

Franco Vidal, Lorena; Delgado, Juliana; Andrade, Germán I.
Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global
Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía, vol. 22, núm. 2, julio-diciembre, 2013,
pp. 69-85
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281826970005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global

Fatores da vulnerabilidade das áreas úmidas andinas da Colômbia à mudança climática global

Vulnerability Factors to Global Climate Change
in the High Andean Colombian Wetlands

Lorena Franco Vidal*

Fundación Humedales, Colombia

Juliana Delgado**

The Nature Conservancy y Fundación Humedales, Colombia

Germán I. Andrade***

Universidad de los Andes, Colombia

Resumen

Los humedales altoandinos en Colombia son esenciales para la adaptación de muchas comunidades humanas al cambio climático y también particularmente sensibles a este fenómeno. Para la gestión adaptativa de los humedales, basada en su carácter y funcionalidad ecosistémica, resulta insuficiente conocer solo la magnitud de la amenaza climática; también se deben conocer aspectos que determinan una mayor vulnerabilidad. En la literatura se encuentran atributos y procesos que pueden, bajo determinadas circunstancias, funcionar como factores de vulnerabilidad de los humedales altoandinos al cambio climático. Con base en ellos, aquí se proponen factores ecológicos y sociales de vulnerabilidad que, interpretados de manera conjunta en la perspectiva del cambio climático, permiten orientar su manejo hacia trayectorias de cambio que sean socioecológicamente resilientes al fenómeno.

Palabras clave: adaptación sostenible, cambio climático global, evaluación de vulnerabilidad, humedales altoandinos, servicios ecosistémicos.

Resumo

As áreas úmidas andinas na Colômbia são essenciais para a adaptação de muitas comunidades humanas às mudanças climáticas e também particularmente sensíveis a este fenômeno. Para a gestão adaptativa das áreas úmidas, baseada no seu caráter e funcionalidade ecosistêmica, resulta insuficiente conhecer apenas a magnitude da ameaça climática; também se devem conhecer aspectos que determinam uma maior vulnerabilidade. Na literatura encontram-se atributos e processos que podem, sob determinadas circunstâncias, funcionar como fatores de vulnerabilidade das áreas úmidas andinas às mudanças climáticas. Com base nisso, aqui se propõe fatores ecológicos e sociais de vulnerabilidade que, interpretados de maneira conjunta na perspectiva das mudanças climáticas, permitem orientar sua gestão até trajetórias de mudanças que sejam social e ecologicamente flexíveis ao fenômeno.

Palavras-chave: adaptação sustentável, mudança climática global, avaliação de vulnerabilidade, áreas úmidas andinas, serviços ecosistêmicos.

Abstract

Colombia's high Andean wetlands, which are particularly sensitive to climate change, are essential for the adaptation of many human communities to that phenomenon. An adaptive management of the wetlands, based on their nature and ecosystemic functionality, requires acknowledgement not only of the magnitude of climate threat, but also of the aspects that determine vulnerability. The existing scientific literature refers to attributes and processes that, under certain circumstances, could make those wetlands vulnerable to climate change. On the basis of those factors and from the perspective of climate change, the article discusses a set of ecological and social vulnerability factors that make it possible to orient the management of wetlands along lines that make them socially and ecologically resilient to the phenomenon.

Keywords: sustainable adaptation, global climate change, vulnerability assessment, High Andean wetlands, ecosystem services.

RECIBIDO: 24 DE MAYO DEL 2012. ACEPTADO: 14 DE DICIEMBRE DEL 2012.

Artículo de revisión en el que se proponen factores ecológicos y sociales de vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia por el cambio climático global. Estos factores, interpretados de manera conjunta en la perspectiva del cambio climático, permiten orientar su manejo hacia trayectorias de cambio que sean socioecológicamente resilientes al fenómeno.

* Dirección postal: calle 81 n.º 19A-18 of. 301, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: lfranco@fundacionhumedales.org

** Dirección postal: Carrera 17 n.º 134A-47 casa 2, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: jdelgado@tnc.org

*** Dirección postal: Facultad de Administración, Universidad de los Andes y Fundación Humedales, Bogotá.

Correo electrónico: gandrade@uniandes.edu.co

Introducción¹

Los ecosistemas tropicales andinos presentan una alta vulnerabilidad al cambio climático (Anderson et ál. 2010). El cambio climático es cualquier modificación en el estado del clima que pueda evidenciarse en cambios estadísticos en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante períodos de décadas o por más tiempo (IPCC 2007). Para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el fenómeno se atribuye, directa o indirectamente, a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global y que, junto con la variabilidad climática natural, son observados durante períodos comparables de tiempo. Estas actividades humanas, que resultan también en cambios en el uso de la tierra y en alteración de la atmósfera por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC 2007), han ejercido durante los últimos cien años una influencia significativamente mayor sobre el sistema climático del planeta que la de los procesos naturales internos (Brönnimann et ál. 2008).

Entre los ecosistemas más susceptibles al clima cambiante están los humedales, ecosistemas situados en la transición entre los ambientes terrestres y acuáticos (Farinha et ál. 1996), integrados con los ciclos hidrológicos y particularmente importantes para la adaptación al cambio climático (Le Quesne et ál. 2010), que han sustentando formas de vida de numerosas comunidades humanas (Ramsar 2002). La adaptación humana al cambio climático se entiende como las respuestas de la sociedad que le permiten enfrentar de manera más adecuada los eventos extremos del clima y la variabilidad climática (IPCC 2012). Sin embargo, cuando la adaptación se plantea centrada exclusivamente en las necesidades humanas, se pone en riesgo el carácter ecológico de los ecosistemas (Eriksen et ál. 2011), aumentándose la vulnerabilidad al cambio climático. Por el contrario, la adaptación basada en los ecosistemas (ABE en Andrade et ál. 2011) busca dirigir el cambio manteniendo la funcionalidad del sistema, es decir su desempeño como un todo (Jax 2010).

Para la gestión adaptativa de los humedales, basada en el carácter y funcionalidad ecosistémica, resulta insuficiente solo con conocer la magnitud o intensidad de la amenaza climática, es decir de la alteración de las variables climáticas. Es necesario, además, aproximar el grado de susceptibilidad del sistema a los efectos adversos del clima, es decir su vulnerabilidad (Bates et ál. 2008). En la literatura científica se encuentran muchos atributos y procesos que pueden, bajo determinada condición, operar como factores de vulnerabilidad de los humedales altoandinos al cambio climático. Tales atributos y procesos deben conocerse, entenderse e incorporarse de manera explícita en la gestión de adaptación al fenómeno. De lo contrario, se corre el riesgo de incrementar en el largo plazo la vulnerabilidad de los humedales altoandinos.

En este documento se presenta una revisión y síntesis de estos factores, con el objetivo de contribuir a que en las evaluaciones de vulnerabilidad al fenómeno se incluyan aspectos que pueden inducir un riesgo mayor de transformación y pérdida de estos ecosistemas, entendidos como sistemas ecológicos y sociales complejos e integrados, o sistemas socioecológicos (SSE) (García 2006).

Humedales altoandinos en Colombia

La “alta montaña” en Colombia se encuentra por encima de los 2.700 msnm, en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta (Flórez et ál. 1997). Posee un conjunto muy característico de humedales, de gran importancia para las comunidades humanas que han habitado en sus áreas de influencia desde hace 500 años (Etter, McAlpine y Possingham 2008). En Colombia hay al menos 1.629 sitios de humedales altoandinos, diferenciados geológicamente y bioclimáticamente en tres franjas altitudinales (Flórez et ál. 1997): 1) Entre 3.000 y 3.500 msnm, en donde predomina el modelado glacial heredado; hay lagos, pantanos o turberas. 2) Entre los 2.600 y 3.000 msnm, en donde en pequeños bacines tectónicos se encuentran lagunas y pantanos, muchos de ellos hoy colmatados. 3) Los bacines sedimentarios de depresiones tectónicas del Cretáceo y Terciario, entre los 2.000 y 3.300 msnm, denominados *altiplanos* (Flórez et ál. 1997); aquí se encuentran los mayores complejos de lagos y humedales. Las condiciones benévolas de clima y suelo en las montañas favorecieron la ocupación humana (Eckhom 1975; Lutelyn 1992), y el estado de estos humedales es hoy producto de la relación entre la sociedad humana y la naturaleza.

¹ Artículo de revisión generado en el marco del proyecto Humedales Altoandinos frente al Cambio Climático Global: Evaluación de la Vulnerabilidad y Estrategia de Adaptación en un Complejo de Humedales de la Cordillera Oriental Colombiana; Lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio, desarrollado por la Fundación Humedales, con la financiación de Ecopetrol (convocatoria Biodiversidad 2009).

Atributos del carácter social y ecológico de los humedales altoandinos que se deben mantener frente al cambio climático

De acuerdo con Walker y Salt (2012), la variación ambiental y las perturbaciones antrópicas pueden influir en la variabilidad de los atributos que le confieren identidad a un sistema. Sin embargo, a través de mecanismos y dinámicas propias, el sistema conserva sus funciones, estructuras e interacciones para no perder —en el caso de los humedales altoandinos, por ejemplo— su naturaleza como ecosistemas acuáticos ni su carácter como sistema socioecológico altoandino. Es decir, conserva su identidad.

