



Efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales: el estado del conocimiento científico

**Resumen para
tomadores de decisiones y responsables
de la formulación de políticas públicas**

**Sebastian K. Herzog, Peter M. Jørgensen,
Rodney Martínez Güingla, Christopher Martius, Elizabeth P. Anderson,
David G. Hole, Trond H. Larsen, José A. Marengo, Daniel Ruiz Carrascal
y Holm Tiessen**



MacArthur
Foundation

Esta publicación está financiada por un subsidio de John D. & Catherine T. MacArthur Foundation otorgado al Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), en el marco del proyecto “Una evaluación del estado actual del conocimiento científico y las necesidades institucionales para hacer frente a los efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes”.

Las opiniones, conclusiones y/o recomendaciones expresadas aquí son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente las del IAI, CIIFEN, John D. & Catherine T. MacArthur Foundation, u otras instituciones involucradas.

Citar como: Herzog, S.K., P.M. Jørgensen, R. Martínez Güingla, C. Martius, E.P. Anderson, D.G. Hole, T.H. Larsen, J.A. Marengo, D. Ruiz Carrascal, H. Tiessen (2010): Efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales: el estado del conocimiento científico. Resumen para tomadores de decisiones y responsables de la formulación de políticas públicas. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), São José dos Campos, Brasil

Sebastian K. Herzog, Asociación Armonía – BirdLife International, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

Peter M. Jørgensen, Missouri Botanical Garden, St. Louis, EE. UU.

Rodney Martínez Güingla, Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de el Niño, Guayaquil, Ecuador

Christopher Martius, Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global, São José dos Campos, SP, Brasil

Elizabeth P. Anderson, Florida International University, Miami, EE. UU.

David G. Hole, Conservation International, Washington, DC, EE. UU.

Trond H. Larsen, Princeton University, Princeton, EE. UU.

José A. Marengo, Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil

Daniel Ruiz Carrascal, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia, y Columbia University in the City of New York, EE. UU.

Holm Tiessen, Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global, São José dos Campos, SP, Brasil

Contenido

DATOS A DESTACAR

I. LA BIODIVERSIDAD ANDINA

1.1. Tendencias generales en la diversidad de las especies	7
1.2. Influencia de la altitud en la diversidad de las especies	7
1.3. La influencia de la latitud	8
1.4. Los Andes tropicales - un centro global de endemismo	8
1.5. Patrones geográficos de endemismo	9
1.6. Puntos críticos para la biodiversidad	9
1.7. Ecosistemas prioritarios para la protección	10

2. CLIMA ANDINO: PRESENTE Y FUTURO

2.1. Variabilidad climática de la región norte de los Andes tropicales (Colombia-Ecuador)	11
2.2. Variabilidad climática de la región sur de los Andes tropicales (Perú-Bolivia)	12
2.3. Tendencias climáticas históricas observadas	13
2.4. Proyecciones climáticas para los Andes tropicales	14

3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD

3.1. El nicho climático y la forma en que las especies responden al cambio climático	16
3.2. Respuestas de las especies al cambio climático	17
3.3. Interacciones ecológicas y características de las especies	18
3.4. Impactos del cambio climático en los ecosistemas de los Andes tropicales	19
3.5. Servicios ecosistémicos en peligro	20
3.6. Cambio climático y cambios en el uso de la tierra –una combinación peligrosa para la biodiversidad	21

4. CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

4.1. Conservación a través del manejo adaptativo	22
4.2. Oportunidades - demostrar el valor de mantener la funcionalidad de los ecosistemas	25

5. DESAFÍOS PARA LA CONSERVACION Y EL MANEJO DE LA BIODIVERSIDAD ANDINA TROPICAL FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO

5.1. Vacíos de conocimiento	26
5.2. Necesidades de la ciencia de la biodiversidad relacionadas con el clima en los Andes tropicales	27
5.3. Capacidades institucionales	28
5.4. Áreas prioritarias para la investigación interdisciplinaria	29

6. BIBLIOGRAFÍA

Este resumen está basado en el libro “Climate change effects on the biodiversity of the tropical Andes: an assessment of the status of scientific knowledge” (Los efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales: una evaluación del estado del conocimiento científico).

Fotografías cortesía de

Richard E. Gibbons: Plantas altoandinas en cojín, pág. 7; Polinizador de cactus de la Puna, pág. 8; Geranoaetus melanoleucus, pág. 16; Bofedal, pág. 17; Chloephaga melanoptera, pág. 18; Arroyo de la Puna, pág. 21; Plegadis ridgwayi, pág. 22; Phegornis michellii, pág.; Rhea pennata, pág. 26

Dirk Hoffmann: Terrazas andinas tradicionales, Cord. Real, Bolivia (cerca de Khapi), pág. 5; planta altoandina, Cord. Real, Bolivia, pág. 6; hielo glaciar, Cord. Real, Bolivia, pág. 11; Vegetación altoandina, pág. 12; glaciar en la Cordillera Real, Bolivia –con una expectativa de vida de a lo sumo 10-15 años, pág. 13; Polylepis, Cord. Real, Bolivia, pág. 15; Bofedal, Cord. Real, Bolivia, pág. 18; rayas de glaciar en las rocas, Cord. Real, Bolivia, pág. 20; Polylepis, Cord. Real, Bolivia, pág. 25; lo que solían ser hielos “eternos”, Cord. Real, Bolivia, pág. 27; vizcacha, Cord. Real, Bolivia, pág. 28; Paisaje andino con terrazas, Cord. Real, Bolivia (Khapi), pág. 29

DATOS A DESTACAR

Los Andes tropicales son un punto crítico (*hotspot*) de biodiversidad a escala global, que alberga una extraordinaria riqueza de especies y altísimos niveles de endemismo. Los grupos taxonómicos señalan diversos patrones de diversidad, pero la riqueza total de especies en todos los taxones en su conjunto alcanza su punto máximo en los bosques perennifolios en los flancos orientales bajos y en las tierras bajas inmediatamente adyacentes cerca de la línea ecuatorial, mientras que el más alto nivel de endemismo aparentemente se encuentra en los bosques nublados justo debajo de la línea del bosque (ceja de monte).

Si no se toma ninguna medida en el presente, es altamente probable que el cambio climático y la alteración del uso del suelo generen la extinción masiva de especies a nivel global solo comparable con los 5-6 eventos de extinción masiva ocurridos en la escala de tiempo geológico. Se evidencia que el riesgo de extinción en los Andes tropicales es mayor a altitudes mayores y en las cimas de las montañas, ya que las especies adaptadas a estos ambientes no tienen otro lugar a dónde desplazarse. Los efectos del cambio climático en la biodiversidad de los Andes tropicales pueden estar asociados con algunas tendencias clave: el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación, los cambios de frecuencia en la cobertura nubosa y en el ascenso de las bases de las nubes así como el aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos. Como resultado, muchas especies se verían obligadas a desplazar su rango geográfico siguiendo su nicho climático, pero muchas no podrán hacerlo debido a la fragmentación del hábitat asociada a actividades antropogénicas. De igual forma, una gran cantidad de procesos e interacciones ecológicas cruciales para el funcionamiento de los ecosistemas se verían perturbados.

Más de 40 millones de personas dependen de los ecosistemas de los Andes tropicales como fuente de agua dulce, alimentos, riqueza cultural, y muchos otros bienes y servicios ecosistémicos. El cambio global pone en peligro la funcionalidad de estos ecosistemas y su capacidad para brindar bienes y servicios esenciales para los seres humanos. El mantenimiento de los servicios ecosistémicos a través del manejo adaptativo surge como la forma más económica de evitar y/o de adaptarse a muchos de los impactos negativos que se prevé tendrá el cambio climático en el bienestar de los seres humanos.

Las áreas de conservación deben contener gradientes ambientales amplios y deberían estar conectadas mediante corredores u otros enfoques a nivel del paisaje para que resulten eficaces ante el cambio climático. Quizás uno de los desafíos más grandes al intentar enfrentar los impactos de los cambios globales y el cambio climático en la biodiversidad de los Andes



tropicales sea la limitada coordinación inter-institucional en los países de la región. Se requieren evaluaciones sistemáticas de la vulnerabilidad de los ecosistemas y las comunidades bióticas en combinación con los análisis de las tendencias climáticas observadas y los impactos proyectados



del cambio climático en la mayor parte de los Andes tropicales. De esta forma, se podrá estimar y manejar los riesgos asociados al cambio climático.

Este documento resume brevemente nuestros conocimientos acerca de la biodiversidad, el clima y el cambio climático en la región andina tropical. Luego se considera la forma en que el cambio climático puede afectar la biodiversidad. En la siguiente sección se presentan algunas estrategias posibles para la conservación, mientras que la sección final ofrece un panorama general de los problemas que asedian a las ciencias de

la biodiversidad y climáticas en los Andes, incluyendo la determinación de vacíos de conocimiento, capacidad institucional y áreas prioritarias para la investigación interdisciplinaria cuyo objetivo de estudio es la adaptación y mitigación.

I. LA BIODIVERSIDAD ANDINA

La biodiversidad se refiere a la cantidad de especies que se encuentran en un área específica, su variabilidad genética y los ecosistemas que forman. La biodiversidad determina los procesos biológicos dentro, entre y más allá de los ecosistemas que ofrecen una amplia variedad de servicios ecológicos -como el ciclo nutritivo o el suministro de agua- y funciones del ecosistema, como el mantenimiento de redes alimenticias.

Por ser la cadena montañosa tropical continental más larga del mundo, con gradientes extensos de latitud, altitud y humedad, los Andes sostienen una biodiversidad excepcional de plantas, hongos y animales. Es fundamental comprender los patrones de diversidad y endemismo a fin de planificar las estrategias de conservación. Sin embargo, se han realizado pocas síntesis de los patrones de biodiversidad a través de los Andes tropicales. Los estudios de biodiversidad y endemismo se encuentran restringidos a unos pocos taxones y regiones. Debido a que se estima que al menos el 50% de la biodiversidad de la región aún no ha sido descrita, muchas especies podrían desaparecer antes de ser descubiertas científicamente. Las aves y los mamíferos están relativamente bien estudiados; sin embargo, se siguen descubriendo constantemente nuevas especies. En un promedio de 25 años, día por medio se describe una nueva especie de planta en Ecuador solamente. Probablemente los peces sean el grupo vertebrado menos estudiado de la región. Aproximadamente el 60% de las polillas geométridas, pero solo el 5% de los hongos del sur de Ecuador son científicamente conocidos. Por lo tanto, es necesaria una síntesis más integral para establecer datos de referencia a fin de hacer un seguimiento de los impactos del cambio climático en la biodiversidad y, lo más importante, identificar las prioridades de conservación y desarrollar estrategias adecuadas de conservación y adaptación.

