Sangay y el PN Cajas. Otra de las zonas afectadas pero en menor grado fue la Cordillera de Chilla y las RE Cayapas-Mataje y Mache-Chindul. Los mayores porcentajes de pérdida de especies con respecto al presente se encuentran en la RPF Chimborazo y las zonas sur occidentales del PN Sangay (Figura 13).

FIGURA 13. Porcentaje de pérdida de especies de angiospermas por hexágono para el escenario A1B (izquierda) y el escenario A2A (derecha) en el escenario de desplazamiento sin límites.

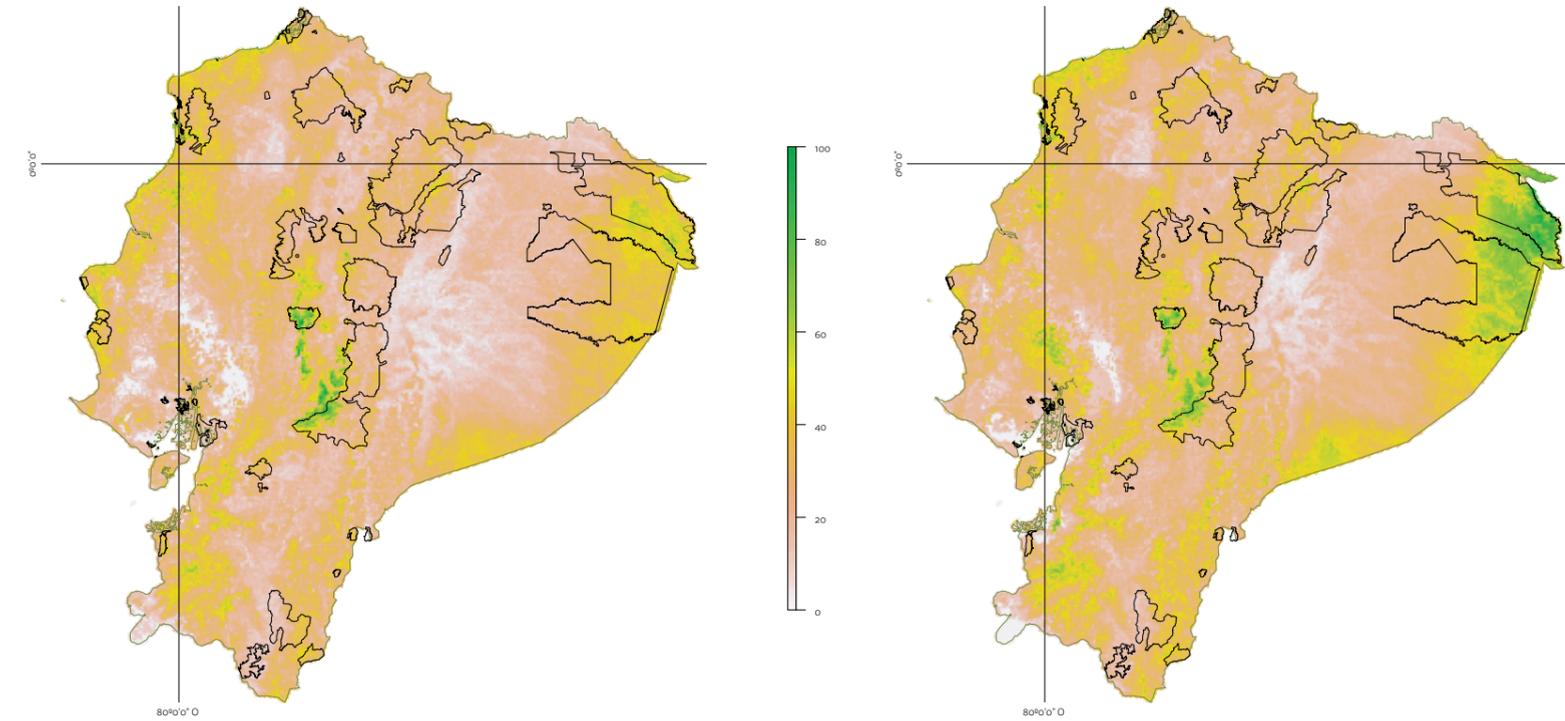
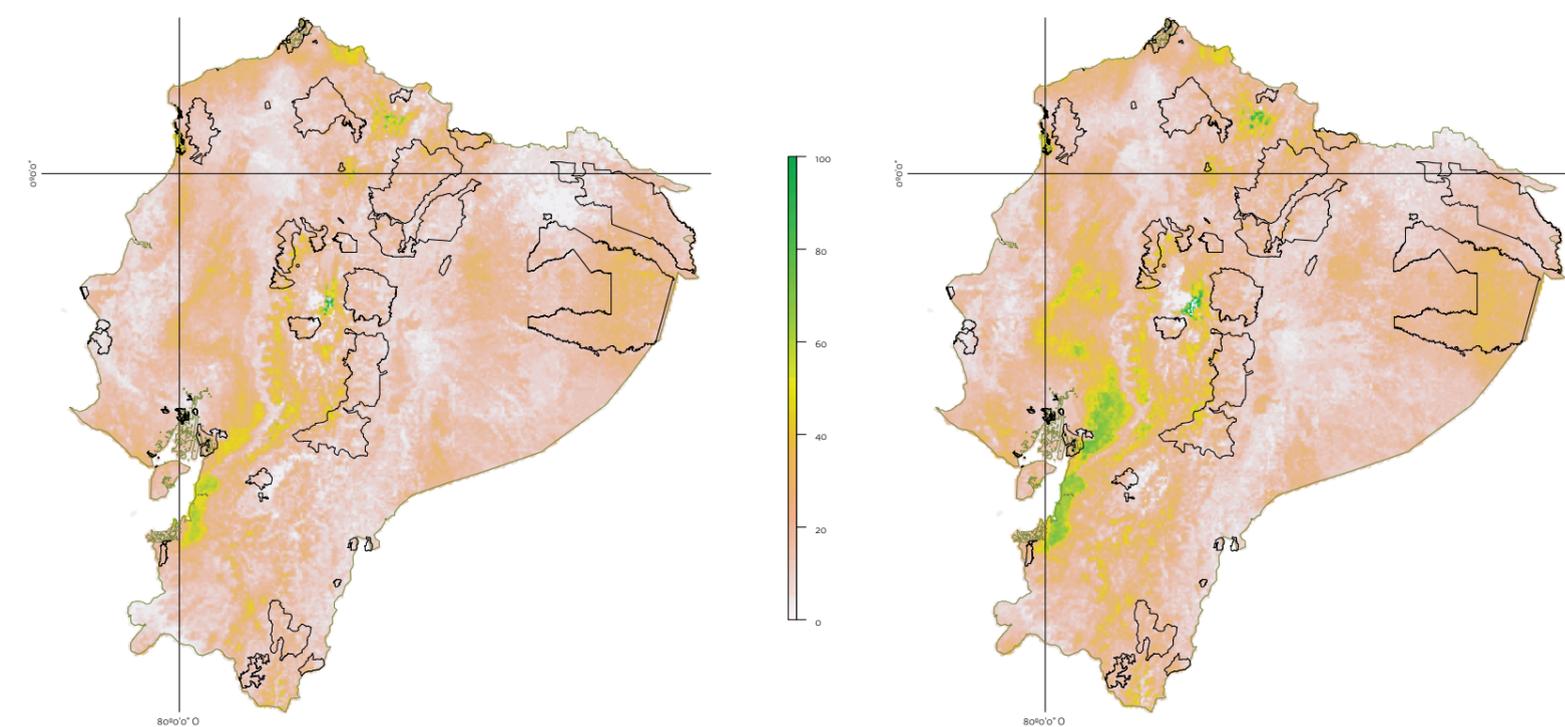


FIGURA 14. Porcentaje de pérdida de especies de aves por hexágono para el escenario A1B (izquierda) y el escenario A2A (derecha) en el escenario de desplazamiento sin límites.

Para las aves se proyectó una pérdida promedio de 4,6 y 5,1 especies para el escenario A1B y A2A, respectivamente, en áreas localizadas en los valles interandinos de la cordillera occidental del Ecuador y en los bosques secos de Guayas y El Oro, zonas donde también se observa los mayores porcentajes de pérdidas de especies para este

grupo (alrededor del 60%; Figura 14). Una de las áreas afectadas del PANE fue Manglares-Churute y sus alrededores. En el caso de este grupo, muchas de las áreas de mayor impacto reflejaron los patrones de endemismo de las especies.