Los atributos que definen la identidad social y ecológica de los humedales altoandinos son: climáticos, geomorfológicos, hidrológicos, bióticos y sociales (se presentan de forma sintética en la figura 1). Estos atributos deben mantenerse en escenarios de cambio climático y, por lo tanto, la gestión de adaptación al fenómeno debe incorporarlos.

En el aspecto ecológico, los atributos hidrológicos, como el volumen, la circulación del agua dentro del humedal y el hidroperíodo, ayudan a mantener la calidad del agua y los rangos propios de temperatura. Estos atributos dependen a su vez de características geomorfológicas del humedal, y de su cuenca de captación, que favorecen los procesos del agua. La biota del ecosistema está adaptada a los procesos y atributos hidrológicos. Los cambios de las variables climáticas pueden tener

efectos profundos en la diversidad y abundancia de las especies si las condiciones de contexto no son las adecuadas para enfrentar el fenómeno climático.

En los humedales altoandinos los servicios ecosistémicos (de regulación, de soporte, culturales y provisión, MEA 2005) median la relación entre el componente social y ecológico. Además, el aprovechamiento de estos beneficios influye en los atributos y procesos del humedal y, por lo tanto, en su funcionalidad. Mantener de manera balanceada los atributos ecológicos y sociales que dan cuenta de la funcionalidad de los humedales es un objetivo crítico para conservar la capacidad de respuesta al cambio climático. Para ello es necesario incorporar en la gestión la diversidad de actores sociales que dependen de múltiples servicios ecosistémicos del humedal. Esto requiere sistemas de gobernanza (Young 1992) amplios (no solo las reglas oficiales), acoplados a las múltiples escalas espaciales que son relevantes para los procesos de los humedales altoandinos.

En la gestión de adaptación al cambio climático de un humedal altoandino, con el objetivo de conservar su identidad y carácter social y ecológico, se deben conocer los aspectos que pueden operar para hacer vulnerable al sistema, sus atributos y la interacción entre ellos. A continuación se proponen y describen estos aspectos, llamados aquí *factores de vulnerabilidad*.

Aspectos que pueden operar como factores de vulnerabilidad al cambio climático en los humedales altoandinos

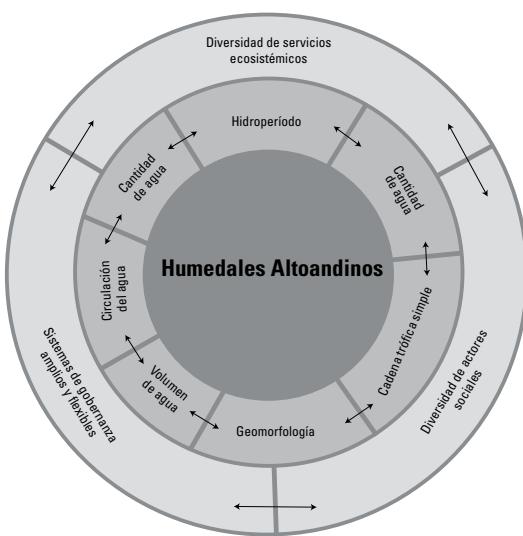


Figura 1. Atributos socioecológicos de los humedales altoandinos.
Fuente: modificado de Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012, 253.

Ubicación de los humedales en relación con las zonas climáticas

El clima es un factor superior determinante del carácter ecológico de los humedales altoandinos; influye en su vulnerabilidad al cambio climático, y se manifiesta en las variaciones de precipitación y temperatura en ciclos diarios, anuales o multianuales, que determinan procesos biofísicos y socioecológicos. En los Andes la complejidad del relieve resulta en un apretado mosaico de diferentes regímenes mesoclimáticos, de tal suerte que muchos complejos de humedales y sus cuencas aferentes, pueden estar sometidos a diferentes regímenes hídricos. Esta condición aumenta la dificultad e incertidumbre en la predicción del cambio, y por lo tanto, incrementa la vulnerabilidad al fenómeno del cambio climático. Un ejemplo de tal situación se presenta en el complejo de humedales de Fúquene, Cucunubá y

Palacio, en el extremo norte del altiplano de Cundiboyacense en Colombia (CAR 2006). En esta región la incertidumbre asociada con la proyección de la dirección del cambio es alta, por encontrarse en una zona de transición climática, lo cual dificulta una formulación más precisa de la gestión adaptativa (Franco Vidal et ál. 2012a). Asimismo, los humedales de altiplano reciben influencia tanto de procesos en la zona plana como del área más alta circundante (> 2600 msnm), por lo que las proyecciones climáticas deben considerar estas variaciones y su influencia, diferencial, sobre el régimen hidrológico del ecosistema.

La capacidad de proyección del clima ha mejorado considerablemente; no obstante, la alta montaña presenta retos importantes que influyen en la gestión de sus humedales frente al fenómeno. Estos retos se derivan, por ejemplo, de la heterogeneidad del relieve. Hacia el 2000, la documentación de los cambios en los valores totales de lluvia era todavía muy limitada, no estando claro si la tendencia general por cambio climático sería hacia la intensificación del ciclo hídrico en las vertientes más húmedas (Mulligan 2000) o hacia la aridización en las más secas. Hoy en día se sabe que, en general, las partes más altas de las cordilleras, o las vertientes más secas presentan mayor tensión climática (Pabón 2011). Actualmente, en la alta montaña se ha registrado un aumento de temperatura de $1,3^{\circ}\text{C}$ por década y una reducción de humedad en los días soleados (Ruiz et ál. 2008). En las series históricas de precipitación y temperatura de Colombia, a través de índices de extremos climáticos, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2010) encontró para la alta montaña una disminución de la precipitación media anual; y para los eventos extremos de la lluvia en páramos y zonas aledañas, un aumento de la temperatura máxima en el páramo alto (1°C por década), subpáramo y bosque altoandino ($0,3\text{-}0,6^{\circ}\text{C}$ por década), y un incremento menos pronunciado en la temperatura mínima en algunas estaciones de páramo, así como un mayor incremento de temperatura media en el páramo alto. Es decir, que en la alta montaña se presenta mayor temperatura y menor precipitación; o sea, una tendencia hacia la aridización, que podría darse más en algunas vertientes, lo cual acarrea aumento del régimen de fuego. Este último con graves consecuencias sobre la vegetación y el ciclo del agua, como fue demostrado en los páramos de la cordillera Central (Escobar 2007). Por otra parte, la desaparición de los glaciares en las partes más altas (Ceballos 2005) podría

acarrear la pérdida completa de los cuerpos de agua de deshielo. Hacia el futuro, las variaciones en la temperatura en los Andes tropicales se presentarían de manera más pronunciada y contrastante, lo cual determina una mayor vulnerabilidad de los humedales.

Regímenes hidrológicos y climáticos

Las tendencias multianuales de los regímenes pluviales, acoplados con los eventos hidrológicos, influyen en la dinámica de los humedales altoandinos. Los eventos extremos de precipitación, relacionados con patrones atmosféricos regionales o globales asociados con El Niño-Oscilación del Sur —en adelante, ENSO— se presentan como mínimos en la fase positiva (El Niño) y máximos en la negativa (La Niña), afectando la disponibilidad y calidad del agua en las cuencas aferentes de los humedales (Poveda y Álvarez 2010); eventos que parecen ya estar asociados de manera robusta con el cambio climático (Bates et ál. 2008). La cantidad y distribución temporal de la precipitación no es el único factor determinante de su funcionamiento, pues hay situaciones en las cuales está modificada por la recarga de acuíferos. Este parece ser el caso que predominó anteriormente en los humedales del altiplano de Bogotá (Van der Hammen 1998). Con todo, la variabilidad espacial y temporal del régimen de lluvias puede, en la mayoría de los casos, relacionarse con el patrón de precipitación que afecta directamente la escorrentía y descarga en los ríos. En los años de El Niño se genera una tensión hídrica en los humedales altoandinos, exacerbando en algunos de ellos los procesos de eutrofización y colmatación. En la fase de La Niña, la alta carga de agua en las cuencas genera el efecto contrario (Poveda y Álvarez 2010). Estos eventos tienen mayor incidencia cuando los valores extremos del ENSO coinciden con aquellos de la variabilidad del régimen normal (Pabón 2011).

Balance hídrico y capacidad de regulación de las cuencas

La variabilidad de los regímenes pluviales e hidrológicos se ve afectada por la capacidad de regulación hídrica de las cuencas aferentes a los humedales altoandinos. Algunas regiones altoandinas de Colombia presentan una limitada capacidad natural de regulación hídrica, como resultado de la escasez o del tamaño pequeño de masas glaciares, del reducido tamaño de las cuencas, del tipo de formación geomorfológica que determina la red de drenaje superficial y de las infiltraciones (Cabrera y Rodríguez 2007). La cuencas

altoandinas con geomorfología glaciar heredada tienen cubetas que retienen grandes cantidades de agua en numerosos lagos, turberas y otro tipo de humedales (Duque et ál. 2002), lo cual aumenta evidentemente su capacidad de regulación.