Resumir los patrones de diversidad y endemismo actuales para proporcionar una línea de base desde donde planificar las estrategias de conservación no es tarea fácil. A continuación se intenta resumir el conocimiento actual que pueda ser usado en la planificación de acciones para la conservación y el diseño de políticas públicas.

1.1. Tendencias generales en la diversidad de las especies

La diversidad no se distribuye equitativamente a lo largo de los flancos de los Andes tropicales, existiendo además diferencias entre los patrones de los distintos grupos taxonómicos. Se observa generalmente una mayor riqueza de especies a menor latitud y altitudes bajas, aunque existen muchas excepciones a esta regla. Sin embargo, como un fenómeno casi “universal” en toda la región, el recambio geográfico de especies (conocido como diversidad beta) es particularmente alto, es decir, la composición de especies en los Andes colombianos es muy diferente de aquella observada en ecosistemas equivalentes en, por ejemplo, Ecuador. Otro patrón general es que la riqueza de especies disminuye al aumentar la aridez, especialmente en los bosques.

1.2. Influencia de la altitud en la diversidad de las especies

En muchos grupos taxonómicos la riqueza de especies alcanza su nivel máximo en las zonas bajas de las laderas andinas (hasta 1500-2500 m aproximadamente) y en las tierras bajas inmediatamente adyacentes, lo que corresponde a las tendencias globales. La riqueza regional de especies de las plantas vasculares alcanza su máximo en las tierras bajas y disminuye considerablemente hasta una altura aproximada de 1500 m, pero se mantiene bastante constante entre los 1500 y 3000 m, volviendo a disminuir en alturas superiores. A diferencia con lo anterior, la riqueza regional de especies de las aves se mantiene constantemente alta desde las tierras bajas hasta los 1500 m en los Andes tropicales en su conjunto y hasta los 2600 m en los Andes colombianos, y luego disminuye drásticamente hacia la línea arbolada (el límite altitudinal en el que los árboles son capaces de crecer).

En las escalas espaciales locales, se observan patrones que varían marcadamente entre los diferentes grupos de plantas, pero la diversidad general alcanza su nivel máximo alrededor de los 1000-1500 m en regiones húmedas y en altitudes mayores donde el clima es más árido. En forma semejante, tanto los musgos como las hepáticas, varios grupos de insectos y algunos roedores exhiben su punto máximo de diversidad en altitudes medias en el bosque montano húmedo. En contraste, la riqueza de especies a escala local de algunos insectos, aves y la mayoría de los mamíferos pequeños alcanza su nivel máximo en las zonas bajas y disminuye en forma bastante estable con la altitud en las laderas andinas húmedas. Por otra parte, en los valles interandinos bajo la sombra pluviométrica la diversidad de aves y murciélagos alcanza su punto máximo en altitudes medias, donde la ubicación exacta del punto máximo depende del ecoclima local. En las laderas áridas occidentales de Perú, la riqueza de algunos grupos, como ser los mamíferos pequeños no voladores, aumenta con la altitud.



En ecosistemas acuáticos, la riqueza de especies de algas, zooplancton y macroinvertebrados generalmente alcanza su nivel máximo a los 1000-3000 m y, para la mayoría de los grupos, la riqueza de especies por encima de los 3000 m es considerablemente más alta que por debajo de los 1000 m. En Bolivia, la mayor riqueza de especies de algas y zooplancton se encuentra en los numerosos lagos y bofedales por encima de los 3000 m. La riqueza de especies de peces disminuye drásticamente con la altura, y se observan muy pocas especies por encima de los 3000 m, a excepción del Lago Titicaca que alberga a 39 especies de peces (casi todos ellos endémicos).

1.3. La influencia de la latitud

Los patrones de diversidad latitudinal son pobremente estudiados y difieren entre los taxones. Mientras que las plantas vasculares y algunos grupos de insectos alcanzan la diversidad más alta en las regiones ecuatoriales, la diversidad de otros taxones como peces y musgos aumenta a medida que aumenta la distancia al ecuador. La diversidad de los helechos, las epífitas y las aves no varía considerablemente con la latitud a lo largo de la mayor parte de los Andes tropicales, aunque la diversidad de los helechos en los bosques montanos húmedos y de las aves en general disminuye marcadamente hacia el sur de aproximadamente 18°S, en el centro de Bolivia, a partir de donde el clima se vuelve más seco y más estacional. En la ladera occidental andina, la diversidad de las aves es mayor alrededor del ecuador y extremadamente baja más al sur, en las laderas áridas de Perú y en el Altiplano al sur de Perú y Bolivia. Los mamíferos del bosque montano húmedo tampoco parecen tener una tendencia en la diversidad latitudinal, pero la región de la puna de los Andes tropicales del sur cuenta con una mayor diversidad de roedores que el páramo al norte.

1.4. Los Andes tropicales - un centro global de endemismo

Las especies endémicas se encuentran únicamente en una localización geográfica particular. Los Andes tropicales son un centro global de endemismo: al menos el 25-50% de las especies de la mayoría de los grupos taxonómicos son endémicas (por ejemplo, el 30% de musgos, el 25% de plantas vasculares, el 40% de peces y el 28% de aves), muchas de las cuales ocupan rangos altitudinales y latitudinales estrechos. Numerosas especies, particularmente de ranas y peces, se conocen únicamente en una localidad de recolección. El 11% de las 218 Áreas de Aves Endémicas en todo el mundo (Stattersfield et al. 1998) está ubicado en los Andes tropicales, y el endemismo de aves en la región es mayor que en ningún otro lugar de América del Sur continental.



Debido a sus rangos de distribución pequeños y requisitos especializados, las especies endémicas se ven especialmente amenazadas por la alteración humana del medio ambiente y el cambio climático. Los patrones históricos de los cambios climáticos han tenido un importante impacto en la actual distribución del endemismo. Por ejemplo, los centros de endemismo para plantas y aves generalmente se dan en zonas que han permanecido ecológicamente estables, especialmente en las zonas con niveles de precipitación muy altos y en

los valles interandinos bajo la sombra pluviométrica. Mediante la identificación y conservación de estas áreas ecológicamente estables se podría ofrecer importantes refugios para las especies que se han adaptado a estas áreas y así perdurar ante el cambio climático.

1.5. Patrones geográficos de endemismo

Si bien la riqueza de las especies disminuye generalmente en las altitudes mayores en los Andes, los niveles de endemismo tienden a aumentar. El endemismo se concentra con frecuencia en bandas de altitud estrechas o en parches de hábitat aislados (por ejemplo, bosques de niebla¹, bosques de *Polylepis*², valles aislados y cimas de montañas). En general, el nivel más alto de endemismo de los taxones parece observarse en los bosques de niebla que se encuentran inmediatamente por debajo de la línea del bosque, y para las plantas, hacia abajo, en el bosque seco estacional hasta unos 1500 m.

El endemismo de la flora ecuatoriana continental es más alto alrededor de 3000 m y 4500 m en los cinturones altitudinales más angostos y topográficamente más fragmentados. En Perú, el endemismo de las plantas a 2000-3500 m es 10 a 15 veces mayor que en las tierras bajas. Los patrones varían marcadamente entre los grupos taxonómicos, pero predomina el patrón de mayor endemismo a altitudes intermedias, con el máximo a altitudes iguales o mayores que el respectivo máximo de la riqueza de especies.

En el caso de las aves, casi toda la zona de los Andes tropicales constituye una gran área de endemismo, a excepción del Altiplano que cuenta con niveles muy bajos de endemismo. El endemismo de las aves aumenta generalmente con la altitud y alcanza valores máximos cerca de la línea del bosque, y en Perú y Bolivia, en fragmentos aislados de bosques de *Polylepis* por encima de la línea del bosque, pero disminuye drásticamente en los pajonales adyacentes de la puna. Por el contrario, el endemismo de los roedores es alto en el Altiplano, especialmente en Bolivia. En el flanco oriental, el endemismo de los mamíferos pequeños alcanza su nivel máximo en el bosque de niebla y en los altiplanos a 1500-4000 m.

Prácticamente todas las especies de peces que se encuentran por encima de los 3000 m son endémicas, siendo el Lago Titicaca un ejemplo específico del alto endemismo de sus especies de peces. Los lagos que se encuentran a grandes alturas también albergan ranas endémicas. Las cuencas al oeste de los Andes en Ecuador cuentan con altos niveles de endemismo, donde más del 50% de sus especies son endémicas del país.

1.6. Puntos críticos para la biodiversidad

Los puntos críticos para la biodiversidad como áreas de prioridad para la conservación han sido identificados en forma mucho más exhaustiva y sistemática para las aves que para cualquier otro grupo taxonómico. Las aves altoandinas con poblaciones reproductivas por encima de los 2500 m muestran tres picos prominentes de máxima diversidad (aproximadamente 260 especies en cada

1. Bosque montano húmedo de perennifolia tropical o subtropical caracterizado por una cobertura de nubes de bajo nivel frecuente o estacional, generalmente al nivel del dosel principal.

2. Bosques altoandinos dominados por o compuestos exclusivamente de árboles del género *Polylepis* (queñua, quehuiña), que generalmente se observan en parches aislados por encima de la línea del bosque.

zona) en la ladera oriental de los Andes: al sureste de Quito, Ecuador; en la zona Tabaconas-Namballe, en el norte de Perú; y en el Parque Nacional Carrasco, en el centro de Bolivia. Con respecto al endemismo, las concentraciones particularmente grandes de especies de rango restringido (especies cuyos rangos reproductores no sobrepasan los 50.000 km²) se dan en la ladera del Pacífico en la región Chocó al oeste de Colombia y en la zona centro-oeste de Ecuador, en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos y en la región tumbesina del oeste de Ecuador y noroeste de Perú.

Si bien los puntos críticos para la diversidad de las especies raramente coinciden con los centros de endemismo, para la mayoría de los grupos taxonómicos los ecosistemas de los bosques de niebla por encima de aproximadamente 2000 m tienden a albergar niveles moderadamente altos tanto de riqueza de especies como de endemismo, aumentando este último hacia la línea del bosque. Los bosques de niebla juegan un papel importante no sólo como puntos críticos para la biodiversidad sino también para el control de la erosión, la estabilidad de las laderas y los servicios de aprovisionamiento de agua. Por encima de la línea del bosque, los páramos de la región norte de los Andes tropicales y el ecotono de la línea arbolada, incluyendo los parches aislados de bosques altoandinos de *Polylepis* en la región sur de los Andes tropicales, son igualmente importantes.