Los modelos de distribución futura para el grupo de helechos reportaron una pérdida de especies más generalizada en todo el país. Para el modelo A1B, la media de especies perdidas por hexágono fue de 3,3 ($\pm 2,1$) mientras que para el escenario A2A la media fue de 2,9 ($\pm 2,3$). Este fue el único caso donde la pérdida de especies proyectada es mayor en el escenario A1B respecto del escenario A2A. En

este grupo las áreas de pérdida mayores se ubicaron a lo largo de la Costa del Ecuador en la cordillera costera del Ecuador donde las áreas protegidas más afectadas fueron el PN Machalilla, la RVS Pacoche y Mache Chindul. En la Sierra las áreas más afectadas fueron la RE Cotacachi Cayapas, la RE Los Illinizas y una porción grande de la sierra sur-occidental donde no existen áreas protegidas.

FIGURA 15. Porcentaje de pérdida de especies de helechos por hexágono para el escenario A1B (izquierda) y el escenario A2A (derecha) en el escenario de desplazamiento sin límites.

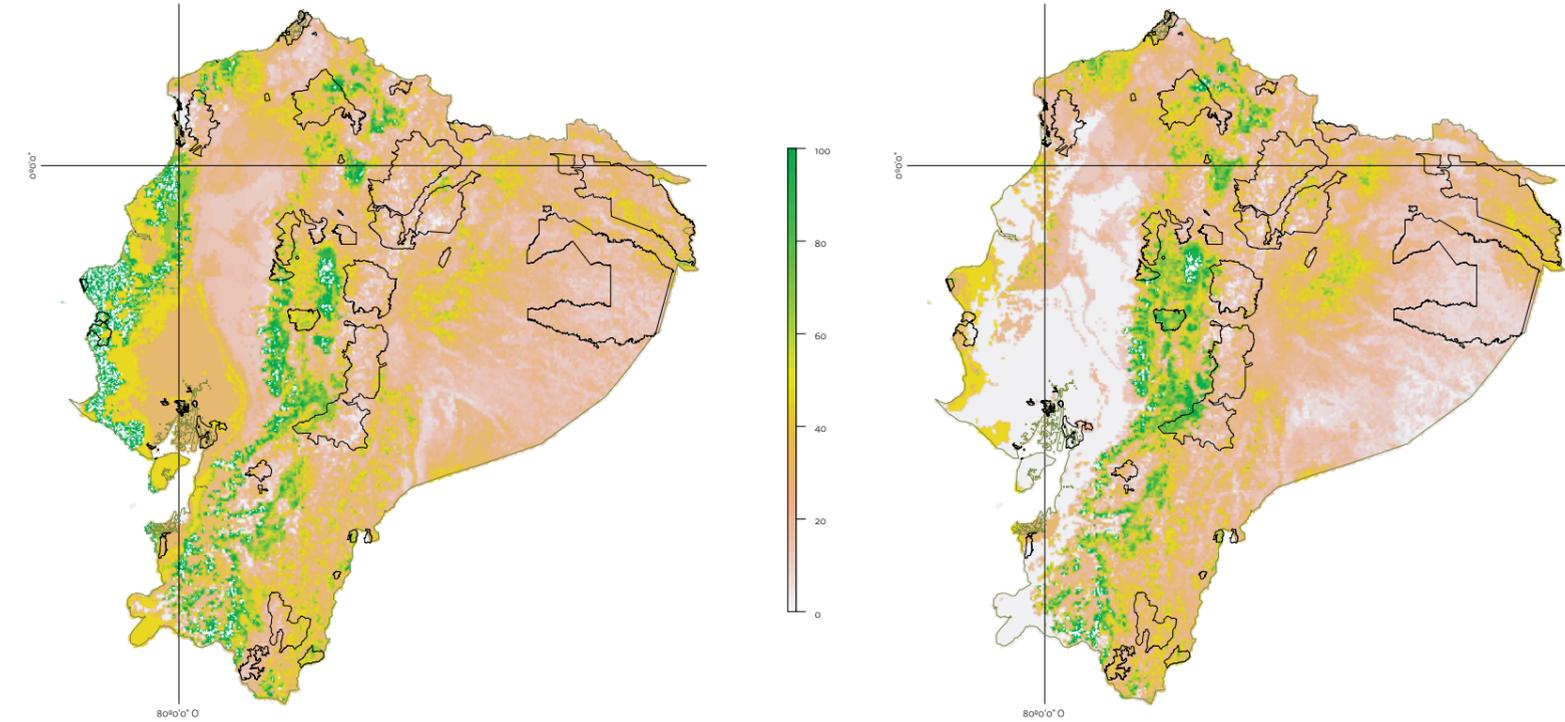


FIGURA 16. Porcentaje de pérdida de especies de reptiles por hexágono para el escenario A1B (izquierda) y el escenario A2A (derecha) en el escenario de desplazamiento sin límites.

Este patrón es similar con respecto al porcentaje de especies perdidas con respecto al futuro (Figura 15).

Finalmente, los reptiles tuvieron un valor promedio de pérdida de 5,5 especies por hexágono en ambos escenarios de emisión. Las áreas de mayor pérdida se concentraron en la vertiente andino-amazónica con especial énfasis en

el PN Yasuní, la RPF Cuyabeno y el abanico del Pastaza. Adicionalmente, las reservas que contienen importantes remanentes de bosques andinos y páramos del norte del Ecuador reportaron pérdidas sustanciales, en particular PN Sumaco, la RE Cayambe Coca, la RE Cofán-Bermejo, RE Antisana, PN Llanganates y PN Sangay (Figura 16). Estas mismas reservas, incluyendo al PN Podocarpus muestran