El balance hídrico se ve además modificado por la relación entre la precipitación y la temperatura, que determinan la evaporación desde el suelo y la evapotranspiración (Strahler y Strahler 2005). La evapotranspiración depende de la radiación solar, la humedad y temperatura del aire, la velocidad del viento y las características de la cobertura vegetal (Allen et ál. 1998). Con el incremento de la temperatura por el calentamiento global y los cambios en la precipitación, se espera un aumento en la evapotranspiración (Bates et ál. 2008). Por ahora, se sabe que los humedales ubicados en zonas que presentan un balance hídrico negativo durante varios meses al año presentan mayor tensión hídrica y vulnerabilidad. Así, el panorama general de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos al cambio climático es mayor en las vertientes atmosféricamente más secas, donde la tendencia de las variables climáticas es hacia la aridización, y menor en las más húmedas.

Complejidad de la red hídrica superficial

Los humedales altoandinos dependen de diferentes fuentes para el mantenimiento de la cantidad de agua, tales como: la precipitación directa, el agua de deshielo glaciar, la escorrentía superficial por flujo difuso y cauces aferentes, el flujo subsuperficial y el aporte desde acuíferos. Fuentes más numerosas y diversas de entrada de agua resultan en mayores posibilidades de mantener la cantidad de agua en eventos de sequía. La complejidad de la red hídrica aferente, expresada en cantidad y grado de ramificación, influye en la regulación hidrológica en las cuencas (Cabrera y Rodríguez 2007). Las redes simples podrían regular menos frente a extremos de la variabilidad climática, haciendo más vulnerable la cuenca y los humedales ante la mayor frecuencia de eventos de exceso o de déficit de cantidad de agua que caracterizan al cambio climático. En la alta montaña tropical los caudales están poco desarrollados y generan un caudal altamente variable y poco predecible (Domínguez e Ivanova 2007). En efecto, casi todos los humedales de altiplano (con excepción de Sibundoy, en el departamento de Nariño, en Colombia) son mayormente deficitarios en agua, como resultado de la relación entre el clima y la regulación natural en las cuencas (Flórez et ál. 1997).

Estabilidad de las formaciones superficiales y erodabilidad del suelo

La estabilidad de formaciones superficiales y la erosión de los suelos es un factor importante en la vulnerabilidad de los humedales. En la alta montaña hay una morfodinámica muy intensa, con pendientes fuertes, que generan riesgos de inestabilidad de las formaciones superficiales (Ceballos 2005). El movimiento en masa o desplazamiento hacia abajo en dirección del pie de una ladera de roca puede afectar el flujo del agua (Sánchez et ál. 2002), aumentando la sedimentación y afectando la estructura física de los humedales, así como la calidad del agua por el aumento del aporte de sustancias contaminantes del suelo. Estos fenómenos afectan la escorrentía subsuperficial, que determina la acumulación de partículas en los planos de inundación y fondos de los cuerpos de agua (Strahler y Strahler 2005). La erodabilidad está asociada, además, con la intensidad de la lluvia y con la pendiente del suelo, su cobertura y uso (USDA 2004). La acentuación de eventos extremos de precipitación y el aumento de la sedimentación tienen el potencial para afectar atributos esenciales de los humedales, como su profundidad, calidad del agua, estructura de los hábitats y el patrón espacial de las macrófitas acuáticas.

En situaciones de oscilaciones ENSO, la frecuencia e intensidad de remociones en masa puede intensificarse, así como la erodabilidad del suelo, habiéndose observado en la alta montaña durante el período de mayores precipitaciones en Colombia, el 2011. Ambos fenómenos generan aumento del aporte de sedimentos a los humedales, afectando la calidad de agua y su capacidad de retención. Los cambios en la tendencia histórica de la sedimentación pueden detectarse con registros en períodos amplios y continuos, permitiendo conocer la influencia de este factor en la vulnerabilidad de los humedales al cambio climático.

Régimen de humedad del suelo y subsidencia

Los regímenes de humedad en el suelo dependen de la precipitación, la escorrentía y del nivel freático. Los humedales ubicados en planos de inundación, como algunos de la Sabana de Bogotá —asociados con el río Bogotá—, presentan fluctuaciones en el régimen de humedad de los suelos. En el altiplano de Fúquene, el régimen de humedad del suelo es de particular importancia para el mantenimiento de las características de

los humedales (Garzón 2005). La fuerte alternancia de períodos secos y húmedos, y la acentuación de los períodos de déficit hídrico aceleran la pérdida de agua y el cambio en las características hídricas del suelo y, en consecuencia, de las características propias de los humedales (Garzón 2005). La alternancia genera contracción y expansión de los suelos orgánicos, característicos de los humedales, que pierden agua durante la sequía y vuelven a expandirse cuando hay rehumedecimiento (Garzón 2005).

El drenaje para actividades agropecuarias en condiciones climáticas extremas produce el secado irreversible del suelo que está expuesto al sol, del que se ha eliminado su capacidad de contracción-expansión, trayendo como consecuencia una insuficiente capacidad de almacenamiento de agua (Garzón 2005), lo cual aumenta su vulnerabilidad al cambio climático. En los altiplanos es frecuente la afectación humana del nivel freático, que en épocas de sequía pone en riesgo la humedad en la superficie (Van der Hammen 1998) y produce el fenómeno de la subsidencia, que es la profundización del suelo por drenaje de un suelo previamente saturado con agua y con capas orgánicas o minerales semifluidas, que depende de la profundidad del drenaje, del carácter de los materiales orgánicos, de la técnica de cultivo y del régimen de temperatura (Garzón 2005). La tasa de subsidencia se vuelve constante cuando los suelos se drenan y se cultivan durante períodos largos de tiempo. La subsidencia resulta de cambios en la hidrología del humedal y su funcionamiento (Garzón 2005) y, por lo tanto, afecta su dinámica ante los efectos del cambio climático y, en consecuencia, aumenta la vulnerabilidad al fenómeno.

Cobertura y atributos funcionales de la vegetación terrestre

Los atributos funcionales de los organismos vivos son características que los vinculan con las funciones ecológicas e influyen en las respuestas a las perturbaciones naturales y antrópicas (Casanoves, Pla y Di Rienzo 2011). La vegetación tiene un papel importante en la regulación hidrológica en la escala de paisaje (Bruijnzeel 2004), lo cual tiene relación con los atributos funcionales de las especies, como, por ejemplo, la arquitectura de las raíces de las plantas vasculares y su profundidad, que influyen en la cantidad de agua que infiltra y en el agua de escorrentía (Walker y Salt 2006), contribuyendo de esta manera al balance hidrológico de las cuencas.

En las partes más altas de los Andes, por encima del límite superior de los bosques, está el páramo (Luteyn

1992), ecosistema que desempeña un papel importante en el ciclo hídrico. La cobertura de vegetación de páramo tiene especies que contribuyen con esta función (por ejemplo, la vegetación formadora de turba), así como la presencia de suelos orgánicos y profundos (Farley, Kelly y Hofstede 2004); además de numerosos bacines cerrados de lagos y turberas e importantes extensiones en las laderas de “pantanos colgantes”, en donde la densa vegetación y los suelos retienen el agua (Guhl 1982).

Por debajo de los 3.300 msnm las vertientes están cubiertas en estado natural de bosques nublados, que cumplen las funciones de interceptación del agua y su regulación en las cuencas (Cavelier y Goldstein 1989). En los bosques de montaña la altura de los árboles, la forma del dosel y la disposición de las ramas influyen en el microclima. La dinámica hídrica en estos ecosistemas está influenciada por la niebla y la lluvia transportadas por el viento, que se convierten en un aporte adicional de agua (Bruijnzeel 2004). Los troncos y ramas ampliamente extendidas de algunas especies, como los robles, permiten el anclaje de una gran cantidad de líquenes y epífitas vasculares (bromeliáceas, orquídeas, helechos y otras) (González-Espinosa y Ramírez-Marcial 2006), que intervienen en la capacidad de aportar al sistema agua y nutrientes adicionales a partir de la interceptación de la niebla.

Los cambios en la vegetación de las cuencas de los humedales pueden resultar en cambios en las funciones hidrológicas ligadas con los atributos funcionales de las especies de la flora terrestre. Por ejemplo, el aporte de agua al humedal puede disminuir por la modificación del balance escorrentía-infiltración, determinando una alta vulnerabilidad al cambio climático debido a que se altera la capacidad de mantener la cantidad de agua necesaria durante los períodos de sequía. También la mayor escorrentía, que resulta por la pérdida de cobertura vegetal, o cobertura que impide la infiltración del agua, puede acarrear más sedimentos al humedal cuando hay una mayor frecuencia (y de mayor magnitud) de aguaceros torrenciales por el cambio climático. Los sedimentos se acumulan en el lecho del humedal y pueden favorecer la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua y la menor profundidad. Esta condición es aprovechada por algunas macrófitas acuáticas para proliferar, acentuando de esta manera el desplazamiento del agua del humedal y aumentando más el efecto negativo en la cantidad de agua por el cambio climático.