Para los organismos acuáticos, la cuenca del Magdalena-Cauca y del Alto Amazonas son puntos críticos de gran relevancia para la diversidad de las especies, mientras que las cuencas al oeste de los Andes en Ecuador representan un centro de endemismo. También son importantes para la mayoría de los taxones acuáticos los numerosos lagos, bofedales y turberas altoandinos por encima de los 3000 m, aunque la diversidad de peces es generalmente baja en altitudes mayores.

1.7. Ecosistemas prioritarios para la protección

En resumen, los siguientes ecosistemas o ecotonos son los más destacados como prioritarios para la protección: los bosques de niebla, el ecotono de la línea arbolada, y los ecosistemas altoandinos (por ejemplo, páramos). Como tendencia general, la riqueza de las especies aumenta con la humedad. Por lo tanto, los ecosistemas húmedos, como los bosques de niebla, juegan un papel muy importante para la conservación de la diversidad. También contienen muchos endémicos. Con la elevación de la base de las nubes debido al calentamiento global, los bosques de niebla se ven obligados a desplazarse hacia altitudes mayores, donde el terreno disponible es más escaso, reduciendo por lo tanto su extensión.

La línea del bosque altoandina es un lugar de endemismo importante para muchos grupos. El nivel general más alto de endemismo para todos los taxones en conjunto ocurre en el bosque de niebla justo debajo de la línea del bosque. El endemismo de las aves alcanza su nivel máximo en fragmentos aislados de bosque de *Polylepis* que se encuentran por encima de la línea del bosque en Perú y Bolivia, mientras que el endemismo de los mamíferos pequeños alcanza su máximo nivel en los bosques de niebla de los Yungas, en un cinturón estrecho de altitud justo por debajo de la línea del bosque. Por lo tanto, una prioridad es proteger los márgenes superiores de los bosques contra la tala forestal y la conversión a la agricultura.

El alto nivel de endemismo en algunos ecosistemas por encima de la línea del bosque indica la necesidad de conservación de las turberas y bofedales, los pajonales y los páramos altoandinos. También son importantes reservorios de agua, convirtiéndolos en un objetivo prioritario para las políticas de conservación.

2. CLIMA ANDINO: PRESENTE Y FUTURO

Los Andes tropicales, que se definen como la región ubicada entre los 25° de latitud sur y los 10° de latitud norte, y que alcanzan altitudes superiores a los 4000 m, representan un gran obstáculo para la circulación atmosférica. Los Andes actúan como una barrera orográfica que genera condiciones secas al oeste y condiciones húmedas al este en las latitudes tropicales/subtropicales (este patrón se invierte en las latitudes medias), y también fomentan interacciones tropicales-extratropicales, especialmente en la ladera oriental, donde la humedad se canaliza desde la región tropical del Atlántico y del Amazonas a la región sureste de América del Sur, por medio de una “corriente en chorro” en bajos niveles de altitud.



Los principales factores que afectan el clima andino son la selva amazónica al este, el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos alisios al norte y las principales corrientes oceánicas en el Pacífico Sudoriental. En las altitudes altas, la corriente en chorro subtropical juega un papel importante en el transporte de humedad, y cerca de la superficie, los sistemas permanentes de alta presión del Pacífico y del Atlántico Sur también son importantes. La topografía de los Andes tropicales y sus diversas ramificaciones también modulan el comportamiento de la precipitación, vientos, temperatura, humedad, nubosidad, el albedo, entre otros.

2.1. Variabilidad climática de la región norte de los Andes tropicales (Colombia-Ecuador)

La región norte de los Andes tropicales se caracteriza por la presencia de un clima muy húmedo, baja estacionalidad térmica y una marcada variación de la temperatura durante el día. La variabilidad de la temperatura está asociada a los gradientes de altitud y humedad, y depende fuertemente de las condiciones locales. Los gradientes térmicos verticales próximos a la superficie (es decir, el descenso en la temperatura del aire con la altitud) muestran diferencias considerables entre los flancos orientales y occidentales de los Andes, y entre las distintas laderas de los valles interandinos. En las altitudes superiores a los 4000 m se observan con regularidad tanto heladas como nieve. Si bien la precipitación es altamente variable, las mejores condiciones para la generación de precipitación (óptimo pluviométrico) tienen lugar en las altitudes entre 1800 y 2400 m, el mismo rango de altitud donde se encuentran densos bosques de neblina.

La principal fuente de variabilidad interanual en la región norte de los Andes es el fenómeno de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), que se caracteriza por la ocurrencia de fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña). ENOS es un fenómeno acoplado entre el océano y la atmósfera que tiene sus orígenes en el Pacífico tropical y es caracterizado por fluctuaciones irregulares entre sus fases cálidas y frías, con una periodicidad que varía entre 2 y 7 años. El Pacífico ecuatorial tiene una región de aguas relativamente frías en el este, conocidas como “la lengua fría”, y una zona amplia en el oeste de temperaturas en la superficie del mar (TSM) muy cálidas conocida como “la piscina cálida”. La fase

cálida de El Niño se caracteriza por el calentamiento inusual de la lengua fría en el Pacífico oriental, el desplazamiento hacia el este de la piscina cálida así como un dramático cambio en la dirección y fuerza del viento sobre el océano. En contraste, La Niña se asocia con un enfriamiento inusual del Pacífico tropical oriental y la presencia de vientos del este más fuertes.

Ambas fases de ENOS afectan la distribución temporal y espacial de la precipitación en gran parte de Sudamérica. En la zona norte de los Andes tropicales, los eventos de El Niño están asociados con niveles de precipitación por debajo de lo normal, mientras que lo contrario ocurre durante los eventos de La Niña en los Andes colombianos. En los Andes ecuatorianos, la relación entre las precipitaciones y el fenómeno ENOS no es uniforme, aunque la variabilidad climática parece ser mayor durante el período lluvioso de octubre a mayo, en comparación con el período seco de junio a agosto.

Una segunda fuente de variabilidad son oscilaciones decenales, pero la relación con el clima andino todavía está poco estudiada. El mayor impacto de la variabilidad decenal se observa en la modulación de ENOS sobre el Altiplano Occidental y probablemente esté relacionada con la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). Es necesario realizar más investigaciones a esta escala de tiempo en otras zonas de la región sur de los Andes.



Uno de los principales factores generadores de la variabilidad estacional en toda la región norte de los Andes tropicales es el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Esta banda de baja presión que rodea la Tierra cerca del ecuador es la zona donde convergen los vientos alisios provenientes de ambos hemisferios. Su actividad genera perturbaciones tropicales, nubosidad densa y precipitaciones de intensidad variable. La ZCIT no es estacionaria y migra latitudinalmente durante el año. La inclinación del eje de la Tierra determina el nivel de

radiación solar que llega a las diferentes latitudes y es el agente principal del desplazamiento de la ZCIT del sur hacia el norte en la primera mitad del año y en dirección opuesta durante la segunda mitad del año. En la región tropical de Sudamérica, el ancho promedio de la ZCIT fluctúa entre 300 y 500 km. Si bien la posición media del eje de la ZCIT se sitúa a los 5° de latitud norte aproximadamente, el rango anual de desplazamiento es de 6° de latitud sur a 12° de latitud norte.

2.2. Variabilidad climática de la región sur de los Andes tropicales (Perú-Bolivia)

El clima en la región sur de los Andes tropicales es generalmente más seco que en la región norte. Los sistemas de precipitación en esta región se encuentran principalmente controlados por la disponibilidad y el transporte de vapor de agua desde la cuenca amazónica, el comportamiento del Océano Pacífico y la dinámica del Lago Titicaca.

En el Altiplano, la relación entre la variabilidad de precipitación interanual y el ENOS es inconsistente. El Niño se asocia con frecuencia, pero no siempre, con sequías, mientras que La Niña generalmente se asocia con precipitaciones superiores a lo normal. No obstante, cuando la etapa de máximo desarrollo de ENOS ocurre en forma temprana o tardía en relación con la tempora-

da lluviosa en el verano austral, su influencia en el Altiplano es limitada. Los eventos ENOS parecen relacionarse más directamente con su impacto en el volumen de hielo de los glaciares andinos, y el momento en que ocurren estos eventos parece determinar su efecto en los mismos. El Niño de 1997-1998 fue un claro ejemplo ya que causó una importante reducción en el volumen de hielo del glaciar Chacaltaya, ubicado próximo a la ciudad de La Paz, Bolivia.



Las características climáticas intra-anales dominantes en el sur de los Andes tropicales son los prolongados períodos lluviosos y secos del ciclo anual, los que se ven afectados en gran parte por las fluctuaciones del Alta de Bolivia, un sistema de alta presión en altura sobre Bolivia. El Alta de Bolivia es lo que más afecta el flujo de humedad estacional que eventualmente genera precipitaciones en la región sur de los Andes tropicales, siendo por lo tanto de primordial importancia para la ecología de la región. El Alta de Bolivia se genera a través de la combinación de calor sensible de la cordillera de los Andes en Bolivia y la liberación de calor latente a causa de la convección intensa en la cuenca amazónica occidental. Tiene lugar en diciembre y continúa siendo dominante hasta marzo. Normalmente se debilita a comienzos de abril, a medida que la zona ZCIT se desplaza hacia el norte. La combinación del Alta de Bolivia y la corriente en chorro subtropical favorece la ocurrencia de tormentas eléctricas en el Altiplano.

La precipitación en el sur de los Andes tropicales ocurre casi exclusivamente entre los meses de octubre y abril, con el 50 % o más de la precipitación anual aconteciendo tan sólo en tres de dichos meses. El vapor de agua disponible en la selva tropical amazónica se traslada con frecuencia a la región sur de los Andes tropicales durante el verano austral (diciembre a febrero), siendo la fuente de vapor de agua más importante para el Altiplano. El Lago Titicaca genera suficiente humedad por evaporación para producir precipitación en su entorno inmediato durante todo el año. No obstante, la precipitación máxima generada en este lugar ocurre durante el verano austral, gracias al flujo de humedad del Amazonas. La precipitación en el Altiplano es altamente episódica (de limitada continuidad). Se alternan los períodos secos y lluviosos durante varios días dependiendo de la cantidad de vapor de agua disponible, los vientos del este y la posición del Alta de Bolivia.