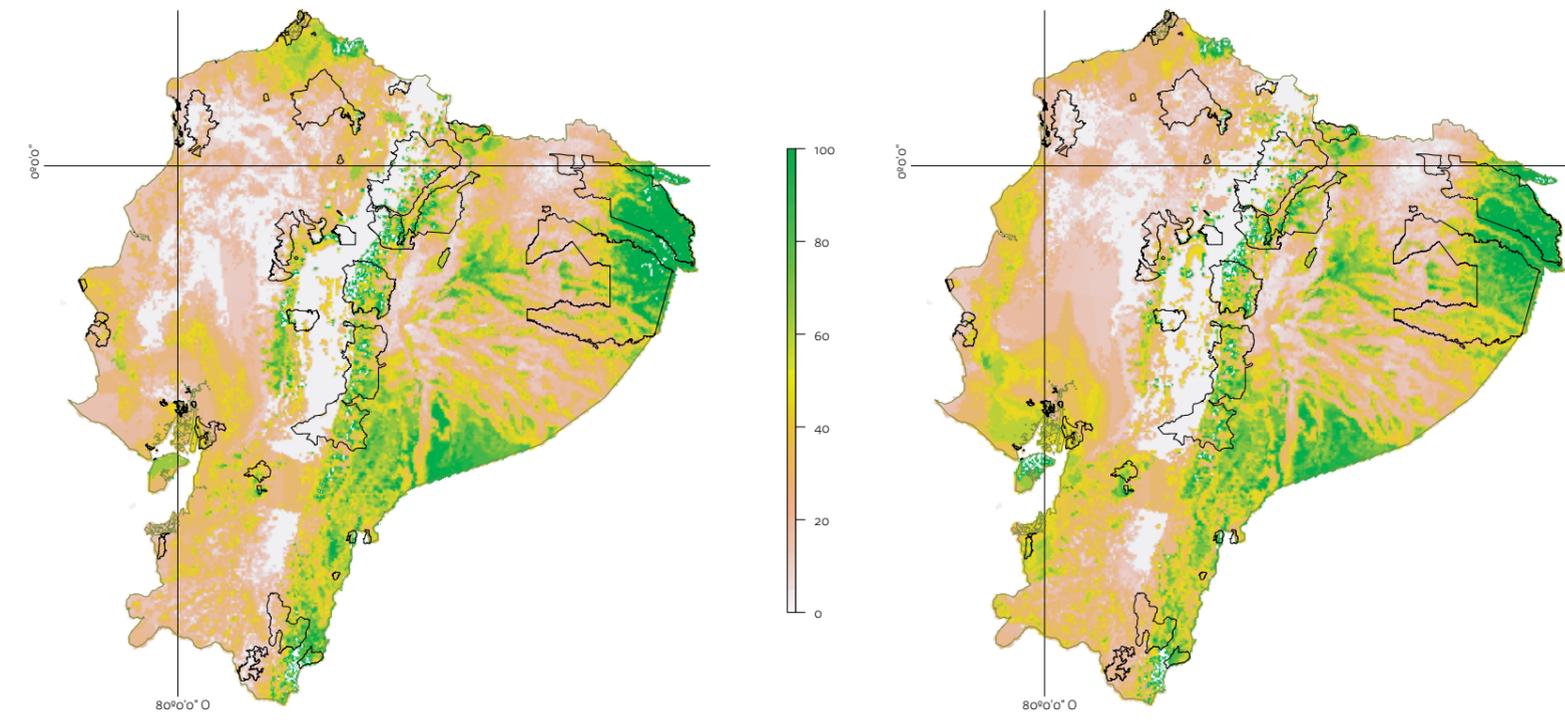
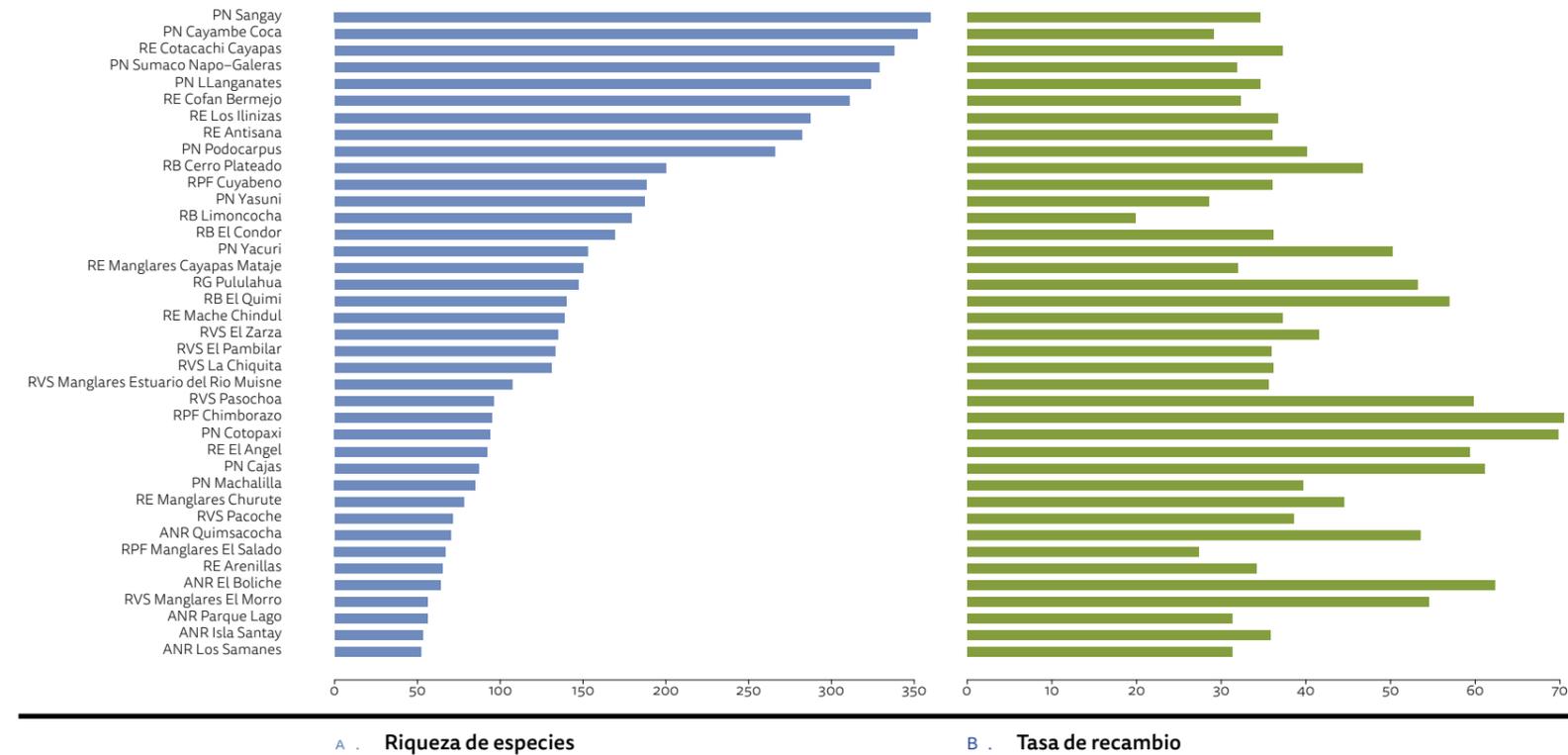


FIGURA 17. Diferencias entre las métricas de análisis de los potenciales efectos del cambio del clima para el escenario de emisiones A1B bajo el escenario de desplazamiento sin límites. El orden de las reservas para los paneles b, c y d es el mismo que para el panel a.

zonas con porcentajes de pérdida de especies alrededor del 100% de la riqueza presente.

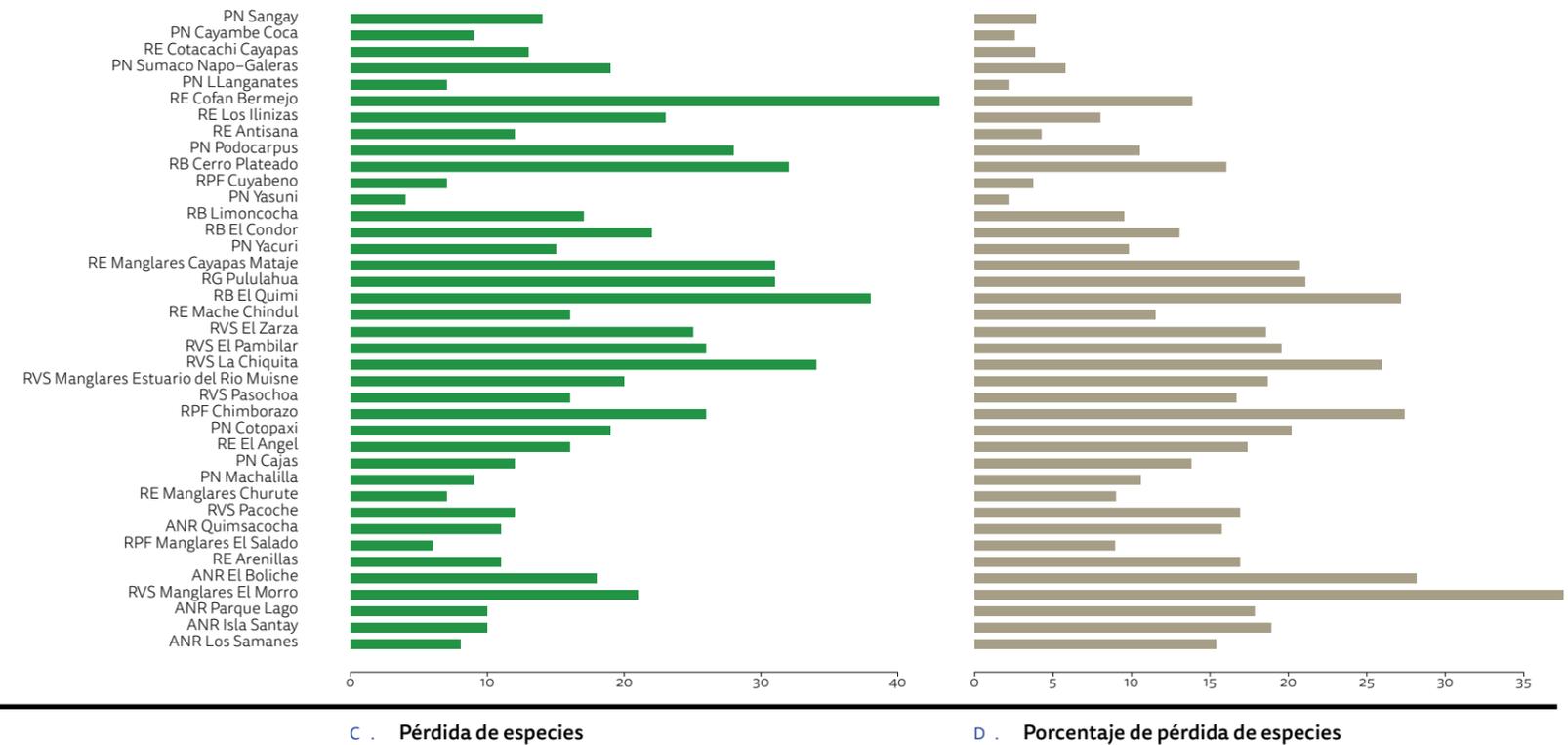
A nivel de áreas protegidas, es importante mencionar que no se encontraron patrones comunes entre todas

las métricas de impacto del cambio del clima (Figura 17). Cada uno de los valores máximos o mínimos de los parámetros estudiados, en general, no correspondieron a las mismas reservas del PANE para cada análisis y ese patrón fue común entre los dos escenarios de emisiones.