Atributos funcionales de la flora acuática

La vegetación acuática afecta la cantidad de agua de los humedales, en especial cuando están severamente alterados. *Typha angustifolia* es una especie nativa común en los humedales del altiplano de los Andes colombianos (Schmidt-Munn 1998), con una tasa de transpiración alta (de hasta 600 mg/g de agua dulce por hora), lo que resulta en pérdidas significativas de agua cuando la extensión que ocupa la especie es amplia en relación a las aguas abiertas (Mitich 2000), generando además disminución de la profundidad y mayor sedimentación. El buchón, *Eichornia crassipes*, es una especie transplantada de la cuenca amazónica y presente en muchos humedales altoandinos, siendo la macrófita acuática con mayor distribución mundial hecha por el ser humano (Martínez 1981). Su alta capacidad invasiva y su acumulación de biomasa (Bock 1969) disminuye la entrada de luz a la columna de agua, creando ambientes anóxicos, con gases tóxicos, una alta demanda de oxígeno y una baja calidad del agua. La invasión de estas macrófitas exacerba los procesos de pérdida de agua, la liberación de nutrientes y la colmatación, situaciones que se retroalimentan en escenarios de cambio climático.

Estructura de los humedales en el paisaje

La vulnerabilidad de los humedales altoandinos se manifiesta de manera contundente en la escala del paisaje en la que se hacen evidentes los factores formadores y los que los mantienen. La heterogeneidad física de un sitio de humedal, que depende de los patrones en el paisaje, es un factor determinante de su vulnerabilidad, pues estos sistemas se presentan frecuentemente formando complejos hidrológicos (Naranjo, Andrade y Ponce de León 1999), en los que la conectividad hidrológica y biótica facilita las respuestas a la variación del clima (Franco Vidal et ál. 2012a). Los sistemas de lagos y humedales más profundos, como el lago de Tota (Boyacá, Colombia), presentan una menor vulnerabilidad relativa en comparación con los lagos-humedales pandos, como la laguna de Fúquene (Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012). Cuando hay un amplio espejo de agua y zonas de mayor profundidad, hay mejor mezcla en la columna de agua, lo cual contribuye a disminuir su temperatura y permite la existencia de diferentes ambientes. Esto genera condiciones de ventaja frente al aumento de la temperatura por el cambio climático y, por lo tanto, una menor vulnerabilidad al fenómeno. La variación en profundidad al interior del humedal influye y puede controlar la extensión de la vegetación

de macrófitas acuáticas que, al proliferarse en exceso, aumentan la pérdida de agua por evapotranspiración y desplazamiento. Así, al darse poca heterogeneidad en las profundidades del humedal, se aumenta la vulnerabilidad al cambio climático por la influencia sobre las macrófitas acuáticas.

Procesos socioecológicos y construcción de vulnerabilidad

Las consecuencias de las acciones humanas en los humedales altoandinos se manifiestan en diferentes escalas espaciales y temporales, constituyéndose en factores que contribuyen a aumentar la alta vulnerabilidad natural de estos espacios a los eventos del clima. Los procesos se dan en el ámbito de las cuencas de captación, los complejos y los sitios de humedales, y frecuentemente presentan efectos directos puntuales, acumulativos y que se retroalimentan entre sí.

Cambios en las coberturas en las cuencas aferentes

Una dimensión de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos al cambio climático ha sido añadida por las acciones humanas y tiene que ver con los cambios en el balance hídrico en las cuencas de captación. Las coberturas naturales de páramo y bosque altoandino son las que mejor contribuyen a regular el ciclo hídrico (Brujinzeel 2004), y por esto son las que más favorecen una gestión de adaptación al clima cambiante. Existe hoy amplia información que muestra los cambios en las funciones hidrológicas de la vegetación del páramo cuando ha sido degradada por la ganadería y el fuego (Luteyn 1992), y sobretodo en donde ha sido transformada para dedicar áreas a la agricultura (Farley, Kelly y Hofstede 2004).

En las cuencas de captación la conversión de bosques altoandinos a pastos y las plantaciones forestales con pinos, eucaliptos y acacias han modificado algunas funciones y procesos hidrológicos, dando como resultado la degradación de suelos; la pérdida de la capacidad de infiltración, retención y almacenamiento de agua; la disminución de la recarga de agua subterránea, y el aumento de la escorrentía superficial, de la evapotranspiración y de la erosión (Harden 2006). La conversión de bosques en grandes extensiones de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) pudo haber afectado el balance hídrico, pues se trata de una especie invasiva con altas tasas de absorción de CO₂, producción de biomasa

y requerimientos de agua elevados y alta evapotranspiración (Holm et ál. 1997; Wilen y Holt 1996).

De otra parte, el eucalipto (*Eucalyptus globulus*), ampliamente plantado en algunas laderas altoandinas, es una especie de crecimiento rápido y elevado consumo de agua y nutrientes, que además produce aceites que limitan la infiltración, la descomposición de materia orgánica y el crecimiento de otras especies, reduciendo así la recarga de agua subterránea y aumentando la escorrentía superficial y la erosión (Menchaca et ál. 2007).

Drenaje y fragmentación de complejos de humedales

No hay documentación sobre procesos de drenaje o fragmentación de humedales en las zonas de páramo del país. Recientemente, el Instituto Humboldt inició la documentación del proceso de transformación de los pantanos de Martos, una de las mayores turberas conocidas en la cordillera Oriental colombiana, en el piso de páramo. Este tipo de procesos se conocen mejor en los altiplanos (Van der Hammen et ál. 2008). En los humedales que han sido sometidos a procesos extremos de drenaje, como el del Sibundoy (Mora 2012), o a procesos parciales, como la laguna de Fúquene (Franco Vidal y Andrade 2005), la poca profundidad exacerba la expansión de las especies palustres, lo que afecta la circulación y retención del agua, aumenta la pérdida por evapotranspiración y limita la depuración, imposibilitando de esta forma el mantenimiento de los atributos esenciales y la respuesta adaptativa al cambio climático (Le Quesne et ál. 2010). En esta situación, los sedimentos se acumulan en el lecho del humedal, disminuyen el almacenamiento del agua y, con una menor profundidad, se aumenta la invasión de macrófitas acuáticas, limitando las funciones de regulación del agua (Franco Vidal, Villa y Sarmiento 2007) y afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Franco Vidal y Andrade 2005).

En los complejos de humedales que han sido fragmentados por desecamiento por obras civiles de control de agua o contaminación, algunos sitios pueden alcanzar una situación crítica de aislamiento hídrico y biótico, dificultando la respuesta adaptativa al clima extremo o cambiante. Esta situación ya es frecuente en los humedales altoandinos de altiplano asociados con los planos de inundación y bacines lacustres en proceso de colmatación (Franco Vidal, Delgado y Andrade 2012b).

Calidad del agua y dinámica de nutrientes

La tasa de sedimentación y el tipo de nutrientes que llevan las aguas en el sistema hídrico dependen de sus características naturales y de los cambios producidos por la actividad humana. El sedimento de los humedales desempeña un papel importante en el ciclo alterno de los nutrientes que llegan, pues sirve de sumidero de materia orgánica y material de arrastre de la cuenca (Carpenter y Cottingham 2002). En este sentido, el ciclo del fósforo reviste especial importancia en la vulnerabilidad de los humedales. Dependiendo de la historia de afectación de la cuenca de captación, el fósforo que va quedando fijado en el sedimento es controlado por la concentración de oxígeno, para que no se libere a la columna de agua (Walker y Salt 2006). Con mayor temperatura y más descomposición de las plantas, la concentración de oxígeno disuelto disminuye, haciendo que el fósforo se movilice hacia la columna de agua, produciendo un mayor desarrollo de plantas acuáticas y estimulando la eutrofización al quedar el fósforo disponible para el fitoplancton (Walker y Salt 2006). En un humedal con herencias de la acción humana (elevada concentración de P) y tensión climática se exacerbaban procesos de retroalimentación desestabilizante, limitando severamente la adaptación al cambio climático. En este contexto, el uso de los ecosistemas acuáticos para la dilución y evacuación de residuos de las actividades humanas (que es una práctica generalizada en la región andina colombiana) genera una excesiva sobrecarga de contaminantes, que hacen imposible la depuración.

Impactos ambientales y sistemas productivos

Los sistemas productivos extractivos, como las pesquerías, agricultura o ganadería en pequeña escala, extracción de fibras para industrias artesanales y la caza, que no implican una transformación severa de los humedales, son más compatibles con el mantenimiento de su carácter ecológico (Naranjo, Andrade y Ponce de León 1999), ya que pueden mantenerse dentro de límites de funcionamiento normal de los sistemas. En cambio, la ganadería a gran escala, el establecimiento de distritos de riego o de drenaje dentro del espacio de los humedales y la extracción de agua para usos mineros pueden generar tensiones o favorecer el cambio de estado de los ecosistemas acuáticos. Igualmente, en algunos humedales de altiplano son cada vez más importantes los procesos de urbanización y los vertimientos

y desechos asociados (véase Van der Hammen et ál. 2008), así como la presencia y funcionamiento de plantas de tratamiento, lagunas de oxidación o humedales artificiales (Naranjo, Andrade y Ponce de León 1999).