2.3. Tendencias climáticas históricas observadas

En términos generales, la precipitación anual en los últimos 45 años ha marcado una tendencia descendente, a excepción de la Cordillera Occidental de los Andes colombianos, la zona sur de los Andes del Ecuador y a nivel local en el Altiplano en el sur de Perú (Figura 1a). Por otra parte, las temperaturas máximas (Figura 1b) y mínimas (Figura 1c) anuales han señalado tendencias crecientes durante el mismo período en casi todos los Andes tropicales (Vuille et al. 2000, Vuille et al. 2003).

Los análisis de los datos de radiación de onda larga emergente sugieren una tendencia positiva en la cobertura nubosa en la región norte de los Andes tropicales, especialmente de diciembre a febrero, mientras que una tendencia negativa fue observada en la zona sur de los Andes tropicales. La humedad relativa indica una tendencia positiva en Ecuador y en el sur de Colombia, mientras que el aumento es más moderado en el sur de Perú y en el oeste de Bolivia.

2.4. Proyecciones climáticas para los Andes tropicales

Conforme a los modelos de circulación global, los escenarios más probables para la región sugieren aumentos de temperatura en los Andes que superarán considerablemente a los esperados en las tierras bajas a sus alrededores. Los glaciares tropicales y los ecosistemas altoandinos serían los más afectados. Las observaciones de campo y los registros históricos de 50 años o más han servido para documentar el ritmo actual de retroceso glaciar en los Andes. Este retroceso es consistente con la elevación de la isoterma de cero grado (punto de congelación) y coincide con el calentamiento general de la tropósfera sobre los Andes. Las proyecciones de los modelos indican que muchos de los glaciares de baja altitud en los Andes podrían desaparecer completamente en los próximos 10 a 20 años (Bradley et al. 2006).

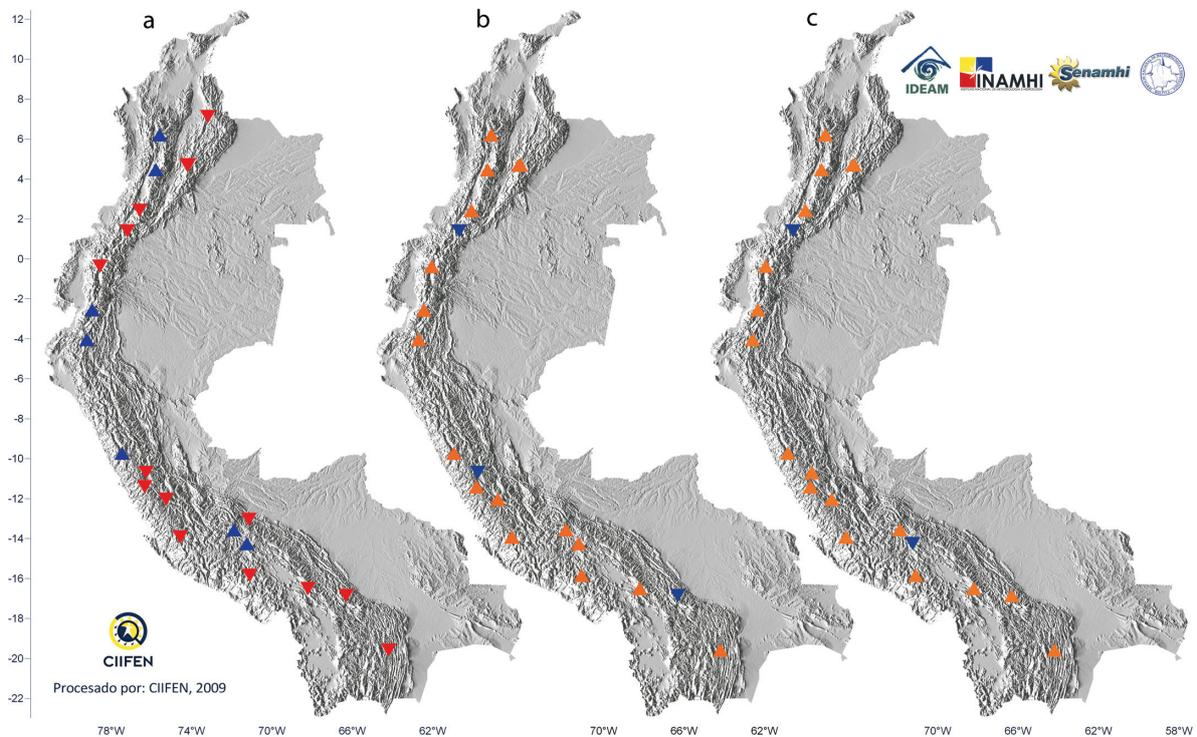


Figura 1: Las tendencias históricas en (a) la precipitación media anual, (b) la media de las temperaturas máximas anuales y (c) la media de las temperaturas mínimas anuales para el período 1964-2008. Las tendencias en los índices de precipitación y temperatura se calcularon mediante el uso de RClimDex (<http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/>) en base a datos diarios de precipitación y temperatura obtenidos de 24 estaciones meteorológicas. En cada panel sólo figuran las estaciones con una significancia estadística >80 %. Los datos proporcionados por los servicios nacionales de meteorología de Bolivia (SENAMHI), Colombia (IDEAM), Ecuador (INAMHI) y Perú (SENAMHI) fueron integrados por el Centro Internacional de Investigación del Fenómeno El Niño (CIIFEN). Los triángulos anaranjados indican tendencias crecientes en las temperaturas, y los rojos una tendencia decreciente en la precipitación, lo que indicaría mayor efecto de sequía y calentamiento, con consecuencias perjudiciales para el ambiente. Significancia estadística >80%.

Existe una confiabilidad limitada acerca de las proyecciones de cambio climático regional en la región andina, obtenidas de modelos climáticos regionales, debido a que los modelos climáticos globales no ofrecen la resolución adecuada y sus niveles de incertidumbre son muy altos. Esto

también es válido para las proyecciones divulgadas en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (Magrin et al. 2007, Christensen et al. 2007, Meehl et al. 2007). Por lo tanto, se hace difícil implementar medidas eficaces de adaptación. Por ejemplo, los modelos climáticos proyectan un efecto de calentamiento global más fuerte en las regiones montañosas en comparación con las zonas bajas, debido a la disminución del gradiente adiabático (Bradley et al. 2006, Urrutia y Vuille 2009). Lo que podría ser un resultado espurio generado por la mala representación de los Andes en los modelos globales, donde generalmente son representados como más anchos y bajos.

Las parametrizaciones de los procesos físicos diseñados para los modelos climáticos globales deben ser mejoradas para poder ser aplicadas a los modelos regionales de más alta resolución y reducir sustancialmente la incertidumbre inherente a los mismos. Se debe mejorar el desarrollo de modelos climáticos para los procesos locales y regionales.

En las regiones montañosas, la necesidad de contar con modelación climática regional y local es particularmente urgente. Muchos de los procesos meteorológicos e hidrológicos en las zonas montañosas se caracterizan por fuertes gradientes espaciales que pueden perturbarse fácilmente, y que necesitan ser debidamente representados en los modelos climáticos.

Una revisión de las proyecciones climáticas futuras de los Andes para el período 2071-2100, basada en los modelos regionales y los escenarios de emisiones A2 y B2 (Marengo et al. 2011) sugiere un aumento en la precipitación en los Andes tropicales (5° de latitud norte a 20° de latitud sur) bajo el escenario A2 de altas emisiones del IPCC de hasta 20-25 % en los flancos oriental y occidental. Los Andes occidentales del norte de Perú podrían experimentar un aumento de hasta un 70 %. Los flancos orientales de los Andes y los valles interandinos ubicados entre los 5° de latitud sur y los 15° de latitud sur son las zonas de mayor incertidumbre, ya que no se han detectado patrones claros. Por otra parte, en el Altiplano y en los Andes subtropicales al sur hasta la Patagonia, se proyecta una tendencia descendente en las precipitaciones de hasta un 10 %.

Las proyecciones climáticas futuras más consistentes señalan un aumento significativo de la temperatura del aire en la superficie en los Andes tropicales y al sur hasta la Patagonia, tendencia que es más pronunciada en el Altiplano, y en los Andes subtropicales, principalmente en los flancos orientales. Aunque se proyecta un calentamiento de los valles interandinos, debido a la topografía muy pronunciada de estas regiones, los distintos modelos varían en lo que respecta a la magnitud de sus proyecciones y consecuentemente su incertidumbre. ENOS no está bien representado en los modelos climáticos, y consecuentemente, el comportamiento futuro de ENOS y los eventos climáticos asociados continúan siendo inciertos. Del mismo modo, también existe considerable incertidumbre en las proyecciones de precipitación sobre los Andes y otros sectores de Sudamérica.

La incertidumbre en las proyecciones climáticas futuras se relaciona al hecho que se desconoce la magnitud de los escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero y del desarrollo humano, y a la representación demasiado simplificada de algunos procesos físicos, la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático y algunos procesos de retroalimentación en los modelos climáticos globales.



Además, las incertidumbres de los modelos globales y regionales parecen interactuar, aumentando así la incertidumbre total.

3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA BIODIVERSIDAD

3.1. El nicho climático y la forma en que las especies responden al cambio climático

Una especie vegetal o animal determinada puede sobrevivir y reproducirse dentro del rango de condiciones ambientales que conforman el nicho fundamental de la especie, el cual incluye el nicho climático al que se ha adaptado. Una especie cuyo nicho climático se desplaza, puede mantenerse en el mismo lugar y tolerar los cambios si tiene suficiente plasticidad fenotípica o si puede evolucionar y adaptarse rápidamente al cambio; o puede seguir gradualmente el desplazamiento geográfico por dispersión, por ejemplo trasladándose a latitudes mayores o altitudes más altas; o puede mostrar cierta plasticidad para sobrevivir en el lugar por algún tiempo y eventualmente alcanzar un hábitat más apropiado por dispersión a larga distancia; o en el peor de los casos, la especie no es capaz de adaptarse ni dispersarse y queda extinta a nivel local o global. Sin embargo, todavía nos hace falta mucha información para comprender en forma detallada los requisitos necesarios del nicho climático de la mayoría de las especies de animales y plantas en Sudamérica.