Por ejemplo, para el escenario de desplazamiento sin límites en el escenario A1B (Figura 17b), la tasa de recambio fue mayor en reservas de los altos Andes como la RPF Chimborazo y el PN Cotopaxi, mientras que la pérdida de especies fue más evidente en áreas pequeñas del PANE,

como las RE Cofán Bermejo y El Quimi (Figura 17c) y, finalmente, el porcentaje de pérdida de especies fue poco representativo para las áreas con mayor riqueza de especies y lo contrario para las especies con poca riqueza presente (Figuras 17a y d).



Uno de los parámetros que más atención debe recibir es la pérdida de especies que ocurrirá en todos los cuatro escenarios estudiados (Tabla 8), a pesar de que la riqueza neta futura (para la mayoría de reservas en el escenario de desplazamiento sin límites) aumentaría (Tabla 9). Las áreas más afectadas por pérdida de especies fueron reservas pequeñas como la RPF Chimborazo, que en los cuatro escenarios proyectados perdió especies en un rango de 27,94 a 40,2 por ciento al igual que la RB El Quimi, la RVS Manglares El Morro, la ANR El Boliche y el PN Cotopaxi (Tabla 8). De igual forma, reservas como el PN Cotopaxi, RPF Chimborazo o el PN Cajas, reportaron valores altos de incremento en la riqueza de especies en el escenario de desplazamiento sin límites (sobre el 100 % de la riqueza presente para los dos escenarios de emisiones y el escenario de desplazamiento sin límites). Estos resultados sugieren tasas de cambio importantes en la configuración de las comunidades bióticas contenidas al interior de las APs. Esto podría generar efectos secundarios de extinciones locales o asincronías espaciales entre procesos ecosistémicos con la fenología especialmente en reservas pequeñas y principalmente de la zona andina (Tabla 10).



T A B L A 8 . Porcentaje de pérdida de especies para las reservas del SNAP bajo los cuatro escenarios estudiados (emisiones y dispersión)

La tabla está ordenada de manera descendente con respecto al peor escenario (A2A - Dispersión limitada).

ÁREA PROTEGIDA	ESCENARIO A1B		ESCENARIO A2A	
	SIN LÍMITES	LIMITADA	SIN LÍMITES	LIMITADA
RPF Chimborazo	27,94	32,94	32,32	40,2
RB El Quimi	33,8	34,22	38,34	38,76
RVS Manglares El Morro	34,7	35,42	33,28	34
ANR El Boliche	30,78	30,78	33,4	33,4
PN Cotopaxi	24,82	30,46	28,78	31,48
RG Pulumahua	25,5	27,5	29,1	29,1
RB Cerro Plateado	23,02	25,74	23,66	26,94
ANR Parque Lago	27,02	27,02	26,06	26,06
RVS La Chiquita	29,14	29,14	25,46	26,02
ANR Isla Santay	27,6	27,6	24,3	24,3
RVS El Zarza	23,62	24,58	24,06	24,06
RVS El Pambilar	23,4	23,4	21,88	21,88
RE El Ángel	21,46	22,94	17,58	21,68
RE Manglares Cayapas Mataje	21,82	22,16	20,66	21,22
ANR Los Samanes	24,18	24,18	21,08	21,08
PN Cajas	20,7	25,52	20,4	20,88
PN Podocarpus	15,32	16,68	18,62	19,98
PN Yacuri	14,78	14,78	18,8	18,8
RE Cofán Bermejo	13,7	14,9	17,02	18,72

ÁREA PROTEGIDA	ESCENARIO A1B		ESCENARIO A2A	
	SIN LÍMITES	LIMITADA	SIN LÍMITES	LIMITADA
RE Arenillas	19,78	19,78	18,46	18,46
RVS Pacoche	36,08	36,08	17,74	17,74
RVS Manglares Estuario del Río Muisne	13,4	13,4	16,84	16,84
RB El Cóndor	15,8	16,68	13,92	15,94
ANR Quimsacocha	14,66	15,22	14,9	15,46
RE Manglares Churute	16,08	16,58	14,4	14,4
RPF Manglares El Salado	11,18	11,18	12,94	12,94
PN Machalilla	20,42	21,52	11,66	12,78
RVS Pasochoa	21,86	21,86	12,76	12,76
PN Sumaco Napo-Galeras	6,6	7,44	10,06	10,44
RB Limoncocha	8,92	8,92	10,04	10,04
RE Mache Chindul	9,24	9,72	9,08	9,96
RE Los Ilinizas	7,12	10,02	8,52	9,72
PN Sangay	5,36	7,14	6,96	8,6
PN Cayambe Coca	4,04	6,92	5,82	8,18
RE Antisana	4,94	6,38	5,7	6,86
RE Cotacachi Cayapas	3,6	4,6	5,48	5,66
PN Yasuní	1,88	1,88	5,14	5,14
PN Llanganates	3	4,82	2,7	4,92
RPF Cuyabeno	3,24	3,9	3,24	4,58

T A B L A 9 . Porcentaje de cambio de riqueza de especies para las reservas del SNAP bajo los cuatro escenarios estudiados (emisiones y dispersión).

La tabla está ordenada de manera descendente con respecto al escenario de mayor aumento A1B - Dispersión sin límite).

ÁREA PROTEGIDA	ESCENARIO A1B		ESCENARIO A2A	
	SIN LÍMITE	LIMITADA	SIN LÍMITE	LIMITADA
PN Cotopaxi	143,62	-26,6	136,17	-26,6
RPF Chimborazo	117,89	-31,58	104,21	-37,89
PN Cajas	108,05	-17,24	105,75	-13,79
RVS Paschocha	90,62	-16,67	80,21	-16,67
RE El Ángel	85,87	-19,57	73,91	-19,57
PN Yacuri	71,24	-9,8	60,78	-12,42
Quimsacocha	65,71	-17,14	54,29	-20
ANR El Boliche	62,5	-28,12	50	-28,12
RE Manglares Churute	55,13	-10,26	51,28	-10,26
RE Cotacachi Cayapas	49,41	-4,44	45,86	-4,44
RG Pululahua	47,62	-21,77	38,1	-25,85
PN Llanganates	47,53	-4,01	45,06	-4,63
RPF Cuyabeno	46,81	-4,26	45,21	-4,79
RE Antisana	45,39	-6,03	46,45	-6,38
PN Sangay	43,06	-5,56	39,72	-7,22
RB El Quimi	42,14	-27,86	30	-30
RB Cerro Plateado	41,5	-18,5	33,5	-21
PN Podocarpus	38,72	-12,03	32,71	-14,29
PN Machalilla	37,65	-11,76	38,82	-7,06
RE Los Ilinizas	37,28	-10,8	34,84	-10,45
PN Cayambe Coca	34,94	-5,4	32,95	-6,53
PN Yasuní	34,76	-2,14	28,88	-5,88
PN Sumaco Napo-Galeras	32,52	-6,69	28,88	-9,12
RE Mache Chindul	29,5	-12,23	25,9	-12,23
RB El Cóndor	23,08	-14,2	17,16	-13,61
RVS El Zarza	20,74	-19,26	20,74	-20,74
RVS Pacoche	18,31	-16,9	28,17	-9,86
RPF Manglares El Salado	16,42	-8,96	13,43	-14,93
RE Cofán Bermejo	13,5	-14,79	6,75	-19,29
RE Arenillas	9,23	-16,92	6,15	-18,46
ANR Los Samanes	7,69	-15,38	9,62	-17,31
ANR Isla Santay	7,55	-18,87	7,55	-20,75
RVS Manglares Estuario del Río Muisne	7,48	-18,69	11,21	-16,82
RVS El Pambilar	6,02	-19,55	4,51	-17,29
RB Limoncocha	3,35	-9,5	2,23	-11,17
ANR Parque Lago	1,79	-17,86	7,14	-21,43
RVS Manglares El Morro	0	-39,29	1,79	-35,71
RE Manglares Cayapas Mataje	-4	-21,33	-7,33	-21,33
RVS La Chiquita	-9,92	-25,95	-6,87	-25,19

T A B L A 10 . Tasa de recambio para las reservas del SNAP bajo los cuatro escenarios estudiados (emisiones y dispersión).