El cambio de sistemas productivos agrava la contaminación en las cuencas agrícolas y ganaderas, aumentando en los humedales la “eutrofización cultural” (Reed-Andersen, Carpenter y Lathrop 2000), que genera una condición eutrófica que interactúa con las variables climáticas que producen tensión (eventos de sequía más frecuentes y prolongados) por el cambio climático (Franco Vidal et ál. 2012a). La dinámica de la población humana, particularmente su distribución en espacios urbanos o rurales y los tipos de actividad económica, afecta la vulnerabilidad de los espacios de humedales al cambio climático, por el mayor consumo de agua, vertimientos y desechos en las aguas. En general, la contaminación se trata como una variable de rápida ocurrencia y se asume que puede corregirse mediante los tratamientos adecuados. Sin embargo, en muchas ocasiones esta se convierte en una situación de corrección lenta por condiciones sociales y políticas; además, dentro de los humedales, los sedimentos generan una “memoria de contaminación” por las sustancias que se acumulan. Estas situaciones generan interacciones funcionales y recíprocas entre el sistema social y ecológico, vinculando directamente las variables demográficas de la cuenca con la vulnerabilidad al fenómeno climático de los humedales altoandinos.

Índices de escasez y vulnerabilidad por disponibilidad de agua

En los humedales altoandinos estrechamente dependientes del ciclo hídrico el índice de escasez de agua es un indicador fidedigno de la vulnerabilidad socioecológica. En efecto, la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda de agua para actividades sociales y económicas (IDEAM 2001), en muchas situaciones, da cuenta de la tensión entre los procesos productivos y la baja calidad de vida de las poblaciones humanas. A la vulnerabilidad de las comunidades humanas puede aproximarse de manera cualitativa conociendo la fragilidad del sistema hídrico en relación con las necesidades humanas, especialmente bajo condiciones hidroclimáticas extremas (IDEAM 2010).

Grado de exposición del sistema social y ecológico

La vulnerabilidad al cambio climático en los humedales también está en función de la exposición del

sistema social relacionado (Le Quesne et ál. 2010). En efecto, en muchos casos, la estacionalidad en el agua dentro de los humedales y sus cuencas de captación determinan la generación de servicios ecosistémicos, como los hidrológicos, de tal suerte que los grupos humanos altamente expuestos tienen sistemas productivos que dependen directamente (y casi que sin amortiguación) de los procesos climáticos. Los sistemas productivos de la alta montaña en la cordillera Central tienen una vulnerabilidad agronómica muy alta (por nutrientes, plagas, etc.), directamente ligada con la estacionalidad de la precipitación (Andrade et ál. 2007). También es claro que la estacionalidad de los ecosistemas acuáticos, especialmente de los pulsos de inundación, es necesaria para que se depositen sedimentos en los suelos adyacentes y, de esta forma, se mantengan suelos profundos y fértiles que sustenten los sistemas productivos (Bayley 1991; Brinson 1990); estos últimos deben ser adaptados a la estacionalidad y vitalidad de los sistemas ecológicos que sustentan la productividad biológica.

La variación ENSO, observada desde el 2008 en la alta montaña, ha tenido una influencia importante en el carácter ecológico y socioecológico de los complejos de humedales de altiplano en la laguna de Fúquene (Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012) y en el valle de Sibundoy (Mora 2012). Durante La Niña, debido a las grandes cantidades de agua producto de los eventos de precipitación extrema, los humedales de altiplano se convierten en zonas de alto riesgo por inundación, ya que han sido alterados en su función hídrica, por la reducción de su superficie o por la contención física; mientras que en las zonas altas de los páramos, los excesos de agua no son percibidos con el mismo riesgo. Este es el caso documentado en las lagunas de Fúquene y en el valle del Sibundoy (Andrade, Franco Vidal y Delgado. 2012; Franco Vidal, Delgado y Andrade 2012b; Mora 2012). En cambio en los períodos de El Niño, se hace evidente el papel que desempeñan los humedales en la regulación hídrica, al mantener reservas de agua durante estos períodos secos y alimentar los valles en los que se encuentran; mientras que la percepción predominante en las partes altas de sus cuencas es la de la muy intensa escasez del recurso hídrico (Murtinho 2011). También la ubicación espacial de los sistemas productivos o asentamientos humanos en relación con los humedales afecta la exposición de los sistemas al evento climático, afectando la capacidad de adaptación de las comunidades. Además, si

las funciones y estructuras del humedal que sustentan las actividades productivas son sensibles o están funcionalmente afectadas por las alteraciones del clima, el grupo humano asociado estará altamente expuesto y será más vulnerable.

Modificaciones por distritos de riego y drenaje

En las cuencas de humedales altoandinos de los altiplanos en Colombia es muy frecuente la alteración de los patrones de regulación del agua por modificaciones físicas para el establecimiento de los llamados *distritos de riego y drenaje* —en adelante, DRD—. Estas adecuaciones, mediante obras de infraestructura, buscan regular el agua en los campos de cultivo y cría de ganado a través de la manipulación de las cantidades de agua que entran y salen en las diferentes épocas del año. Notorios son los DRD de la laguna de Fúquene (Franco Vidal, Delgado y Andrade 2012b) y en el antiguo lago de Sibundoy (Mora 2012). La incorporación de esta infraestructura y actividades económicas de forma adyacente (o dentro de los humedales) influye notoriamente en su vulnerabilidad. Cuando la implementación de los DRD se da en regímenes climáticos e hidrológicos naturalmente pulsantes, el sistema socioecológico basado en el drenaje y el riego es altamente sensible a la variación del clima (Mora 2012).

En los humedales de los valles del altiplano, que tenían un régimen natural pulsante y que han sido total o parcialmente transformados en DRD, el servicio ecosistémico de regulación aguas abajo se convierte en un factor de riesgo social y ambiental. La mala adaptación a los extremos del clima es evidente en el valle de Sibundoy, donde entre 2011 y 2012 se produjeron extensas inundaciones en potreros reclamados por los humedales (Mora 2012); y en el complejo de Fúquene, Cucunubá y Palacio (Franco Vidal, Delgado y Andrade 2012b). En este último, una parte del cuerpo lago-humedal fue desecada para ser dedicada principalmente a la ganadería, apoyado por la construcción de estructuras de canales y diques y la rectificación de ríos. La naturaleza pulsante de estos sistemas hace que, ante eventos extremos del clima, la regulación sea imperfecta, generando un conflicto social amplio (Franco Vidal et ál. 2012a). El concepto de ‘caudal ecológico’, usualmente empleado para estimar la magnitud de los flujos remanentes o mínimos en los cursos de agua, se transforma en ‘volumen-caudal ecológico’, en un lugar y momento dado, de tal manera que la información ecohidrológica

es básica para la aproximación de la vulnerabilidad del sistema socioecológico así transformado.

La alteración de la estructura física de los humedales remanentes que han sido transformados por DRD aumenta, además, su vulnerabilidad, pues modifica los patrones de circulación interna del agua, que determinan la estructura y composición de sus biotopos o hábitats: aspectos críticos para el sustento de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La construcción de “canales perimetrales” es una actividad frecuente en los humedales, con fines de desecamiento (como en los pantanos de Martos) o del control de la ocupación de sus orillas (complejo Fúquene, Cucunubá y Palacio), modificando el patrón de circulación y la interfaz agua tierra, incrementando así su vulnerabilidad al fenómeno climático.

Gestión de servicios ecosistémicos

Los humedales altoandinos proveen a la sociedad bienes y servicios que se basan en la estructura y función de los ecosistemas; es decir, servicios ecosistémicos, que son: de soporte (el funcionamiento del ecosistema), de regulación (los procesos que lo mantienen en la escala del paisaje), de provisión (los bienes que la humanidad deriva) y los valores culturales asociados (MEA 2005). El acceso de las comunidades humanas a los servicios ecosistémicos está mediado por normas y reglas, formales o no formales (Adger 1999). Es frecuente, en este sentido, que los humedales altoandinos hayan sido destinados parcialmente a la producción agropecuaria a través de la transformación de su dinámica hidrológica, lo cual limita la presencia y acceso de las comunidades humanas a los demás servicios, y su capacidad adaptativa al clima.

Control social y gobernanza

Aunque en Colombia los mecanismos de participación de la sociedad civil en las decisiones del medio ambiente y su biodiversidad (en sentido amplio) son numerosos (Guerrero 2005), el conocimiento y las posibilidades reales de acceso de los ciudadanos para incidir son limitados. La vulnerabilidad al climático de los humedales altoandinos está ligada con la forma en que se toman las decisiones sobre su funcionamiento en relación con un equilibrio entre el servicio ecosistémico de riego y otros servicios ecosistémicos que sustentan. La gobernanza se refiere a las estructuras, procesos, reglas y tradiciones que de manera conjunta siguen los individuos

en la sociedad (Young 1992). Una gobernanza adaptativa de los humedales implica decisiones en las cuales se compartan el poder y la responsabilidad, diferenciándose los efectos de las acciones entre los actores sociales (Lebel et ál. 2006). La gobernanza refleja el contexto social que permite la acción colectiva para la gestión de los servicios ecosistémicos, la formulación e implementación de normas y reglas y la institucionalidad para la coordinación social (Dietz, Ostrom y Stern 2003).