El desplazamiento de las especies en dirección a los polos o a zonas más altas de las montañas, hacia temperaturas más frías, como respuesta al cambio climático es un fenómeno muy bien documentado en las regiones templadas, y también es el caso de tres especies de ranas (al igual que sus hongos patógenos) en los Andes peruanos (Seimon et al. 2007). Sin embargo, la fragmentación antropogénica del hábitat puede impedir que una especie bajo amenaza siga su nicho climático, ya que el inhóspito entorno que se ha creado puede impedirle la migración a un área más adecuada, y esto puede causar la extinción.

Las especies que no son capaces de desplazar gradualmente su rango son las que corren mayor peligro. Algunas de ellas pueden tener la suficiente plasticidad fenotípica o evolucionar lo más rápido posible para adaptarse y sobrevivir bajo las nuevas condiciones climáticas. Es posible que las especies que no sean capaces de adaptarse puedan escapar la trampa del cambio climático mediante la dispersión, pero a menudo es imposible prever qué especies podrán ser capaces de dispersarse con éxito a distancias largas y establecer poblaciones fundadoras en áreas nuevas, ya que dichos procesos dependen fuertemente de eventos aleatorios. Esto es particularmente cierto en las montañas, donde la extrema heterogeneidad tanto topográfica como climática son barreras naturales para el desplazamiento de las especies. También es posible que las especies que no son capaces de adaptarse, ni seguir su nicho, ni dispersarse, lentamente disminuirán en abundancia y rango hasta quedar extintas.



Para conservar la variabilidad genética actual de las especies y las poblaciones, se necesitará implementar la migración/colonización asistida o la conservación *ex situ* (es decir, la protección en cautiverio). Actualmente se encuentra bajo discusión si migración/colonización asistida es una estrategia viable para la conservación de especies. Los críticos sostienen que los biólogos conservacionistas todavía no han desarrollado un grado suficiente de comprensión acerca del impacto que pueden ocasionar las especies introducidas como para tomar decisiones con fundamento sobre la translocación de las especies.



Además, dadas las limitaciones de los recursos, esta estrategia sería factible solamente para algunas especies. De todas formas, continua siendo una estrategia valiosa para algunos vertebrados y plantas.

3.2. Respuestas de las especies al cambio climático

No se sabe exactamente cómo cambiará el clima en los Andes tropicales. Los modelos de circulación general que se utilizan actualmente para las predicciones tienen una resolución espacial demasiado gruesa como para representar la topografía escarpada de los Andes. Las proyecciones climáticas disponibles muestran un calentamiento más pronunciado en las zonas más altas (por encima de los 4000 m), de una magnitud similar a la que se predice para las latitudes altas del mundo. La variabilidad climática natural a escala de milenios (grandes eras de hielo), siglos (el óptimo medieval de 950-1250 y la pequeña era de hielo de 1500-1880) y décadas (la Oscilación Decenal del Pacífico) ha afectado las condiciones climáticas en los Andes y seguirá haciéndolo. En gran parte del territorio por encima de los 3000 m, la variabilidad interanual de la temperatura está controlada principalmente por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), con diferencias de hasta 3,8°C en la media de temperaturas máximas diarias en el verano entre las fases de El Niño y La Niña en Cusco, Perú. Se trata de una amplitud mucho más grande que el aumento de temperatura neto proyectado para fines del siglo XXI en la mayoría de los escenarios de emisiones.

Por lo tanto, existe el riesgo de sobreestimar los impactos del cambio climático en la biodiversidad al predecir extinciones de manera equivocada, ya que esta variabilidad climática natural representa un ambiente evolutivo que habrá aumentado la resiliencia de las especies y de los ecosistemas frente a los extremos climáticos. Sin embargo, bajo el cambio climático casi todas las especies y los ecosistemas deberán adaptarse a temperaturas más altas a escalas sin precedentes, y es probable que eso afecte su distribución. El contexto de los Andes tropicales destaca un asunto clave para el desarrollo y el debate de los escenarios del impacto del cambio climático: ¿cuál es el nivel de incertidumbre aceptable para tomar decisiones en cuanto a políticas?

Afortunadamente, una respuesta a esta pregunta puede simplificarse, ya que el destino climático de la biodiversidad en los Andes tropicales puede relacionarse con unas pocas tendencias clave: aumento de la temperatura, cambios en los patrones de lluvias, cambios en la frecuencia de la cobertura de nubes y en las bases de las nubes, y aumentos en la frecuencia de eventos extremos. Existen muchas pruebas del aumento de la temperatura del aire en la región (+0,11°C/década en

los últimos 60 años), una tendencia que se ha intensificado en los últimos 25 años (+0,34°C/década). Las temperaturas mínimas han aumentado más que las máximas. Se están comenzando a comprender los cambios en los patrones de precipitación, pero esos cambios varían latitudinalmente y son diferentes entre el flanco oriental y occidental y en los valles interandinos. En la región norte de los Andes se está observando una disminución en la ocurrencia de tiempo nublado, más horas de exposición al sol, y bases de las nubes más altas. Por último, se espera que el cambio climático ocasione el aumento de los eventos extremos, como sequías, olas de calor y de frío y lluvias intensas. En los valles interandinos centrales de Perú, por encima de los 3500 m, la cantidad de eventos de lluvias intensas y heladas tempranas ha aumentado recientemente, y también se ha registrado una mayor cantidad de eventos de lluvias inusualmente fuertes en la Cordillera Central de los Andes colombianos.



¿Cómo reaccionarán las especies a estos cambios? A excepción del estudio en Perú sobre el desplazamiento de tres especies de ranas andinas hacia zonas más altas, casi no existen observaciones empíricas en los Andes tropicales. Las evidencias circunstanciales sugieren que un aumento en la altitud de las bases de las nubes podría ser importante para el desplazamiento hacia altitudes mayores o la extinción de algunas especies. Según un estudio de modelamiento bioclimático para el hemisferio occidental (Lawler et al. 2009), los Andes tropicales pueden experimentar un recambio muy grande de especies de aves, mamíferos y anfibios (un cambio superior al 90% en algunas áreas) en respuesta al cambio climático bajo varios escenarios. Se predice una pérdida de especies de 20 a 50% en algunas zonas altoandinas debido a las contracciones en el rango de distribución inducidas por el clima, mientras que es posible que la riqueza de las zonas bajas de las laderas de los Andes aumente aproximadamente un 25% gracias a la inmigración de especies de las tierras bajas. En base a estudios de otras áreas tropicales, se espera que el riesgo de extinción en los Andes tropicales sea mayor en las zonas más altas y en las cimas de las montañas, ya que las especies adaptadas a esos ambientes no tienen otro lugar adonde ir.

3.3. Interacciones ecológicas y características de las especies

Las especies se relacionan a través de una red de interacciones y dependencias. Existen vínculos complejos entre la fenología (es decir, las etapas y transiciones en el ciclo de vida de un organismo), las interacciones ecológicas entre especies (por ejemplo, depredación, competencia, herbivoría, polinización) y el clima. Esas relaciones determinan el destino de las especies y de ecosistemas enteros ante el cambio climático, pero hay poco conocimiento disponible desde el punto de vista biológico y ecológico para los Andes tropicales, lo que hace que sea difícil identificar las especies clave más estrechamente vinculadas, cuya protección podría evitar efectos de extinción en cascada.

Identificar la respuesta de cada una de las especies ante el cambio climático está mucho más allá de los límites de tiempo y financiamiento. En vez, es necesario desarrollar un marco generalizado para predecir las respuestas de las especies basado en características más generales y funcionales que

hacen que las especies sean especialmente vulnerables al cambio climático, y que se pueda aplicar a través de una amplia gama de ecosistemas. Esas características incluyen (1) requerimientos especializados de hábitat y/o micro-hábitat (a menudo asociado a un tamaño de población pequeño y/o rango geográfico reducido); (2) baja tolerancia ambiental, bajos umbrales o especialización de recursos; (3) dependencia de señales o disparadores ambientales específicos o interacciones interespecíficas que probablemente se vean alteradas por el cambio climático; (4) baja capacidad para dispersarse o colonizar nuevas áreas; y (5) baja fecundidad y/o tiempo de generación largo (IUCN 2001, Aitken et al. 2008).

3.4. Impactos del cambio climático en los ecosistemas de los Andes tropicales

En los Andes tropicales se reconocen unos 113 tipos de ecosistemas diferentes, además de otros 20 ecosistemas transicionales entre los Andes y las tierras bajas, diferenciados principalmente por la altitud, la temperatura y los regímenes pluviales. A través de los mecanismos que se describieron antes, el cambio climático afectará la composición de las comunidades biológicas y los ecosistemas, con la posible formación de nuevos ensamblajes de especies que no tienen equivalente hoy en día, lo que hace difícil predecir su comportamiento y función.

El cambio climático también influirá directamente sobre el funcionamiento físico de los ecosistemas: se espera un aumento de la erosión y de los deslizamientos de tierra en las laderas más empinadas en muchos bosques de niebla; un aumento en la razón entre precipitación vertical (lluvia) y precipitación horizontal (neblina con viento) que se prevé para algunos ecosistemas tradicionalmente dominados por la niebla, tales como el páramo, en el que se podría afectar la retención de agua; y un aumento en la altitud de la línea de nieve y granizo blando, lo que puede aumentar el escurrimiento, la sedimentación y la erosión.

Si bien casi todos los ecosistemas de los Andes tropicales podrían ser vulnerables al cambio climático, algunos se encuentran especialmente en riesgo. El páramo, el superpáramo y la puna en los altos Andes podrían reducirse y fragmentarse como consecuencia del incremento de temperatura. Los páramos tienen una distribución similar a islas, lo que los hace vulnerables a los efectos de borde. Poseen una biota altamente endémica vulnerable a la extinción de especies. Con el calentamiento, los bordes más bajos pueden convertirse en terrenos más adecuados para la agricultura y quedar expuestos a incendios antropogénicos. En los bosques de niebla, donde la mayoría de las especies habitan rangos estrechos de altitud, el cambio en la frecuencia de formación de las nubes y niebla, combinado con un aumento en la altitud de las bases de las nubes resulta en una disminución de la humedad, lo que afectará las diversas comunidades de



epífitas y la biota asociada tan característica de este ecosistema. Los hábitats acuáticos son particularmente vulnerables al cambio climático, con predicciones de disminución del oxígeno disuelto, aumento de la eutroficación y aumento de la evaporación en lagos y humedales, lo que provoca una reducción del hábitat y cambios en la calidad del agua. Los cuerpos de agua alimentados por el deshielo glaciar experimentarán un aumento temporal del nivel del agua durante el derretimiento de los glaciares, y luego disminuirá cuando la masa de hielo desaparezca. Los humedales, en particular los bofedales junto a los márgenes de los ríos y manantiales en pajonales y desiertos en



las zonas más altas de los Andes, son archipiélagos de diversidad en los que el cambio climático puede provocar una menor disponibilidad de agua, aumento de la salinización, y emisiones de carbono como dióxido de carbono y metano.