La tabla está ordenada de manera descendente con respecto al escenario de mayor cambio (A2A - Dispersión sin límite).

ÁREA PROTEGIDA	ESCENARIO A1B		ESCENARIO A2A	
	SIN LÍMITES	LIMITADA	SIN LÍMITES	LIMITADA
PN Cotopaxi	69,76	26,6	70,49	26,6
RPF Chimborazo	70,39	31,58	70,4	37,89
PN Cajas	61,14	17,24	60	13,79
ANR El Boliche	62,3	28,12	59,65	28,12
RVS Paschocha	59,8	16,67	57,67	16,67
RB El Quimi	56,96	27,86	55,61	30
RE El Ángel	59,36	19,57	55,17	19,57
Reserva Geobotánica Pululahua	53,23	21,77	54,77	25,85
ANR Quimsacocha	53,54	17,14	52,89	20
RVS Manglares El Morro	54,55	39,29	51,32	35,71
PN Yacuri	50,18	9,8	49,43	12,42
RB Cerro Plateado	46,67	18,5	45,36	21
RE Manglares Churute	44,53	10,26	44,44	10,26
RVS El Zarza	41,49	19,26	43,98	20,74
PN Podocarpus	40,05	12,03	40,05	14,29
ANR Parque Lago	31,34	17,86	38,89	21,43
ANR Isla Santay	35,82	18,87	38,24	20,75
RE Antisana	36,02	6,03	37,24	6,38
RE Los Ilinizas	36,69	10,8	36,8	10,45
RE Cotacachi Cayapas	37,26	4,44	36,09	4,44
RVS La Chiquita	36,18	25,95	35,71	25,19
RPF Cuyabeno	36,04	4,26	35,36	4,79
RVS Manglares Estuario del Río Muisne	35,56	18,69	35,04	16,82
PN Sangay	34,59	5,56	34,99	7,22
PN Machalilla	39,68	11,76	34,96	7,06
ANR Los Samanes	31,25	15,38	34,85	17,31
RE Mache Chindul	37,24	12,23	34,74	12,23
RVS Pacoche	38,54	16,9	34,69	9,86
RE Arenillas	34,15	16,92	34,57	18,46
RE Cofán Bermejo	32,32	14,79	34,28	19,29
PN Llanganates	34,64	4,01	33,89	4,63
RPF Manglares El Salado	27,38	8,96	33,72	14,93
PN Sumaco Napo-Galeras	31,87	6,69	33,41	9,12
RVS El Pambilar	35,93	19,55	32,1	17,29
RB El Cóndor	36,09	14,2	31,65	13,61
PN Cayambe Coca	29,13	5,4	30,23	6,53
PN Yasuní	28,52	2,14	30,16	5,88
RE Manglares Cayapas Mataje	32	21,33	30	21,33
RB Limoncocha	19,8	9,5	21,67	11,17



Discusión

Implicaciones sobre la biodiversidad (aspectos biológicos)

Este estudio pionero para el SNAP del Ecuador ha permitido evaluar algunos de los impactos que el cambio climático puede ocasionar en la biodiversidad del país. La inclusión de escenarios como éstos, dentro del desarrollo de estrategias de conservación, es fundamental para promover el diseño de acciones y repuestas efectivas para lograr disminuir los impactos y generar paisajes más resilientes a estos cambios. Aunque el número de especies utilizado es solamente una muestra del universo de la diversidad biológica del Ecuador, los resultados generados nos dan indicios de las posibles respuestas de las especies ante dichos cambios.

No obstante, los resultados evidencian respuestas diferenciadas entre los grupos taxonómicos y las especies modeladas, lo que sugiere profundizar nuestra comprensión en los factores ecológicos intrínsecos de las especies que generan esta variedad de respuestas (Lavergne *et al.*, 2010). *Los escenarios generados que incorporan la capacidad de las especies de moverse en el paisaje (i.e. dispersión), refuerzan la necesidad de incorporar variables ecológicas propias de cada especie en estos*

ejercicios (i.e. modelos mecanísticos). Los umbrales de desplazamiento utilizados son los dos extremos en una gama especie-específica de tasas de dispersión existentes en la naturaleza y como tal son un primer ejercicio de incluir este criterio de manera explícita en este tipo de análisis. Es importante considerar que los resultados obtenidos entre los dos escenarios de desplazamiento empleados tienen mucho más relevancia que el efecto de los dos escenarios de emisión empleados. Por lo tanto, es una prioridad apoyar la generación de información ecológica sobre la historia de vida de las especies que nos permita la construcción de modelos ecológicos más robustos.

Una consideración especial merece la observación de que los resultados más severos de la contracción del nicho climático de las especies modeladas corresponden a especies endémicas o de rango restringido y amenazadas en el Ecuador. En muchos casos, la contracción del rango climático supera el 40% de su distribución actual por lo que medidas específicas para este grupo de especies serán probablemente requeridas. Como fue mencionado anteriormente, la conservación de estas especies debería ser prioritaria, debido al hecho de que estas especies son recursos estratégicos del Ecuador, además, de la responsabilidad ética de proteger especies que habitan sólo nuestro país.



Todas estas consecuencias a nivel de especies, tendrá inevitablemente efectos en la estructura de las comunidades presentes en las áreas protegidas hacia el futuro y probablemente en el funcionamiento de los ecosistemas.

Implicaciones para el manejo del PANE

Los resultados de este estudio reportan cambios importantes en la configuración de la diversidad biológica del Ecuador y por lo tanto tiene implicaciones importantes en el sistema nacional de áreas protegidas y su configuración actual. Las métricas de impacto pueden ser sintetizadas en tres grandes temas:

- i. Los patrones de riqueza de especies tienen un desplazamiento vertical ascendente generando pérdida de especies para muchos de los grupos estudiados, en particular para los anfibios y las angiospermas. No obstante los patrones espaciales de impactos en las pérdidas de especies no son iguales entre los grupos. Esto sugiere impactos diferenciados y por lo tanto la priorización de áreas para el desarrollo de estrategias que disminuyan el riesgo de extinción deben ser por su naturaleza diferentes.

- ii. Los cambios en los rangos de distribución de las especies proyectan una alta tasa de extinción y de recambio de las comunidades al interior de las áreas protegidas. En muchos casos, las áreas de mayor cambio se encuentran en áreas no protegidas, particularmente en el piedemonte andino-amazónico o en los flancos exteriores de la cordillera occidental. Esto tiene serias implicaciones desde el punto de vista del manejo del territorio a través de la articulación del PANE con el resto de subsistemas que en su conjunto forman el Sistema Nacional del Áreas Protegidas.
- iii. Es importante considerar que muchas de las especies endémicas, que sufrirán efectos fuertes, se encuentran por fuera de las áreas protegidas por lo que su situación podría ser incluso mucho más grave por efectos de cambios en el uso del suelo, el cual es uno de los principales factores de pérdida de diversidad biológica en los trópicos (Higgins, 2007; Butchart *et al.*, 2010).

Estos tres resultados pueden sintetizarse en la necesidad de delinear estrategias de mitigación y adaptación de estos efectos arraigadas en un proceso de planificación del paisaje, en un marco de ordenamiento del territorio a varias escalas (local, regional, nacional).

Esta planificación territorial desde la óptica del SNAP, el debate sobre la planificación para la conservación en escenarios de cambios ambientales gira en torno a discusiones teóricas de la ecología del paisaje y la ecología de poblaciones (viabilidad poblacional) que buscan proponer el diseño de un sistema que garantice la permanencia de los organismos biológicos y la funcionalidad de los ecosistemas en el largo plazo.

Varios estudios analizan las oportunidades y desventajas entre tener sistemas nacionales compuestos por pocas reservas grandes versus varias pequeñas (Heller y Zavaleta, 2009). La discrepancia gira entorno a si las reservas grandes tendrán la capacidad por sí solas de garantizar que contendrán los nichos climáticos desplazados o si, por el contrario, las reservas pequeñas, dispuestas a lo largo de gradientes ambientales en una configuración de proximidad que garanticen el desplazamiento de las especies entre ellas. Los estudios de Opdam y Wascher (2004) y de Opdam *et al.* (2006) proponen un escenario intermedio, donde se plantea la creación de una red de áreas protegidas grandes y pequeñas, embebidas en un paisaje de diferentes usos del suelo que favorezcan el desplazamiento de las especies.