Las estructuras, procesos, reglas y tradiciones que, de manera conjunta, definen un sistema de gobernanza, no siempre, en Colombia, favorecen la participación de todos los actores involucrados en las decisiones de manejo. En efecto, los sistemas de gobernanza en los humedales altoandinos de Colombia presentan gran dinámica y se constituyen hoy en componentes de su resiliencia socioecológica (Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012). Los sistemas de gobernanza no son estáticos, sino que han venido cambiando en respuesta a los contextos políticos y sociales, especialmente en el caso de los humedales urbanos (Guzmán, Hes y Schwartzô 2011).

En los complejos de humedales de altiplano, los desajustes en los sistemas de gobernanza que se han producido por la maximización de un servicio ecosistémico en detrimento de los demás son hoy un factor central de la vulnerabilidad socioecológica al cambio global (Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012). Frecuentemente la gobernanza se presenta de manera fragmentada, en el tiempo y en el espacio, y en consecuencia no se puede garantizar la continuidad necesaria de los procesos que sustentan la identidad y el carácter ecológico y social del sistema en escenarios de cambio climático. Un conjunto más amplio de actores participantes determina decisiones más balanceadas, en especial cuando la sociedad civil organizada tiene capacidad para influir en su manejo e implementación (Walker y Salt 2012). Estos procesos deben permitir decisiones informadas, basadas en el aprendizaje constante, el entendimiento de la dinámica ecológica del humedal y las tendencias de largo plazo. De esta manera se contribuiría a disminuir la vulnerabilidad al fenómeno climático.

Acuerdo sobre la identidad socioecológica

En muchas regiones altoandinas la ausencia de un acuerdo social sobre la identidad de los humedales es uno de los principales aspectos que ha limitado, y evidentemente impedido, el mantenimiento de los múltiples servicios ecosistémicos que reposan en la di-

versidad de actores sociales (Andrade, Franco Vidal y Delgado 2012), y que son fundamentales frente al cambio climático. La interacción entre los actores sociales relacionados con los humedales es esencial, y crítica, para llegar a acuerdos sobre la identidad del ecosistema y para orientar (con el manejo) la trayectoria de cambio que evite el aumento de la vulnerabilidad al cambio climático y a otros fenómenos del cambio ambiental.

Síntesis: vulnerabilidad socioecológica de los humedales altoandinos

El cambio climático es el principal factor del cambio ambiental global, y genera condiciones que modifican profundamente los atributos de vulnerabilidad natural y añadida (socioecológica) de los humedales. El conocimiento de la interacción entre la amenaza climática y la vulnerabilidad es básico para la adaptación. La caracterización de los componentes de la vulnerabilidad, tomados por separado, puede resultar relativamente simple. Por el contrario, la aproximación a la vulnerabilidad del sistema en su conjunto es especialmente compleja, porque los atributos son el resultado de la interrelación de los componentes social y ecológico; es decir, son socioecológicos (Eakin y Luers 2006).

La tensión climática sobre los sistemas ecológicos y sociales de alta montaña determina una mayor complejidad y alta incertidumbre sobre su devenir. Puede preverse que el aumento de la temperatura desplace hacia arriba las condiciones bioclimáticas actuales. En el páramo, un incremento vertical de su límite inferior en 450 m reduciría el área total de las condiciones de los páramos en un 60% (de aproximadamente 46.000 km² a menos de 20.000 km²), además de que habrían alteraciones del régimen hidrológico, con impactos sobre la disponibilidad de agua en las cuencas (Buytaert, Cuesta-Camacho y Tobón 2010). Con todo, resulta más difícil prever cuáles serán las situaciones de tensión en las que se encontrarían los humedales altoandinos cuando las condiciones de contexto en las cuencas de captación resulten alteradas.

La biodiversidad característica de los humedales, en especial las especies acuáticas (en situación de tensión climática), podría quedar confinada a trampas térmicas de las que las especies no pueden escapar, generando cuellos de botella de extinciones locales. Este podría ser el caso de los peces nativos en lagos y humedales del altiplano, que en condiciones naturales se encuentran distribuidos en estrechos rangos de temperatura, que

se verían alterados con el clima cambiante y en donde no existe la provisión de hábitat similar en áreas de las mismas cuencas a mayor altura sobre el nivel del mar. También en estos ecosistemas ya se están presentando cambios en la composición de especies, que, además, podrían verse acentuados por nuevas invasiones biológicas favorecidas por el clima cambiante. La tensión vertical desplazaría además la frontera agrícola por encima de los límites actuales, con cambios en las coberturas y en la acentuación de los procesos hídricos superficiales en los suelos, remociones en masa y aumento de sedimentación de los humedales.

En estos sistemas la trayectoria de cambio frente a los fenómenos del cambio ambiental depende en gran parte de los efectos que sobre los sitios han ejercido los seres humanos a través de sus visiones e intereses, decisiones y acuerdos formales e informales, así como de los desajustes de gobernanza entre los actores vinculados con diferentes servicios de los ecosistemas (Franco Vidal, Delgado y Andrade 2012b). Walker y Salt (2006) señalan aspectos sociales que son esenciales en los procesos de adaptación a los cambios ambientales, entre ellos está la diversidad de opciones económicas que sustenta el humedal. Los humedales que han sido simplificados ecológica y socialmente para servir a una sola opción económica son más vulnerables. En la región altoandina colombiana esta situación se presenta con mayor incidencia en aquellos espacios de humedales transformados severamente al ser incluidos en DRD. La presencia de redes sociales consolidadas, que median la ocurrencia de decisiones más equilibradas, permiten además la experimentación, el aprendizaje y la creación de reglas sociales desarrolladas localmente. Para Walker y Salt (2006), el traslape en los sistemas de gobernanza en diferentes escalas de la gestión permite una mayor redundancia de funciones sociales y ecológicas acopladas y una mayor resiliencia socioecológica. Para los mismos autores, la multiplicidad de los servicios ecosistémicos que se mantienen en la gestión de los espacios naturales, como los humedales, es esencial, especialmente de aquellos que no tienen valor de mercado; por ejemplo, los servicios ecosistémicos de soporte y los culturales (MEA 2005).

Conclusión: alcances y limitaciones de la evaluación de vulnerabilidad

La propuesta de factores para entender la vulnerabilidad al cambio climático que se presenta aquí enfatiza

aspectos estructurales y funcionales en la interacción naturaleza-sociedad. La evaluación de vulnerabilidad se hace a la luz de la dirección de la ocurrencia del fenómeno climático y en relación con los objetivos sociales de su manejo, lo que permitiría ubicarla en el contexto de las decisiones que dirigen la adaptación. La interpretación de la vulnerabilidad está, sin embargo, afectada por la percepción y los intereses de los actores relevantes. En este sentido, los procesos de gobernanza del conocimiento, es decir la conjunción de diferentes tipos y formas de aproximar el saber en grupos humanos variados (Andrade y Wills 2010) resulta esencial para procurar una mejor adaptación de los sistemas sociales y ecológicos al cambio ambiental. Sin embargo, la gran complejidad de los aspectos sociales y ecológicos que intervienen en los procesos de cambio hace que en la práctica sea necesario seleccionar un grupo menor de factores que se consideren críticos para entender la vulnerabilidad. La selección de estos factores debe estar basada en una lectura y un mínimo conocimiento previo del sistema focal para la evaluación. Esta podría ser la utilidad de construir síntesis, como la que aquí se presenta, sobre los factores socioecológicos de vulnerabilidad. Con todo, se requiere más trabajo para construir modelos generales de funcionamiento de los sistemas ecológicos y sociales acoplados, que permitan interpretar la incidencia relativa de los componentes identificados de la vulnerabilidad, y sus interacciones en situaciones específicas. Al entender estas interacciones será posible identificar los componentes y procesos necesarios para orientar la trayectoria de cambio deseable en estos ecosistemas, proveyendo un contexto más resiliente al cambio climático.

Más allá del interés académico, una evaluación de vulnerabilidad es realmente útil si se da ligada a la construcción de políticas o acuerdos sociales que transformen el estado de los sistemas ecológicos y modifiquen las tendencias de cambio (Patt et ál. 2009). Pues es a través de esta evaluación que se busca ante todo informar a quienes toman decisiones, para enfocar sus esfuerzos a minimizar los efectos del cambio climático sobre los sistemas sociales y ecológicos. Con todo, es todavía frecuente que se presenten desajustes de escala espacial y temporal entre los procesos biofísicos y las decisiones de manejo. Hay, por ejemplo, factores de vulnerabilidad que se incuban en plazos largos, y que no pueden ser modificados en tiempos cortos. También es frecuente que las respuestas de la sociedad, que buscan controlar de forma aislada los efectos ambientales

manifestados en los procesos de transformación (como la gestión del riesgo a desastres naturales, véase IPCC 2012), promuevan el cambio en un sentido indeseado, conformando lo que se conoce como el *manejo patológico*. Tales respuestas, a todas luces indeseables (como serían los cambios adicionales en el uso de los suelos), podrían ser exacerbadas por el cambio ambiental global (Rodríguez-Eraso et ál. 2010). En este sentido, de particular importancia en los procesos de análisis de vulnerabilidad en la perspectiva de la adaptación es poder contar con la percepción de diversos actores sobre el

estado de los servicios ecosistémicos, sus equilibrios y tendencias en un mundo que sigue siendo transformado, mientras que los cambios globales apenas se comienzan a entender.