3.5. Servicios ecosistémicos en peligro

El cambio climático en los Andes tropicales afectará a más de 40 millones de personas que dependen de los ecosistemas regionales como fuente de agua, alimentos y muchos otros bienes y servicios ambientales. La

capacidad de brindar esos servicios depende de la funcionalidad del ecosistema que está en riesgo debido al cambio global ambiental. Las funciones del ecosistema, tales como la polinización, la regulación del clima, el reciclaje de nutrientes y el control poblaciones y de enfermedades, se proporcionan a través de complejas interacciones ecológicas entre las especies. La composición de especies suele ser clave para brindar dichos servicios. La pérdida y el cambio en el rango de distribución geográfico de las especies afectarán la composición de las comunidades ecológicas y, por lo tanto, los aportes clave de servicios para el bienestar humano.

Los servicios de aprovisionamiento y regulación de agua podrían verse gravemente afectados. Los glaciares, los humedales y el páramo esponjoso actúan como amortiguadores de la precipitación y el deshielo estacional, regulando los flujos de las corrientes de agua ladera abajo. Grandes ciudades como Bogotá, Quito y Lima dependen de las corrientes de agua alimentadas por glaciares y páramos para gran parte de su abastecimiento de agua. Los ríos andinos proporcionan agua de riego para la agricultura y generan aproximadamente la mitad de la electricidad en la región. El derretimiento de los glaciares y el secado de las áreas de humedales y páramo podrían alterar el volumen y los patrones del flujo de las corrientes de agua y amenazar la continuidad del suministro de agua y de la generación de energía en la región.

Los cambios en los servicios de aprovisionamiento y de apoyo de los ecosistemas para la agricultura debido a los cambios en los patrones de precipitación y temperatura podrían llevar a la intensificación de la agricultura en las áreas ya existentes dedicadas al cultivo o al pastoreo, o a la expansión de la frontera agrícola a mayores altitudes, una tendencia que ya es posible observar. Muchas plantas bajo cultivo dependen de la polinización de insectos, aves y murciélagos. El cambio climático y los efectos de enfermedades asociadas sobre esos polinizadores pueden afectar los rendimientos de los cultivos. La disminución de la diversidad en las zonas agrícolas podría elevar el

riesgo de fracaso de la cosecha debido a patógenos y enfermedades. Todo esto tiene como consecuencia una reducción en la seguridad alimentaria.

Los bosques protegen de la erosión a los paisajes empinados en las montañas. En los casos en los que el cambio climático provoca lluvias más abundantes e intensas, la estabilidad de las laderas y la seguridad de los asentamientos humanos ladera abajo pueden verse afectados, especialmente en los casos en los que el bosque ha sido talado o fragmentado. Además, los ecosistemas andinos tropicales contienen importantes reservas mundiales de carbono. Bajo las condiciones de calentamiento en el futuro, la capacidad de los bosques de almacenar o secuestrar carbono de la atmósfera podría disminuir y podrían convertirse en emisores netos de gases de efecto invernadero.

Los servicios ecosistémicos culturales pueden verse amenazados por el cambio climático. Si elementos icónicos de la biodiversidad se extinguen o sistemas completos pierden su carácter, su significado en la religión y la cosmología, y su papel en el turismo y la recreación basados en el ambiente pueden verse disminuidos, sin olvidar que el último aspecto es una importante fuente de ingresos para los países andinos tropicales.

3.6. Cambio climático y cambios en el uso de la tierra –una combinación peligrosa para la biodiversidad

La biodiversidad en los Andes tropicales, se encuentra fuertemente amenazada por el cambio climático, porque el clima es uno de los factores que determina la distribución de las especies. Los cambios de temperatura y humedad pueden desplazar el rango geográfico adecuado para una especie dada a tal grado que puedan provocar su extinción a nivel local o global. Si bien el clima ha cambiado a lo largo de la historia de la Tierra, la actividad humana actual, como la fragmentación del hábitat y el cambio de uso de suelo interactúan de modo sinérgico con el cambio climático antropogénico, exacerbando las amenazas a la biodiversidad. La necesidad de contar con tierras cultivables ha transformado vastas extensiones de ecosistemas naturales en una matriz agrícola, donde sólo permanecen pequeñas islas de vegetación natural. Como resultado, se estima una extinción de especies que compite en magnitud con los pocos eventos de extinción masiva evidenciados en los registros fósiles.



Bajo los escenarios de calentamiento proyectados para el clima de los Andes tropicales en un futuro cercano, las amenazas a la biodiversidad deben atenderse con prioridad por parte de los responsables de planificar la conservación. Deben incluirse explícitamente en los planes de adaptación, para poder conservar las riquezas biológicas de la región y sus servicios ambientales, de los cuales dependen millones de personas.

4. CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

4.1. Conservación a través del manejo adaptativo

En vista de la magnitud esperada del cambio climático y sus consecuencias para la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos, es fundamental que se adapten las estrategias de manejo de conservación para que continúen siendo efectivas. Las áreas protegidas son la herramienta más importante para la conservación de la biodiversidad en los Andes tropicales. Han aumentado en cantidad y en área cubierta en las últimas dos décadas. Aproximadamente el 15% del área de los cuatro países andinos tropicales se encuentra actualmente bajo protección nacional (10% en Colombia, 11% en Perú, 16% en Bolivia y Ecuador).

Si bien faltan evaluaciones sistemáticas, se estima que aproximadamente el 70-80% de todas las especies están representadas en los parques nacionales, pero esa cifra puede ser considerablemente menor para las especies endémicas. Las áreas protegidas no siempre cubren las áreas más valiosas o vulnerables, siendo las tierras bajas y el pie de monte las que se encuentran sobre-representadas. Además se ha prestado poca atención a si las áreas protegidas se encuentran ubicadas adecuadamente para preservar procesos ecológicos clave. Actualmente se están integrando a los sistemas nacionales de protección áreas de conservación adicionales. Esas áreas podrían tener un papel fundamental para adaptar las medidas que se toman a nivel nacional para la conservación de la biodiversidad a los desafíos del cambio climático.

El manejo adaptativo es un proceso iterativo de toma de decisiones óptimas que intenta reducir la incertidumbre a través del tiempo mediante la monitorización a nivel de sistema (Figura 2). Esto resulta útil para lograr una mejor conservación de la biodiversidad. Sin embargo, la alta variabilidad histórica y contemporánea en el clima andino representa un desafío, ya que hace más difícil definir escenarios y objetivos realistas de conservación a las escalas espaciales que se requieren para la planificación. Además, los complejos patrones de biodiversidad y sus interacciones con las necesidades humanas complican las posibles soluciones.

El manejo adaptativo puede desglosarse en respuestas a nivel de especies, sitio y paisaje. Esos enfoques exigen coordinación e integración a nivel local, nacional y regional para que sean efectivos dentro de una estrategia integral de adaptación. El desarrollo de un proceso de conservación sistemático para la región en su conjunto, respetando al mismo tiempo el contexto nacional y local, es un desafío crítico para la ciencia y las políticas. Si bien ya existen las bases potenciales para dicho proceso (por ejemplo, la Estrategia Regional de Biodiversidad para los Países del Trópico Andino,

Comunidad Andina de Naciones 2002), el cambio climático es actualmente un componente marginal en dichos planes. Solamente Colombia ha incorporado recientemente el cambio climático como un componente explícito en la planificación de la conservación.

Los enfoques a nivel de especies incluyen la eliminación del estrés y de las amenazas actuales para una especie o ecosistema vulnerable (por ejemplo, la caza). Eso exige un conocimiento mínimo de los posibles



impactos del cambio climático, y a su vez es una manera práctica de aumentar la resiliencia en base a la sencilla premisa de que un sistema que se enfrenta a menos estrés puede lidiar mejor con el cambio climático. Los planes de acción para especies individuales que cuentan con el respaldo de la ley también ofrecen un medio confiable para reducir la vulnerabilidad de las especies ante el cambio climático. En los casos en que una especie se encuentra en riesgo inminente de extinción, es posible que se deba considerar un enfoque de conservación *ex situ* o, como alternativa, un enfoque *in situ* donde sea factible, es decir, el traslado de plantas y animales a sitios en los que se amortiguarán los efectos del cambio climático o donde se pueda hacer un manejo para mitigar los efectos negativos del cambio climático, a pesar de los costos, dificultades y riesgos reconocidos en este enfoque.

La protección de áreas continúa siendo una importante estrategia de conservación a nivel de sitio. Es una prioridad aumentar la cobertura total de la red de áreas protegidas con el objetivo de incluir rangos de especies que actualmente no están incluidas. Sin embargo, basar la selección de nuevas áreas en patrones actuales de biodiversidad puede ser insuficiente ante el cambio climático, y es necesario considerar también los posibles cambios en los patrones y en los procesos de la biodiversidad. Un enfoque útil es el modelamiento de los rangos de distribución de especies