© Juan Carlos Narváez

En este marco, y considerando el contexto del Ecuador y la configuración de la biodiversidad del país, es importante pensar en un SNAP que incluya los siguientes elementos como mecanismos explícitos de adaptación y mitigación de los efectos proyectados en la biodiversidad:

- i. Mantener la conectividad de las áreas protegidas a lo largo de la gradiente de elevación, humedad y condiciones edáficas (Killeen y Solórzano, 2008; Hole *et al.*, 2011). Estas gradientes son necesarias para garantizar el recambio de especies así como para preservar la posibilidad de contener diferentes poblaciones de una especie con diversos acervos genéticos que puedan garantizar una mejor capacidad adaptativa (Jump y Peñuelas, 2005; Thuiller *et al.*, 2008). De igual manera, la preservación de estas gradientes garantiza el mantenimiento de procesos y funciones ecosistémicas entre regiones (i.e. Andes-Amazón) como los flujos de agua, productividad primaria y los patrones de circulación climática
- ii. Incorporar los ecotonos en el diseño de las áreas del SNAP. Los ecotonos son clave porque permiten mantener poblaciones que han estado sometidas a continuas variaciones microclimáticas, y por lo tanto a condiciones de estrés fisiológico diario

(Kupfer y Cairns, 1996; Lutz *et al.*, 2013). Es probable que estas condiciones favorezcan el desarrollo de estrategias fisiológicas o ecológicas en los individuos de estas poblaciones que los individuos de las poblaciones que ocurren en los óptimos climáticos carezcan (Cavieres y Piper, 2004). De esta manera es posible incorporar poblaciones con mejor capacidad adaptativa a las variaciones climáticas proyectadas.

- iii. Los modelos de nicho climático permiten identificar áreas climáticamente estables en escenarios futuros. Estas áreas podrían ser considerados como refugios biológicos, similares a los sugeridos por Fjeldsá (1995) durante las fluctuaciones climáticas del Pleistoceno. La incorporación de estas áreas climáticamente estables al SNAP es un criterio clave en el diseño de estos sistemas de reservas, pues podrían actuar como conectores entre las antiguas y nuevas áreas de concentración de biodiversidad en un enfoque metapoblacional (Vos *et al.*, 2008).
- iv. Varios estudios sugieren que dado el alto grado de incertidumbre respecto a los impactos del cambio climático, la prioridad debe estar enfocada en mejorar la permeabilidad del paisaje, a través de la incorporación de nuevas áreas en localidades que

minimicen la distancia espacial entre las reservas existentes (Opdam y Wascher, 2004; Williams *et al.*, 2005). Estas áreas no tienen que ser muy grandes pero su disposición en el paisaje es estratégica, ya que contribuyen a garantizar la capacidad de migración y colonización efectiva de la especie entre las reservas grandes. Por lo tanto, el desarrollo de estrategias de planificación del territorio que promuevan la creación de áreas de gobiernos locales o de la sociedad civil en áreas contiguas a las áreas del PANE es un aspecto primordial. En este mismo punto la promoción de una estrategia de restauración para la recuperación de áreas degradadas por efectos de cambios de uso del suelo en y alrededor de las áreas de amortiguamiento permitirá incrementar la resiliencia de las áreas protegidas.

- v. De acuerdo a la revisión de Heller y Zavaleta (2009), mejorar la conectividad del paisaje para facilitar migración y colonización de las nuevas áreas climáticamente aptas, es la recomendación más frecuente reportada por la literatura (Travis, 2003; Opdam y Wascher, 2004; Resco de Dios *et al.*, 2007). En esta línea de acción, lo que se propone frecuentemente es la creación de corredores biológicos que maximicen la cobertura de gradientes ambientales, en particular

para ecosistemas montañosos y costeros. Sin embargo, dado que los corredores no son parte de una categoría de manejo como tal, es importante estimular la formulación de guías de buenas prácticas que orienten sobre los objetivos buscados, su diseño, el modelo de gobernanza, y los aspectos institucionales que faciliten su implementación. Ejemplos importantes sobre el diseño de corredores se encuentra en la Red de reservas Natura 2000 en la Comunidad Europea (Vos *et al.*, 2008) y en Canadá (Scott y Lemieux, 2007). En ese sentido, la creación de corredores de conservación para mejorar la conectividad del PANE podría ser una opción de adaptación interesante. No obstante, pese a que el sentido común favorece la creación de sistemas de áreas protegidas interconectadas, evaluaciones empíricas sobre su efectividad sigue siendo un tema de investigación pendiente. Dos de los elementos más importantes que no han sido estudiados tienen que ver con el diseño mismo del corredor, de manera de optimizar su configuración espacial y por otro lado, de reducir el riesgo de ser canales para la transmisión de enfermedades o especies invasivas. Estos dos temas son claves a considerar antes de proponer a los corredores como herramientas efectivas de adaptación al cambio climático (Scott *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 2005; Loss *et al.*, 2011).



- vi. Otra de las acciones frecuentemente propuestas se enfoca en la creación de paisajes resilientes; este enfoque considera a la matriz del paisaje como un área de uso y ocupación humana que requiere mejorar la permeabilidad del paisaje a través de prácticas de restauración (DeFries *et al.*, 2010). Las recomendaciones están orientadas a fomentar la incorporación de mejores prácticas de uso de la tierra (p. ej. a través de incentivos), tales como sistemas agroforestales orientados a cambiar la matriz del paisaje de pastos plantados o monocultivos no sostenibles a sistemas multiestratos: como café y cacao de sombra, y sistemas agroforestales en general. Se espera, con estas medidas, lograr tener un paisaje más permeable que facilite los flujos de dispersión entre los parches de hábitat remanentes, promueva procesos de restauración orientados a la reconstrucción de hábitats idóneos a través de favorecer la colonización de especies que dinamicen los procesos de sucesión vegetal (Travis, 2003; Opdam y Wascher, 2004). En la perspectiva del PANE, estas recomendaciones se centran en repensar las categorías de manejo de las áreas protegidas hacia un enfoque que facilite la incorporación de áreas de uso múltiple vinculadas al bienestar humano a través del mantenimiento de servicios ecosistémicos (p. ej.

agua, leña, carbón) y la conservación de la biodiversidad. La articulación de las reservas nacionales del PANE con los otros subsistemas nacionales (áreas protegidas de los GADs, Comunitarios y Privados) es un mecanismo viable para incorporar esta visión. La experiencia de las áreas de conservación y uso múltiple (ACUS) del Noroccidente de Pichincha son un ejemplo de aquello. Este sistema de áreas de conservación es administrado por el Municipio de Quito en articulación con las parroquias rurales del distrito metropolitano, ha generado un sistema de áreas de conservación que incluye y promueve el uso sustentable de los recursos naturales. Este sistema distrital constituye uno de los principales vacíos de conservación del PANE (Cuesta *et al.*, 2013), alberga los últimos remanentes de bosques piemontanos del Chocó y conecta a la Reserva Ecológica los Illinizas con la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas. La articulación de estos sistemas municipales con el PANE es una estrategia prioritaria para lograr incrementar la resiliencia del sistema de áreas protegidas del Ecuador.

Limitaciones del ejercicio

Los resultados de este estudio deben ser entendidos como un primer ejercicio que parte de diversas fuentes temáticas con un grado de incertidumbre propio de cada una de ellas. Entre estas fuentes se resalta las tres principales:

- i. **Las coberturas de clima actuales y futuras:** un importante número de publicaciones reportan el alto grado de incertidumbre que tienen los modelos de circulación global. En promedio, los modelos predicen un ligero incremento de precipitación (alrededor de 10 %) y un incremento de la temperatura (alrededor de 3 °C) dependiendo del periodo de predicción y el escenario de emisión. Sin embargo, la discrepancia entre los modelos es muy alta, en particular en los Andes, y especialmente en el caso de la precipitación. Estas discrepancias se las atribuye principalmente a las diferencias en la representación de la topografía y los procesos climáticos que ocurren en zonas de montaña. Aunque la predicción promedio proyecta un incremento de precipitación, varios modelos predicen una disminución dramática, de tal manera que no existe una congruencia mínima entre los modelos de clima, en cuanto a la dirección del cambio de este factor climático.

La manera de afrontar esta limitación mientras no exista una nueva generación de modelos globales, es usar la mayor cantidad de modelos y trabajar sobre sus promedios a escala de pixel, como se hizo en este estudio. No obstante, a futuro también es necesario profundizar en modelos desarrollados a partir de métodos de desagregación estadística, para tener una resolución más adecuada que incorpore factores locales de clima como la orografía andina (Buytaert *et al.*, 2009; Buytaert *et al.*, 2010).