Agradecimientos

El desarrollo del presente trabajo fue posible gracias al apoyo general y financiero de la Fundación Humedales, Ecopetrol, la Facultad de Administración de la Universidad de los Andes y el Instituto Alexander von Humboldt.

Lorena Franco Vidal

Microbióloga de la Universidad de los Andes (Colombia), magíster en Ciencias Biológicas, de la Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Actualmente es estudiante del Doctorado en Geografía de la misma universidad en la línea de investigación de relaciones entre clima y sociedad. Su propuesta de investigación está orientada a la vulnerabilidad a los cambios ambientales de los servicios ecosistémicos hidrológicos. Trabaja en la Fundación Humedales y es consultora para diversos procesos de investigación y gestión de la biodiversidad a nivel nacional y local.

Juliana Delgado

Bióloga de la Pontificia Universidad Javeriana (Colombia), es especialista en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (España), y doctora en Ciencia y Tecnología Ambiental, de la Universidad Autónoma de Barcelona (España). Trabaja actualmente como especialista en ecosistemas de agua dulce para el Programa Norte de los Andes y Sur de Centro América (NASCA), de The Nature Conservancy.

Germán I. Andrade

Biólogo de la Universidad de los Andes (Colombia), es magíster en Ciencias Ambientales en la Universidad de Yale (New Haven, USA). Es consultor internacional en programas de conservación de biodiversidad, áreas protegidas y gestión de ecosistemas. Es miembro de la Fundación Humedales. Profesor Asociado de la Facultad de Administración de la Universidad de los Andes en Gestión de Ecosistemas y Biodiversidad, y en Cambio Ambiental Global. Es académico invitado en el curso Conservación de la Biodiversidad en Latinoamérica, de la Universidad de Yale (School of Forestry and Environmental Studies), y en Desarrollo Sostenible, de la Escuela Superior de Administración de Negocios (ESAN), en Lima (Perú).

Referencias

- Adger, Neil. 1999. Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam. *World Development* 27 (2): 249-269.
- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes y Martin Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper n.º 56*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/x0490E/x0490E00.htm> (consultado en abril del 2010).
- Anderson, Elizabeth P., José Marengo, Ricardo Villalba, Stephan Halloy, Bruce Young, Doris Cordero, Fernando Gast, Ena Jaimes y Daniel Ruiz. 2010. Consequences of Climate Change for Ecosystems and Ecosystem Services in the Tropical Andes. En *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, eds. S. Herzog, R. Martínez, P. Jørgensen y H. Tiessen, 1-18. MacArthur Foundation, Inter American Institute for Global Change Research y Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Andrade, Ángela, Rocío Córdoba Muñoz, Radhika Dave, Pascal O. Girot, Bernal Herrera Fernández, Robert Munrol, Judy Oglethorpe, Pía Paaby, Emilia Pramova, James Watson y Walter Vergara. 2011. *Draft Principles and Guidelines for Integrating Ecosystem-Based Approaches to Adaptation in Project and Policy Design: A Discussion Document*. Kenya: CEM/IUCN, CATIE.
- Andrade, Germán, Lorena Franco Vidal, José Francisco Boschell, Jorge Luis Ceballos, Efraín Domínguez y Patricia León. 2007. Gestión adaptativa de ecosistemas de alta montaña tropical ante el cambio climático: formulación de objetivos para el macizo las Hermosas. En *Proceedings of the First International Conference on the Impact of Climate Change on High-Mountain Systems*, eds. Jorge Luis Ceballos, Christian Huggel, Gabriel Saldarriaga y Luz Dary Yepes, 109-121, 21 al 23 de noviembre del 2005. Bogotá: IDEAM.
- Andrade, Germán I. y Eduardo Wills. 2010. Tipos, modos de producción y gobernanza del conocimiento para la conservación de la biodiversidad. *Ambiente y Desarrollo* 27:55-78.
- Andrade, Germán I., Lorena Franco Vidal y Juliana Delgado. 2012. Barriers to Sustainable Adaptation of Lake Fúquene, Colombia. En *Lake Sustainability*, eds. C. A. Brebbia y S. E. Jorgense. WIT Press. ISBN 1845646681.
- Bates, Bryson, Zbigniew W. Kundzewicz, Shaohong Wu y Jean Palutikof, eds. 2008. *Climate Change and Water*. Ginebra: IPCC, WMO, UNEP.
- Bayley, Peter B. 1991. The Flood Pulse Advantage and the Restoration of River-Floodplain Systems. *Regulated Rivers: Research and Management* 6 (2): 75-86.
- Bock, Jane H. 1969. Productivity of the Water Hyacinth *Eichhornia crassipes* (Mart.). *Ecology* 50 (3): 460-464. UF/IFAS 2001. <http://plants.ifas.ufl.edu/node/141>.
- Brinson, Mark. 1990. Riverine Forests. En *Forested Wetlands*, eds. A. E. Lugo, Mark Brinson y S. Brown, 87-141. Amsterdam: Elsevier.
- Brönnimann, Stefan, Tracy Ewen, Juerg Luterbacher, Henry Diaz, Richard Stolarski y Urs Neu, eds. 2008. A Focus on Climate During the Past 100 Years. En *Climate Variability and Extremes during the Past 100 Years*, 1-25. Springer. ISBN 978-1-4020-6765-5.
- Bruijnzeel, L. A. Sampurno. 2004. Hydrological Functions of Tropical Forests: Not Seeing the Soil for the Trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104:185-228.
- Buytaert, Wouter, Francisco Cuesta-Camacho y Conrado Tobón. 2010. Potential Impacts of Climate Change on the Environmental Services of Humid Tropical Alpine Regions. *Global Ecology and Biogeography* 20 (1): 19-33.
- Cabrera, Edersson y Adriana Rodríguez. 2007. Análisis morfométrico preliminar de la cuenca de las lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio. En *Fúquene, Cucunubá y Palacio: conservación de la biodiversidad y manejo sostenible de un ecosistema lagunar andino*, eds. Germán I. Andrade y Lorena Franco Vidal, 29-41. Bogotá: Fundación Humedales e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Carpenter, Stephen y Kathryn Cottingham. 2002. Resilience and Restoration of Lakes. En *Resilience and the Behavior of Large-scale Systems*, eds. L. H. Gunderson y Lowell Pritchard Jr. Washington: Island.
- Casanoves, Fernando, Laura Pla y Julio A. Di Rienzo, eds. 2011. *Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos*. Serie Técnica, Informe técnico n.º 384. Costa Rica: Catie.
- Cavelier, Jaime y Guillermo Goldstein. 1989. Mist and Fog Interception in Elfin Cloud Forest in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 5:309-322.
- Ceballos, Jorge Luis. 2005. *Consideraciones generales acerca de la alta montaña colombiana*. Documento de trabajo para la formulación del Proyecto Piloto Integrado de Adaptación al Cambio Climático, componente Alta Montaña. Bogotá: IDEAM.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). 2006. *Plan de ordenamiento de cuencas ambientales, POMCA Ubaté-Suárez: diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez*. Bogotá: CAR.