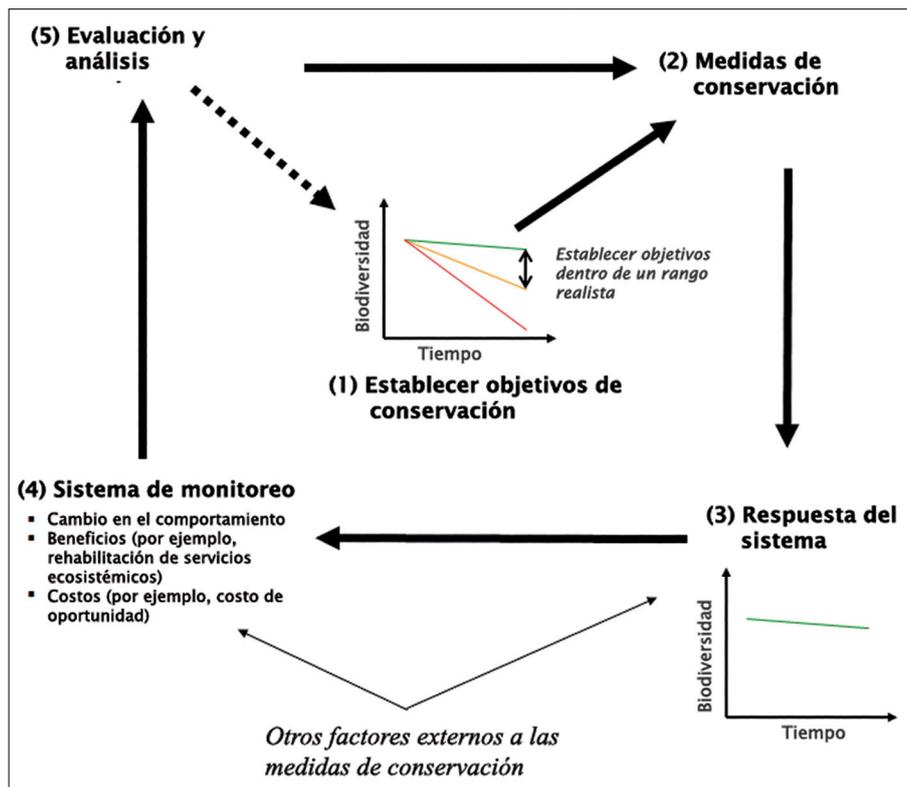


Figura 2: Ilustración esquemática de las cinco etapas del proceso de manejo adaptativo: (1) Definir escenarios futuros probables en base a modelos y/u opinión de expertos y establecer objetivos de conservación dentro de ese rango plausible. (2) Implementar acciones de conservación. (3) Las acciones llevarán a un nuevo comportamiento del sistema, que se verá afectado por varios factores externos. (4) Monitorizar para detectar cambios en el comportamiento del sistema y en la influencia de factores externos, incluyendo la medición de los costos directos e indirectos de las acciones de manejo, tanto positivos (por ejemplo, rehabilitación de servicios ecosistémicos) como negativos (por ejemplo, costo-oportunidad de producción agrícola perdida). (5) Usar los datos para ajustar los modelos/escenarios y objetivos iniciales. El ciclo se repite.

basados en un sistema de información geográfica bajo diferentes escenarios de cambio climático. Una prioridad en la investigación es identificar áreas que pueden haber funcionado como refugios biológicos naturales en el pasado gracias a su estabilidad climática y resiliencia. La conservación de dichos sitios debe ser una prioridad, ya que se puede esperar que conserven su biota actual bajo un cambio climático.

Las áreas de conservación deben contener gradientes ambientales para crear mosaicos de uso de suelo que mantengan la conectividad de hábitats. Se deben incluir gradientes angostos y anchos. Los gradientes altitudinales, de tipo de suelo y humedad son particularmente importantes en los Andes tropicales. La preservación de los ecotonos es importante, ya que las poblaciones que habitan en ellos probablemente estén pre-adaptadas al estrés fisiológico y pueden poseer rasgos genéticos adaptativos que no se encuentran en las poblaciones del área núcleo. Un ecotono importante es la línea del bosque, que contiene muchas especies endémicas y es sensible a los impactos climáticos y humanos. Es posible monitorizar y hacer seguimiento de los ecotonos gracias a los últimos avances en la teledetección remota.

Teniendo en cuenta la velocidad y magnitud potencial del desplazamiento de los rangos de distribución de las especies y la alta probabilidad del recambio de especies dentro de las áreas de conservación ante el cambio climático, la mayoría de las estrategias de conservación basadas en sitios continuarán cumpliendo su papel solamente si los paisajes en los que están inmersos permiten que las especies se muevan a través de ellos. Las áreas protegidas grandes pueden incluir suficiente conectividad entre los hábitats, heterogeneidad y gradientes ambientales como para ser manejadas con un enfoque a nivel de paisaje. Los corredores que sirven para vincular las áreas protegidas son unidades de conservación y manejo útiles, y ya se han definido varios entre diferentes partes de la región (por ejemplo, el corredor Vilcanota-Amboró en Bolivia y Perú). El aumento de la eficiencia de uso de la tierra puede demostrar ser clave, ya que fomentar la concentración de la producción agrícola dentro de áreas restringidas con alto rendimiento puede favorecer la desintensificación en áreas menos productivas y más vulnerables, y disminuir la invasión de hábitats naturales.

Los corredores de bosques ribereños sirven como caminos o refugios para muchos taxones del bosque y es probable que persistan bajo el cambio climático. Al conectar las cuencas en las zonas altas con las tierras bajas, se incorporan muchos gradientes ambientales. Además, los bosques ribereños reducen el transporte de sedimentos y/o productos químicos hacia el agua desde el paisaje circundante, preservando la calidad del agua para las especies acuáticas y el uso humano.



La monitorización es un componente fundamental del proceso de manejo adaptativo (Figura 2, Etapa 4). Permite una evaluación de los parámetros de interés de la biodiversidad y del ambiente para interpretar los cambios actuales y futuros, un medio para validar los resultados de los modelos, un mecanismo de alerta temprana de cambios inesperados y una medida de la eficacia de las medidas de conservación. La elección de los indicadores adecuados para la monitorización puede ser difícil. Es posible elegir una variedad de diferentes indicadores,

dependiendo del objetivo de la monitorización, que varían de densidades poblacionales de especies individuales, a la funcionalidad del ecosistema y a la estructura del ecosistema con teledetección remota. El uso de una amplia gama de indicadores aumenta la capacidad de detectar las señales del cambio climático y de organizar respuestas rápidas de manejo adaptativo. Las series de datos a largo plazo son vitales para comprender la variabilidad natural de los sistemas, aunque en general no hay registros estandarizados de monitorización a largo plazo en los Andes tropicales.

4.2. Oportunidades - demostrar el valor de mantener la funcionalidad de los ecosistemas

El cambio climático plantea una gran cantidad de riesgos, pero también ha hecho que las sociedades presten atención a la biodiversidad, los ecosistemas y los servicios que brindan como componentes fundamentales del sistema Tierra, en vez de considerarlos como bienes comunes globales que pueden ser explotados libremente. El valor de los ecosistemas debe reflejar no solo el valor comercial directo o comercializable (por ejemplo, suministro de servicios hidrológicos), sino también los bienes y servicios que son difíciles de cuantificar (por ejemplo, valor cultural o espiritual). El mantenimiento de los servicios prestados por ecosistemas funcionales puede representar la manera con mejor relación costo-beneficio para la mitigación y adaptación ante el cambio climático. La “adaptación basada en los ecosistemas”³ es particularmente importante en los países en vías de desarrollo. La valoración de los servicios ecosistémicos como parte del manejo adaptativo representa una herramienta clave para generar decisiones de políticas favorables para la biodiversidad.

Los esquemas de pago por servicios ecosistémicos son incipientes en la región. Bogotá, Santa Cruz y Quito han comenzado a utilizar esquemas de pago por servicios ecosistémicos en tarifas públicas para pagar los proyectos de conservación y restablecimiento de cuencas hidrológicas. En una escala potencialmente mucho más grande, la introducción de la reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD, en inglés⁴) como una estrategia de mitigación del cambio climático podría proporcionar un financiamiento importante para la conservación de los bosques. Un estudio reciente en el Parque Nacional Cordillera Azul de Perú demostró que el manejo en los últimos ocho años ha disminuido la tasa de deforestación en la zona de amortiguación y ha evitado una mayor deforestación en el parque. Sin embargo, la continuidad del manejo depende de la renovación de los ingresos, que la estrategia REDD podría proporcionar. Los beneficios de la reducción de emisiones por deforestación y degradación para la biodiversidad podrían aumentar si los legisladores decidieran priorizar los bosques con gran diversidad para recibir el financiamiento REDD.

3. <http://www.cbd.int/climate/intro.shtml>

4. <http://www.un-redd.org/>

5. DESAFIOS PARA LA CONSERVACION Y EL MANEJO DE LA BIODIVERSIDAD ANDINA TROPICAL FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO

5.1. Vacíos de conocimiento

Se deben intensificar los recursos financieros y humanos para la investigación de la biodiversidad en todos los países andinos tropicales y para casi todos los taxones, ya que los vacíos de conocimiento taxonómico son hoy la limitación más importante a la hora de comprender mejor los patrones de diversidad. Los inventarios de los grupos de especies extremadamente ricos como los insectos, las algas, el zooplancton y la mayoría de las plantas son altamente insuficientes, pero también es necesario realizar más investigaciones acerca de los grupos menos diversos como los peces. Los países andinos tropicales deben invertir más en taxonomía y en historia natural, fomentar la capacitación y las oportunidades laborales para especialistas en biodiversidad e incrementar la financiación. Además, incluso para las especies descritas, nuestro conocimiento sobre los rangos de distribución es a menudo escaso, lo que afecta nuestra capacidad para detectar patrones genuinos de endemismo. Las densidades poblacionales, los rasgos biológicos, las interacciones y requisitos ecológicos y las limitaciones fisiológicas, que son parámetros críticos para las evaluaciones de vulnerabilidad, son poco entendidos en la gran mayoría de las especies.



El conocimiento actual de los patrones de riqueza de especies en los Andes se basa en una pequeña cantidad de estudios, y los diferentes métodos de muestreo usados dificultan las comparaciones entre regiones y taxones. Los patrones de diversidad altitudinal están comparativamente bien estudiados, pero otros gradientes no lo están. Los factores que causan los patrones geográficos de diversidad están siendo debatidos a nivel mundial, y la región andina tropical podría contribuir a este debate si hubiera una mayor disponibilidad de estudios cuantitativos que utilizaran métodos de muestreo sólidos y estandarizados a lo largo de gradientes ambientales completos. Para comprender mejor los posibles impactos del cambio climático, se necesitan estudios de cambios temporales naturales en la composición y diversidad de las especies, lo que requiere un establecimiento de parcelas permanentes de investigación con un remuestreo periódico. Se destacan dos actividades actuales, el proyecto GLORIA⁵ en sitios altoandinos por encima de la línea arbolada y el Kosñipata Ecosystem Project⁶ en el sureste de Perú, pero es indispensable una cobertura geográfica mucho más amplia de estudios similares para apoyar los esfuerzos regionales de mitigación y adaptación.