- ii. **Los registros de las especies:** La mayoría de las especies tienen una colección limitada de registros de ocurrencia. En la mayoría de casos (70 % de las especies modeladas), las especies tienen menos de 20 registros de ocurrencia, lo cual limita considerablemente el desarrollo y aplicación de técnicas robustas para predecir su distribución y reducir el rango de incertidumbre asociado a este tipo de modelos. Es fundamental priorizar y estimular el desarrollo de colecciones científicas que permitan incrementar el acervo documental de los patrones de distribución actuales de la biota andina (Feeley y Silman, 2011). Una prioridad de adaptación que permita mejorar la resiliencia de nuestras respuestas, es la de fortalecer las



colecciones museológicas y procurar la adopción de estándares para su administración y manejo. Adicionalmente, el conjunto de especies utilizado no necesariamente muestra la respuesta que cada uno de estos grupos biológicos (angiospermas, helechos, aves, reptiles, anfibios) tendrán si analizamos el 100 % de las especies o si consideramos que algunas especies tienen rangos de distribución por fuera de los límites territoriales del Ecuador. Se debe fomentar el desarrollo de ejercicios como este, incrementando el número de especies por grupo y monitoreando en campo si los cambios predichos son reales o no, para retroalimentar las estrategias constantemente.

- iii. **Los modelos de nicho y los escenarios de desplazamiento:** Varios estudios resaltan el hecho de que se esperan respuestas idiosincrásicas de los organismos a los impactos del cambio climático. Estas respuestas dependerán en gran parte de las características fisiológicas y ecológicas de las especies en cuestión (Broennimann *et al.*, 2006). El grado de vulnerabilidad de éstas, está dado en gran parte por su capacidad de dispersión, junto con la diversidad genética contenida en las poblaciones de estas especies para adaptarse

al cambio. En general, especies móviles podrán seguir el desplazamiento de sus nichos climáticos, mientras que las especies capaces de generar cambios evolutivos rápidos o con un amplio rango de tolerancia fisiológica podrán adaptarse a las nuevas condiciones ambientales sin necesidad de desplazarse (Harrison *et al.*, 2006). Otro aspecto poco estudiado implica el amortiguamiento que las especies podrían recibir de algunas características de su historia natural, como por ejemplo tener periodos de actividad nocturna o el uso de microhábitats durante los periodos de temperaturas más extremas (diarias o estacionales). No obstante, uno de los principales limitantes es el conocimiento básico de la ecología de las especies y su capacidad de adaptación y de colonización de nuevos ambientes. En este estudio, la manera de reducir esta incertidumbre partió de usar dos escenarios extremos concientes de que la tasa “real” de dispersión se encuentra entre estos dos extremos. Lograr tener tasas acotadas a las realidades de cada taxa, e incluso especie, es un aspecto sustancial a cubrir a futuro. Contar con esta información sin duda permitirá generar proyecciones de cambio e indicadores de impacto mucho más detallados y específicos.

Pese a las limitaciones inherentes a los insumos de información primaria sobre la distribución y estado de la biodiversidad, los modelos climáticos y las herramientas de modelamiento disponibles y los supuestos detrás de ellos, consideramos que este tipo de ejercicios son importantes como mecanismos exploratorios que guíen procesos de discusión, de investigación básica y aplicada y de formulación de política pública. Este tipo de análisis constituyen herramientas dinámicas que deben ser mejoradas continuamente, por ejemplo cada vez que existan modelos climáticos con menos incertidumbre o cuando nuevas áreas protegidas sean incorporadas al SNAP se podrían re-analizar los resultados. En este caso, se analizaron los resultados en base de las reservas continentales del PANE creadas hasta febrero del 2013. Este tipo de análisis facilitarán una toma de decisiones mejor informada por parte de las autoridades pertinentes.

El reconocimiento de estas limitantes, ha ocasionado que varios estudios sugieran que primero es necesario mejorar la capacidad predictiva de los modelos de distribución de especies o biomas antes de realizar estos ejercicios (Thuiller *et al.*, 2008). Por lo pronto se sugiere

generar este tipo de estudios de manera que integren los siguientes elementos:

- Modelos acoplados de cambio climático y uso de la tierra.
- Consolidar y mejorar las bases de datos de ocurrencia actual de especies, en particular de los ecosistemas andinos.
- Generar varios escenarios a partir de diferentes umbrales de desplazamiento para las diferentes especies modeladas.
- Comparar resultados para diferentes combinaciones de grupos de especies de interés (e.g. insectos versus aves) como parte de un análisis de sensibilidad a diferentes grupos.
- Utilizar la mayor cantidad de GCMs posibles de manera combinada, para al menos dos escenarios de emisión. Esto permitirá estimar el grado de incertidumbre inherente. Alternativamente, se sugiere desarrollar escenarios sólo a partir de las variables de temperatura. Esto facilitará generar coberturas a



© Juan Carlos Navárez

una mayor resolución espacial, que permitan generar resultados a escalas más aplicables para el manejo y delineamiento de acciones de adaptación.

- Incorporar a las áreas prioritarias de biodiversidad, la provisión de bienes ecosistémicos importantes para el desarrollo y bienestar humano (agua, carbono) como parte de estos ejercicios.

Literatura citada

Alagador, D., Cerdeira, J. O. y Araújo, M. B. (2014). Shifting protected areas: scheduling spatial priorities under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 51, 703–713.

Anderson, R.P. (2013) A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1297, 8–28.

Araújo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D. y Thuiller, W. (2011) Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters*, 14, 484–492.

Araújo, M.B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L. y Williams, P.H. (2004) Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10, 1618–1626.

Araújo, M.B. y Rahbek, C. (2006) How Does Climate Change Affect Biodiversity? *Science*, 313, 1397.

Balmford, A. y Bond, W. (2005) Trends in the state of nature and their implications for human well-being. *Ecology Letters*, 8, 1218–1234.

Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G.O.U., Swartz, B., Quental, T.B., Marshall, C., McGuire, J.L., Lindsey, E.L., Maguire, K.C., Mersey, B. y Ferrer, E.A. (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51–57.

Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. y Courchamp, F. (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.

Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G.F., Alkemade, J.M.R. y Guisan, A. (2006) Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12, 1079–1093.

Butchart, S.H.M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J.P.W., Almond, R.E.A., Baillie, J.E.M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K.E., Carr, G.M., Chanson, J., Chenery, A.M., Csirke, J., Davidson, N.C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J.N., Genovesi, P., Gregory, R.D., Hockings, M., Kapos, V., Lamarque, J.-F., Leverington, F., Loh, J., McGeoch, M.A., McRae, L., Minasyan, A., Morcillo, M.H., Oldfield, T.E.E., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J.R., Skolnik, B., Spear, D., Stanwell-Smith, D., Stuart, S.N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T.D., Vié, J.-C. y Watson, R. (2010) Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, 328, 1168.

Buytaert, W., Celleri, R. y Timbe, L. (2009) Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: the effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36, L07406.

Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A. y Céleri, R. (2010) Uncertainties in climate change projections and regional

downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1247–1258.

Cavieres, L.A. y Piper, F. (2004) Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. *Fisiología Ecológica en Plantas* (Ed. H.M. Cabrera), pp. 221–234. Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.

Cuesta, F., Peralvo, M., Baquero, F., Bustamante, M., Merino-Viteri, A., Muriel, P., Freile, J.F. y Torres, O. (2013) Identificación de Vacíos y Prioridades de Conservación de la Biodiversidad en el Ecuador Continental. In. CONDESAN, Escuela de Ciencias Biológicas-PUCE, MAE, GIZ.

Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I., Prentice, I.C. y Mace, G.M. (2011) Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science*, 332, 53–58.

DeFries, R., Karanth, K.K. y Pareeth, S. (2010) Interactions between protected areas and their surroundings in human-dominated tropical landscapes. *Biological Conservation*, 143, 2870–2880.

Elbers, J. (2011) *Las áreas protegidas de América Latina: situación actual y perspectivas para el futuro*. UICN, Oficina Regional para América del Sur.

Ervin, J. y Gidda, S. (2012) Resource requirements for Aichi Targets 11 – Protected Areas. Progress report for the High Level Panel Meeting.

Feeley, K.J. y Silman, M.R. (2010) Biotic attrition from tropical forests correcting for truncated temperature niches. *Global Change Biology*, 16, 1830–1836.

Feeley, K.J. y Silman, M.R. (2011) The data void in modeling current and future distributions of tropical species. *Global Change Biology*, 17, 626–630.

Feeley, K.J., Silman, M.R., Bush, M.B., Farfan, W., Cabrera, K.G., Malhi, Y., Meir, P., Revilla, N.S., Quisiyupanqui, M.N.R. y Saatchi, S. (2011) Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography*, 38, 783–791.