- Dietz, Thomas, Elinor Ostrom y Paul C. Stern. 2003. The Struggle to Govern the Commons. *Science* 302:1907-1912.
- Domínguez, Efraín e Y. Ivanova. 2007. Un modelo estocástico para la evaluación hidrológica, en alta montaña, bajo las condiciones de cambio climático (caso de estudio-páramo de las Hermosas). *Proceedings I Conferencia Cambio Climático*, Bogotá: IDEAM, Embajada de Suiza.
- Duque, Andrés, Santiago Restrepo, P. Ruiz, A. L. Domínguez, y A. Beltrán. 2002. *Inventario y caracterización de los humedales del parque nacional natural los Nevados y zona amortiguadora en los departamentos de Caldas y Risaralda*. Pereira: Reporte Técnico CARDER-CRQ, Cortolima, Corpocaldas y Universidad Tecnológica de Pereira.
- Eakin, Hallie y Amy Lynd Luers. 2006. Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems. *Annual Review of Environment and Resources* 31 (1): 365-394.
- Eckhom, Erik P. 1975. The Deterioration of Mountain Environments. *Science* 189:764-770.
- Eriksen, Siri, Paulina Aldunce, Chandra S. Bahinipati, Rafael Martins, John Molefe, Charles Nhémachena, Karen O'Brien, Felix Olorunfemi, Jacob Park, Linda Sygna y Kirsten Ulsrud. 2011. When not Every Response to Climate Change is a Good One: Identifying Principles for Sustainable Adaptation. *Climate and Development* 3:7-20.
- Escobar, Wilson 2007. *Restauración ecológica de la cuenca alta del río Otún y áreas afectadas por el incendio forestal de julio del 2006*. Pereira: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Unidad de Parques Nacionales y CARDER.
- Etter, Andrés, Clive McAlpine y Hugh Possingham. 2008. Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers* 98 (1): 2-23.
- Farinha, João, Luis Costa, George Zalidis, Antonis Mantzavelas, Eleni Fitoka, Nathalie Hecker y Pere Tomás Vives. 1996. *Mediterraneaen Wetland Inventory: Habitat Description System*. Vol. III. Portugal: Medwet, Instituto da Conservação da Naturaleza (ICN), Wetlands International, Greek Biotope, Wetland Centre.
- Farley, Kathleen, Eugene F. Kelly y Robert G. M. Hofstede. 2004. Soil Organic Carbon and Water Retention after Conversion of Grassland to Pine Plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems* 7:729-739.
- Flórez, Antonio, Jorge Luis Ceballos, John W. Montoya y L. Castro. 1997. *Geosistemas de la alta montaña colombiana*. Bogotá: Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Franco Vidal, Lorena, Alberto Villa y Armando Sarmiento. 2007. Clasificación y estado actual de los hábitats de humedal de las lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio: implicaciones para su manejo. En *Fúquene, Cucunubá y Palacio: conservación de la biodiversidad y manejo sostenible de un ecosistema lagunar andino*, eds. Germán I. Andrade y Lorena Franco Vidal, 103-130. Bogotá: Fundación Humedales e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Franco Vidal, Lorena y Germán I. Andrade. 2005. Biodiversidad y cambio ecosistémico en la laguna de Fúquene. *Informe nacional sobre el estado de conocimiento de la biodiversidad*. Bogotá: INACIB-Instituto Alexander von Humboldt.
- Franco Vidal, Lorena, Juliana Delgado, Germán I. Andrade, Sandra Hernández y Jairo Valderrama. 2012a. Estrategia de adaptación al cambio climático en el complejo de humedales de Fúquene, Cucunubá y Palacio. *Gestión de Humedales* 2:59-72.
- Franco Vidal, Lorena, Juliana Delgado y Germán I. Andrade. 2012b. Laguna de Fúquene: entender la crisis, visualizar el futuro y acordar el camino. *Gestión de Humedales* 2:17-26.
- García, Rolando. 2006. *Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: Gedisa.
- Garzón, Edna. 2005. Suelos hídricos del humedal laguna de Fúquene: caracterización y delimitación. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- González-Espinosa, Mario y Neptalí Ramírez-Marcial. 2006. Ecología y restauración de los bosques de Quercus de Chiapas, sur de México. *Memorias del I Simposio Internacional de Robles y Ecosistemas Asociados*, eds. C. Solano y N. Vargas. Bogotá: Fundación Natura y Pontificia Universidad Javeriana.
- Guerrero, Gustavo. 2005. *La participación de la sociedad civil en las políticas sectoriales y ambientales: análisis de complejidades y contradicciones y sus efectos sobre la puesta en marcha de herramientas privadas de conservación*. Bogotá: Documento de consultoría TNC.
- Guhl, Andrés E. 1982. *Los páramos circundantes de la sabana de Bogotá*. Bogotá: Jardín Botánico José Celestino Mutis.
- Guzmán Ruíz, Ana, Edwin Hes y Klaas Schwartzö. 2011. Shifting Governance Modes in Wetland Management: A Case Study of Two Wetlands in Bogotá, Colombia. *Environment and Planning C: Government and Policy* 29:990-1003.
- Harden, Carol P. 2006. Human Impacts on Headwater Fluvial Systems in the Northern and Central Andes. *Geomorphology* 79 (3-4): 249-263.

- Holm, LleRoy, Jerry Doll, Eric Holm, Juan V. Pancho y James P. Herberger. 1997. *World Weeds: Natural Histories and Distribution*. New York: John Wiley.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2001. *Estudio nacional del agua*. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2010. 2.^a comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. Bogotá.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor y P. M. Midgley. New York: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller. New York: Cambridge University Press.
- Jax, Kurt. 2010. *Ecosystem Functioning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Le Quesne, Tom, John Matthews, Constantin Von der Heyden, A. J. Wickel, Rob Wilby, Joerg Hartmann, Guy Pegram, Elizabeth Kistin, Geoffrey Blate, Glauco Kimura de Freitas, Eliot Levine, Carla Guthrie, Catherine McSweeney y Nikolai Sindorf. 2010. *Flowing Forward: Freshwater Ecosystem Adaptation to Climate Change in Water Resources Management and Biodiversity Conservation*. World Wildlife Fund.
- Lebel, Louis, John M. Andries, Bruce Campbell, Carl Folke, Steve Hatfield-Dodds, Terry P. Hughes y James Wilson. 2006. Governance and the Capacity to Manage Resilience in Regional Social-Ecological Systems. *Ecology and Society* 11 (1): 19.
- Luteyn, James. 1992. Páramos: Why Study Them? En *Paramo: An Andean Ecosystem Under Human Influence*, eds. H. Balslev y J. L. Luteyn, 1-14. London: Academic.
- Martínez Crovetto, R. 1981. *Plantas utilizadas en medicina: Miscelánea* 69:1-135. Fundación Miguel Lillo. <http://lillo.org.ar/> (consultado en noviembre del 2012).
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trend*. Vol. I. Washington: World Resources Institute.
- Menchaca, Leticia Beatriz, Brian Mitchell Smith, John Connolly, Mark Conrad y Bridget Emmett. 2007. A Method to Determine Plant Water Source Using Transpired Water. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4 (2): 863-880.
- Mitich, Larry. 2000. Common Cattail, *Typha latifolia* L. *Weed Technology* 14:446-450.
- Mora, Luis Fernando. 2012. Estados y trayectoria de cambio ambiental en el valle de Sibundoy asociados a sistemas ganaderos (1980-2010). Tesis de Maestría en Geografía, Departamento de Historia, Universidad de los Andes. Bogotá.
- Mulligan, Mark. 2000. Downscaled Climate Change Scenario for Colombia and their Hydrological Consequences. *Advances in Environmental Monitoring and Modeling* 1 (1): 3-35.
- Murtinho, Felipe. 2011. Adaptation to Environmental Change among Water User Associations in the Colombian Andes. Tesis de Doctorado en Geografía, Universidad de California, Santa Barbara.
- Naranjo, Luis Germán, Germán Andrade I. y Eugenia Ponciano de León. 1999. *Humedales interiores de Colombia: bases técnicas para su conservación y uso sostenible*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio del Medio Ambiente, Subdirección de Ecosistemas.
- Pabón, José Daniel. 2011. *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia-CAR.
- Patt, Anthony, Dagmar Schröter, Richard Klein y Anne Cristina La Vega. 2009. Vulnerability Research and Assessment to Support Adaptation and Mitigation: Common Themes From Diversity of Approaches. En *Assessing Vulnerability to Global Environmental Change: Making Research Useful for Adaptation Decision Making and Policy*, eds. Anthony Patt, Dagmar Schröter, Richard Klein y Anne Cristina La Vega, 1-25.
- Poveda, Germán y Diana Álvarez. 2010. Hydro-climatic Variability over the Andes of Colombia Associated with ENSO: A Review of Climatic Processes and their Impact on One of the Earth's Most Important Biodiversity Hotspots. *Climate Dynamics* 36 (11-12): 2233-2249.
- Ramsar. 2002. *Resolución VIII: 39 Los humedales altoandinos como ecosistemas estratégicos*. http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-resol-resolution-viii-39-high/main/ramsar/1-31-107%5E21288_4000_2.
- Reed-Andersen, Tara, Stephen R. Carpenter y Richard C. Lathrop. 2000. Phosphorus Flow in a Watershed-Lake Ecosystem. *Ecosystems* 3 (6): 561-573.

- Rodríguez-Eraso, Nelly, José Daniel Pabón Caicedo, Néstor Bernal-Suárez y Jorgem Martínez-Collantes. 2010. *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Ruiz, Daniel, Hernán Alonso Moreno, María Elena Gutierrez y Paula Andrea Zapata. 2008. Changing Climate and Endangered Mountain Ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment* 398:122-132.
- Sánchez, Reinaldo, Luis Fernando Urrego, Ruth Mayorga y Germán Vargas. 2002. Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamiento en tiempo real. *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*. Bucaramanga, Colombia.
- Schmidt-Munn, Udo. 1998. Vegetación acuática y palustre de la sabana de Bogotá y plano del río Ubaté. Tesis de Maestría en Biología, Facultad de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Strahler, Alan y Arthur Strahler. 2005 *Geografía física*. 3^{ed}. Barcelona: Omega S. A.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2004. *Hydrologic Soil-Cover Complexes: Part 630 National Engineering Handbook*. Chapter 9. Washington: United States Department of Agriculture-National Resources Conservation Service.
- Van der Hammen, Thomas. 1998. *Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá*. Bogotá: CAR.
- Van der Hammen, Thomas, Gary Stiles, Loreta Rosselli, Magda Liliana Chisaca Hurtado, Germán Camargo Ponce de Leon, Gabriel Guillot, Yerly Useche Salvador y David Rivera Ospina. 2008. *Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos 1^{ed}*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Walker, Barry y David Salt. 2006. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Washington: Island.
- Walker, Barry y David Salt. 2012. *Resilience Practice: Building Capacity to Absorb Disturbance and Maintain Function*. Washington: Island.
- Wilen, Cheryl y Jodie Holt. 1996. Spatial Growth of Kikuyugrass (*Pennisetum clandestinum*). *Weed Science* 44 (2): 323-330.
- Young, Oran. 1992. The Effectiveness of International Institutions: Hard Cases and Critical Variables. En *Governance Without Government: Order and Change in World Politics*, eds. Rosenau y E.-O. Czempiel, 160-194. Cambridge: Cambridge University Press.