5. www.gloria.ac.at

6. <http://www.biosci.missouri.edu/avianecology/kosnipata/index.html>

5.2. Necesidades de la ciencia de la biodiversidad relacionadas con el clima en los Andes tropicales

Los ecosistemas de la alta montaña se encuentran entre los ambientes más sensibles al cambio climático y brindan numerosos bienes y servicios ambientales. Aunque el conocimiento sobre el retroceso de los glaciares y sus consecuencias ha aumentado de forma significativa, el entendimiento de las implicaciones del cambio climático en el funcionamiento de los ambientes andinos exige trabajo adicional. Estudios recientes (Ruiz et al. 2008, 2009) sugieren que los cambios en las condiciones climáticas ya han alterado los patrones locales de circulación responsables de producir y transportar el vapor de agua a los ambientes de páramo en los Andes colombianos. Estos cambios probablemente hayan contribuido a la desaparición de cuerpos de agua altoandinos y a una mayor ocurrencia de incendios en los páramos colombianos.

Para lograr un conocimiento integral de los efectos del cambio climático en la biodiversidad y los ecosistemas andinos tropicales, es necesario atender los siguientes vacíos de conocimiento clave:

- Se necesita una mayor resolución espacial de las tendencias de la precipitación y la temperatura ambiental a nivel de superficie. Una combinación de esfuerzos de modelamiento y observación, así como el uso de los datos de re-análisis podrían ayudar en esta tarea.
- Es crucial recobrar y analizar los datos climáticos recolectados a diferentes altitudes en una misma región para aumentar nuestro conocimiento de los procesos verticales, cambios en la base de las nubes y patrones temporales.
- Los análisis deben incluir otros factores climáticos que no son considerados frecuentemente, tales como la humedad relativa, el albedo superficial, la nubosidad y la radiación solar, todos los cuales parecen desempeñar un papel significativo en la integridad de los ecosistemas andinos.
- Es fundamental mejorar nuestro conocimiento de los procesos de convección profunda en los Andes tropicales para aumentar la precisión de los modelos climáticos a escala local. Es necesario investigar los eventos climáticos extremos, los cuales pueden causar extinciones locales y pueden ser particularmente devastadores para la biodiversidad en las zonas con altos niveles de endemismo. Los datos glaciológicos deberían estar integrados a estudios interdisciplinarios relacionados con la biodiversidad.
- Es importante que los análisis de las tendencias climáticas incorporen datos de tantas estaciones disponibles como sea posible. A la fecha, los análisis generalmente han incluido únicamente conjuntos de datos limitados. Nuestro conocimiento sobre los impactos regionales y locales de El Niño-Oscilación del Sur y la Oscilación Decenal del Pacífico debería incrementarse.
- Es importante incorporar estudios paleoclimáticos en los análisis.
- El impacto de los cambios en el uso de la tierra sobre las condiciones climáticas debe ser cuantificado.
- Deberían continuar, y recibir apoyo, los esfuerzos de modelamiento climático regional y de reducción de escala.



5.3. Capacidades institucionales

Entre las limitaciones para atender los impactos del cambio climático y global en la biodiversidad de los Andes tropicales se encuentran las limitaciones en la capacidad institucional. Esto es el resultado de las competencias y las responsabilidades superpuestas, la falta de interconexiones dentro y entre instituciones, autoridades y otras partes interesadas, y una carencia de esfuerzos de integración regional de ciencia y conservación.

La cantidad de científicos y responsables de la formulación de políticas públicas técnicamente capacitados es muy pequeña en la región, si se considera la magnitud y complejidad de los temas de biodiversidad y clima. Las oportunidades de empleo (especialmente en el sector universitario) son limitadas para los científicos andinos que obtuvieron títulos universitarios avanzados en el exterior, a excepción de Colombia, lo que provoca una fuga de cerebros que afecta la capacidad regional para elaborar propuestas atractivas, captar fondos y administrar proyectos de investigación complejos. No existen suficientes programas de becas para los científicos jóvenes con talento.

Las limitaciones financieras y de infraestructura en la región también son preocupantes. La financiación para investigación dentro de los países es sumamente limitada o inexistente, las instalaciones de los laboratorios generalmente son inadecuadas, y la investigación y los análisis de última tecnología como códigos de barras o el análisis de isótopos estables deben realizarse en el exterior.

Para mejorar la capacidad, claramente se ve como necesario: (1) desarrollar en la región programas educativos interdisciplinarios de nivel universitario sobre biodiversidad y cambio climático, dirigidos tanto a científicos como a tomadores de decisiones; (2) promover oportunidades de capacitación (cursos cortos de 1-2 semanas) sobre biodiversidad y cambio climático para autoridades gubernamentales a nivel operativo, líderes locales y otras partes interesadas para facilitar la comprensión de los problemas actuales; (3) dirigirse a las oficinas gubernamentales clave (nacionales y subnacionales) con misiones cortas de desarrollo de la capacidad y/o sesiones informativas para lograr la inclusión de los asuntos de biodiversidad y cambio climático en las iniciativas y estrategias de adaptación a nivel nacional; (4) promover el desarrollo de estrategias en el sector académico que ofrezcan incentivos para que los instructores universitarios realicen investigaciones y publiquen los resultados; (5) promover una mayor comunicación entre los científicos y los legisladores; (6) establecer y promover redes de trabajo, plataformas y publicaciones regionales sobre biodiversidad y cambio climático (por ej., conferencias científicas regulares, publicación de una revista científica regional) para coordinar y facilitar el intercambio y distribución de información entre científicos y tomadores de decisiones y otras partes interesadas.



5.4. Áreas prioritarias para la investigación interdisciplinaria

Nuestro conocimiento tanto sobre la biodiversidad (inventario taxonómico, patrones de diversidad, rasgos de las especies, interacciones y requisitos ecológicos, procesos ecosistémicos) como el clima (regímenes de precipitación y de temperatura, tendencias y patrones de formación de nubes) aún es rudimentario y requiere mucha investigación básica en los Andes tropicales. Sin embargo, más allá de estos vacíos de conocimiento en las disciplinas individuales, hay una necesidad aún mayor de una investigación interdisciplinaria que integre las ciencias de la biodiversidad y del clima y, para analizar las medidas de adaptación local, también las ciencias sociales y económicas.



La monitorización a largo plazo de la biodiversidad y el clima en parcelas permanentes de investigación es una prioridad para determinar las respuestas de los diferentes componentes de biodiversidad al cambio climático y para desarrollar índices de este fenómeno global. La monitorización es una parte importante e integral del proceso de manejo adaptativo. La mayor parte de las estaciones climáticas en los Andes tropicales se sitúan en ciudades y pueblos o cerca de ellos, lo que genera una necesidad de monitorizar regiones más remotas e inhabitadas, especialmente en las zonas que albergan altos niveles de diversidad o endemismo y en ecosistemas que son potencialmente vulnerables a los impactos del cambio climático. Esta necesidad también crea oportunidades para sinergias entre la monitorización del clima y la biodiversidad.

El grado de vulnerabilidad de los ecosistemas andinos, comunidades bióticas y especies individuales frente al cambio climático sólo puede ser estimado. Por lo tanto, se necesitan evaluaciones sistemáticas de la vulnerabilidad de los ecosistemas y de las comunidades bióticas junto con análisis de las tendencias climáticas observadas y el impacto del cambio climático proyectado para realizar evaluaciones de riesgo a lo largo de la mayor parte de los Andes tropicales. De la misma manera, es crucial la investigación de la resiliencia y los umbrales de integridad de los ecosistemas ante el cambio climático y de uso de la tierra, si se espera que los ecosistemas se gestionen por su capacidad para proporcionar bienes y servicios ambientales.

Por último, se debería avanzar en todos los aspectos del modelamiento de rangos de distribución de las especies en base a sistemas de información geográfica, desde los datos de ubicación de las especies hasta los estratos ambientales y los modelos en sí mismos, a fin de aumentar la fiabilidad de las predicciones de los modelos y mejorar la planificación de conservación dentro del proceso de gestión adaptativa.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aitken, S.N., S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang y S. Curtis-McLane. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1: 95-111.
- Bradley, R.S., M. Vuille, H.F. Díaz y W. Vergara. 2006. Climate change: Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science* 312: 1755-1759. Centro de Ciencia do Sistema Terrestre – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais .
- Christensen J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr y P. Whetton. 2007. Regional Climate Projections. En: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Chapter 11, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IUCN. 2001. IUCN Red list categories and criteria. Version 3.1. Disponible en: <http://www.iucnredlist.org/technical-documents/categories-and-criteria>
- Lawler J.J., S.L. Shafer, D. White, P. Kareiva, E.P. Maurer, A.R. Blaustein y P.J. Bartlein. 2009. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology* 90:588-597.
- Magrin, G., C. Gay, D. Cruz, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre y A. Villamizar. 2007. Latin America, climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. En: Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (eds.). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Marengo J.A., J.D. Pabón, A. Díaz, G. Rosas, G. Ávalos, E. Montealegre, M. Villacis, S. Solman y M. Rojas. 2011 (en proceso de publicación). Capítulo 7 en: *Climate change effects on the biodiversity of the tropical Andes: an assessment of the status of scientific knowledge*. IAI y SCOPE, São José dos Campos y París.
- Meehl, G., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer y K.E. Taylor. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel data set: a new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88:1383-1394.
- Ruiz D., H.A. Moreno, M.E. Gutiérrez y P.A. Zapata, 2008. Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment* 398:122-132.
- Ruiz, D., M.P. Arroyave, A.M. Molina, J.F. Barros, M.E. Gutierrez y P.A. Zapata. 2009. Signals of climate variability/change in surface water supply of high-mountain watersheds - Case study: Claro River high mountain basin, Los Nevados Natural Park, Andean Central Mountain Range, Colombia. World Bank Group / School of Engineering, Medellín, Colombia.
- Seimon, T.A., A. Seimon, P. Daszak, S.R.P. Halloy, L.M. Schloegel, C.A. Aguilar, P. Sowell, A.D. Hyatt, B. Konecky y J.E. Simmons. 2007. Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology* 13:288-299.
- Stattersfield A.J., M.J. Crosby, A.J. Long y D.C. Wege. 1998. Endemic bird areas of the world: priorities for biodiversity conservation. Conservation Series No. 7. BirdLife International, Cambridge.
- Urrutia, R. y M. Vuille. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*. 114:1823-1837.
- Vuille, M., R.S. Bradley y F. Keimig. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical pacific and atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research* 105:12447-12460.
- Vuille, M., R. Bradley, M. Werner y F. Keimig. 2003. 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change* 59:75-99.

Inter-American Institute for Global Change Research

Av. dos Astronautas 1758

12227-010 SP - São José dos Campos, Brazil

www.iai.int