Fjeldså, J. (1995) Geographical patterns of neoendemic and older relict species of Andean forest birds: the significance of ecologically stable areas. *Biodiversity and conservation of Neotropical montane forests. Proceedings of a symposium, New York Botanical Garden, 21-26 June 1993*. (ed. by S.P.B. Churchill, Henrik; Forero, Enrique; Luteyn, James L. (Eds.)), pp. 89–102. New York Botanical Garden. Bronx, NY, USA, New York.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2000) Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de políticas.

Guisan, A. y Thuiller, W. (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 1009.

Guisan, A. y Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 186.

Harrison, P.A., Berry, P.M., Butt, N. y New, M. (2006) Modelling climate change impacts on species' distributions at the European scale: implications for conservation policy. *Environmental Science and Policy*, 9, 116–128.

Heller, N.E. y Zavaleta, E.S. (2009) Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142, 14–32.

Higgins, P.A.T. (2007) Biodiversity loss under existing land use and climate change: an illustration using northern South America. *Global Ecology and Biogeography*, 16, 197–204.

Hole, D.G., Willis, S.G., Pain, D.J., Fishpool, L.D., Butchart, S.H.M., Collingham, Y.C., Rahbek, C. y Huntley, B. (2009) Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters*, 12, 420–431.

Hole, D.G., Young, K.R., Seimon, A., Gomez Carla, Hoffmann Dirk, Schutze Klaus, Sanchez Silvia, Muchoney Douglas, Grau Ricardo y Edson, R. (2011) Adaptive Management for Biodiversity Conservation under Climate Change – a Tropical Andean Perspective. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes* (ed. by S.K. Herzog, R. Martínez, P.M. Jørgensen and H. Tiessen), pp. 1–339. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), Brasilia.

Jump, A.S. y Peñuelas, J. (2005) Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters*, 8, 1010–1020.

Jurasinski, G. y Kreyling, J. (2007) Upward shift of alpine plants increases floristic similarity of mountain summits. *Journal of Vegetation Science*, 18, 711–718.

Kharouba, H. M. y Kerr, J. T. (2010) Just passing through: Global change and the conservation of biodiversity in protected areas. *Biological Conservation*, 143, 1094–1101.

Killeen, T.J. y Solórzano, L.A. (2008) Conservation strategies to mitigate impacts from climate change in Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1881–1888.

Kupfer, J.A. y Cairns, D.M. (1996) The suitability of montane ecotones as indicators of global climatic change. *Progress in Physical Geography*, 20, 253–272.

Laurance, W.F., Carolina Useche, D., Shoo, L.P., Herzog, S.K., Kessler, M., Escobar, F., Brehm, G., Axmacher, J.C., Chen, I.C., Gómez, L.A., Hietz, P., Fiedler, K., Pyrcz, T., Wolf, J., Merkord, C.L., Cardelus, C., Marshall, A.R., Ah-Peng, C., Aplet, G.H., del Coro Arizmendi, M., Baker, W.J., Barone, J., Brühl, C.A., Busmann, R.W., Cicuzza, D., Eilu, G., Favila, M.E., Hemp, A., Hemp, C., Homeier, J., Hurtado, J., Jankowski, J., Kattán, G., Kluge, J., Krömer, T., Lees, D.C., Lehnert, M., Longino, J.T., Lovett, J., Martin, P.H., Patterson, B.D., Pearson, R.G., Peh, K.S.H., Richardson, B., Richardson, M., Samways, M.J., Senbeta, F., Smith, T.B., Utteridge, T.M.A., Watkins, J.E., Wilson, R., Williams, S.E. y Thomas, C.D. (2011) Global warming, elevational ranges and the vulnerability of tropical biota. *Biological Conservation*, 144, 548–557.

Lavergne, S., Mouquet, N. Thuiller, W. y Ronce, O. (2010) Biodiversity and climate change: Integrating evolutionary and ecological responses of species and communities. *Annual Review of Ecology, and Systematics*, 41, 321–350.

Liu, C., Berry, P.M., Dawson, T.P. y Pearson, R.G. (2005) Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28, 385–393.

Loss, S.R., Terwilliger, L.A. y Peterson, A.C. (2011) Assisted colonization: Integrating conservation strategies in the face of climate change. *Biological Conservation*, 144, 100.

Lutz, D.A., Powell, R.L. y Silman, M.R. (2013) Four Decades of Andean Timberline Migration and Implications for Biodiversity Loss with Climate Change. *PLoS ONE*, 8, e74496.

Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K. y Thuiller, W. (2009) Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 15, 69.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (2012) Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025. Quito. 89 pp.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014a) Quinto Informe Nacional para el Convenio sobre la Diversidad Biológica. GIZ, PNUD. Quito, Ecuador.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (2014b) El cambio climático en el Ecuador. Presentación para el VIII Foro Climático Nacional 2014. Orellana, Ecuador.

Opdam, P., Steingröver, E. y Rooij, S.V. (2006) Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 75, 332.

Opdam, P. y Wascher, D. (2004) Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation*, 117, 285–297.

Phillips, S.J., Anderson, R.P. y Schapire, R.E. (2006) Maximum entropy

modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.

Phillips, S.J. y Dudík, M. (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.

Pimm, S.L., Russell, G.J., Gittleman, J.L., Brooks, T.M., Pimm, S.L., Russell, G.J., Gittleman, J.L. y Brooks, T.M. (1995) The Future of Biodiversity. *Science*, 269, 347–350.

Popescu, V. D., Rozyłowicz, L., Cogălniceanu, D., Niculae, I. M. y Cucu, A. L. (2013) Moving into protected areas? Setting conservation priorities for Romanian reptiles and amphibians at risk from climate change. *PLoS One*, 8(11), e79330.

R Team Core. (2014) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Ramírez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A. y Arnillas, C.A. (2014) Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22, 391–404.

Resco de Dios, V., Fischer, C. y Colinas, C. (2007) Climate Change Effects on Mediterranean Forests and Preventive Measures. *New Forests*, 33, 29–40.

Riley, S.J., DeGloria, S.D. y Elliot, R. (1999) A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 23–27.

- Sala, O. E., D. van Vuuren, H. Pereira, D. Lodge, J. Alder, G. S. Cumming, A. Dobson, V. Wolters, y M. Xenopoulos. 2005. Biodiversity across Scenarios. Pages 375–408 in S. R. Carpenter, P. L. Pingali, E. M. Bennett, and M. Zurek, editors. *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Island Press, Washington DC.
- Scott, D. y Lemieux, C. (2007) Climate change and protected areas policy, planning and management in Canada's boreal forest. *The Forestry Chronicle*, 83, 347–357.
- Scott, J.M., Davis, F.W., McGhie, R.G., Wright, R.G., Groves, C. y Estes, J. (2001) Nature Reserves: Do they capture the full range of America's Biological Diversity? *Ecological Applications*, 11, 999–1007.
- Senplades. 2013. Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo – Senplades. Quito. 124 pp.
- Stockwell, D.R.B. y Peterson, A.T. (2002) Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling*, 148, 1–13.
- Thuiller, W., Albert, C., Araújo, M.B., Berry, P.M., Cabeza, M., Guisan, A., Hickler, T., Midgley, G.F., Paterson, J., Schurr, F.M., Sykes, M.T. y Zimmermann, N.E. (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9, 137–152.
- Tovar, C., Arnillas, C.A., Cuesta, F y Buytaert, W. (2013) Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLoS ONE*, 8, e63634.
- Travis, J. (2003) Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail. *Proceedings of the Royal Society B* 270, 467–473.
- Virkkala, R., Heikkinen, R. K., Fronzek, S., Kujala, H. y Leikola, N. (2012). Does the protected area network preserve bird species of conservation concern in a rapidly changing climate? *Biodiversity and Conservation*, 22, 459–482.
- Vos, C.C., Berry, P., Opdam, P., Baveco, H., Nijhof, B., O'Hanley, J., Bell, C. y Kuipers, H. (2008) Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1722–1731.
- Williams, P., Hannah, L.E.E., Andelman, S., Midgley, G.U.Y., Araújo, M., Hughes, G., Manne, L., Martinez-Meyer, E. y Pearson, R. (2005) Planning for Climate Change: Identifying Minimum-Dispersal Corridors for the Cape Proteaceae. *Conservation Biology*, 19, 1063–1074.
- WWF (2014) *Living Planet Report 2014. Species and spaces, people and places*. WWF International, Glad, Suiza.



