

# Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica<sup>1</sup>

Mildred Jiménez<sup>2</sup>; Adina Chain<sup>3</sup>;  
Bruno Locatelli<sup>4</sup>

Los resultados de este estudio concuerdan con las tendencias globales esperadas, donde los ecosistemas de altitudes mayores serán los más vulnerables al calentamiento global, y con estudios regionales que sugieren que los efectos del cambio climático serán más pronunciados en mayores elevaciones que en elevaciones bajas, particularmente en la vertiente pacífica.



Foto: Marie Landry.

<sup>1</sup> Basado en Jiménez (2009)

<sup>2</sup> Programa Producción y Conservación en Bosques, CATIE. mildred@catie.ac.cr

<sup>3</sup> Escuela de Posgrado CATIE 7170, Turrialba 30501, Costa Rica. achain@catie.ac.cr

<sup>4</sup> CIRAD UPR Políticas Públicas y Recursos Forestales, CIFOR, Departamento de Servicios Ambientales, Indonesia. bruno.locatelli@cirad.fr

## Resumen

Se evaluó el impacto del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica, a partir de escenarios climáticos generados con un modelo regional. Mediante capas de información climática (WorldClim) y dos escenarios de cambio climático desarrollados por el modelo regional PRECIS con los escenarios A2 y B1 del IPCC, se generó un mapa actual de zonas de vida de Holdridge para Centroamérica y se modeló el cambio de zonas para el clima promedio futuro (2011-2040). Las zonas de vida con mayor representación territorial actual fueron el bosque húmedo tropical, el bosque seco tropical y el bosque húmedo premontano. En ambos escenarios, la mayoría de las zonas de vida sufrieron un cambio hacia otras de piso altitudinal más bajo y provincias de humedad más secas; el cambio más drástico se dio en el escenario A2. Las zonas de vida más afectadas fueron el páramo pluvial subalpino y el bosque seco premontano. El modelaje de las zonas de vida ante escenarios de cambio climático arroja información sobre el grado de sensibilidad de ecosistemas presentes en la región y permite diseñar estrategias de conservación encaminadas a proteger las regiones más amenazadas.

**Palabras claves:** Cambio climático; impacto ambiental; ecosistema; zonas de vida; modelos; conservación de la naturaleza; América Central.

## Summary

**Climatic change effects on life zones distribution in Central America.** The objective of this study was to evaluate the impacts of climate change on the distribution of life zones in Central America, using climatic scenarios developed by a regional model. Using climatic data layers (WorldClim) and two climate change scenarios established by the regional climate model PRECIS with the A2 and B1 IPCC scenarios, we developed maps of Holdridge life zones in Central America under current and future climate (2011-2040). Tropical moist forest, tropical dry forest, and premontane moist forest were the most common life zones in the region under the current climate. For the two climate scenarios and more drastically for the A2 scenario, most life zones changed into lower altitudinal life zones and lower humidity provinces. The most affected life zones were the subalpine rain paramo and the premontane or lower montane dry forest. Modelling the impacts of climate change on life zones provides information about ecosystem sensitivity and helps to design conservation strategies for protecting the most vulnerable areas.

**Keywords:** Climatic change; environmental impact; ecosystems; life zones; models; nature conservation; Central America.

## Introducción

El cambio climático representa una seria amenaza para la biodiversidad, pero todavía hay mucha incertidumbre acerca de sus impactos potenciales sobre los ecosistemas y las especies. Para poder anticipar los impactos e implementar medidas de reducción de la vulnerabilidad es necesario identificar los ecosistemas más expuestos y sensibles (IPCC 2002). Un posible enfoque es la deter-

minación de los impactos del CC sobre la distribución de las zonas de vida (ZV) de Holdridge (1967). Este enfoque ya se ha aplicado en algunos países de Centroamérica (Mendoza et ál. 2001, Alpízar 2007), donde se han utilizado escenarios climáticos globales, no regionales. Ese mismo enfoque se ha empleado en otros estudios con contextos diferentes (Kirilenko et ál. 2000, Chen et ál. 2003). Centroamérica ha sido catalogada como zona de alto

impacto del cambio climático (CC) (Giorgi 2006); por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto potencial del CC, a partir de dos escenarios producidos con el modelo de circulación PRECIS sobre la distribución de ZV.

**Cambio climático y biodiversidad**  
El CC es uno de los principales procesos que impactan la biodiversidad, junto con la conversión y degradación del hábitat, la sobreexplotación

y el desplazamiento por especies exóticas invasivas (Biringer et ál. 2005). Cambios climáticos a nivel global han ocurrido durante los últimos 1,8 millones de años, los cuales han producido modificaciones en el rango de hábitat de la mayoría de las especies, así como una marcada reorganización de las comunidades biológicas; esto ha dado lugar a extinciones masivas (Reid et ál. 2004, Biringer et ál. 2005). Sin embargo, estas respuestas de los ecosistemas ocurrieron frente a cambios mucho más lentos que los actuales y se dieron en paisajes menos fragmentados o degradados, y con menor influencia humana que los paisajes actuales (Biringer et ál. 2005).

El periodo actual de calentamiento global está, en su mayor parte, ligado a las actividades humanas; específicamente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) por la quema de combustibles fósiles, a las prácticas agrícolas y otros cambios de uso de la tierra que liberan metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, entre otros (IPCC 2002, Reid y Huq 2005, Reid et ál. 2004).

Los ecosistemas naturales y el CC mantienen una relación recíproca: la biodiversidad es afectada por los cambios en el clima y el clima, a su vez, es afectado por los cambios en los ecosistemas causados por las emisiones de GEI (Reid et ál. 2004). El CC impacta a la biodiversidad desde el nivel de ecosistemas hasta el nivel de especies (Reid y Huq 2005); sin embargo, no afecta igual a todas las especies y comunidades - algunas tienden más a la extinción que otras por efectos directos o indirectos del cambio (IPCC 2002, Biringer et ál. 2005). El impacto más obvio se da en los límites de los ecosistemas como consecuencia del incremento del nivel del mar y los cambios en la temperatura. Esto provoca que algunos ecosistemas se expandan a nuevas áreas y otros disminuyan en tamaño (IPCC 2007,

Reid y Huq 2005). Los tipos de ecosistemas que, posiblemente, sean más vulnerables al calentamiento global son los manglares, los arrecifes de coral, los ecosistemas de altitudes elevadas y los ecosistemas con un *permafrost* superficial (IPCC 2002, Reid et ál. 2004, Biringer et ál. 2005).

#### Escenarios de cambio climático

Debido a la complejidad del sistema climático y de la incertidumbre sobre emisiones futuras de GEI, la tasa y magnitud probables de los cambios, en especial en el ámbito regional son poco predecibles (IPCC 2002). Para definir escenarios de CC, se utilizan escenarios de emisiones como insumos de modelos de circulación global o regional (GCM y RCM por sus siglas en inglés) que simulan el sistema climático. Como existen varios GCM y RCM y varios escenarios de emisiones, sus combinaciones producen una gran diversidad de escenarios climáticos futuros.

Las emisiones futuras de GEI son el producto de sistemas dinámicos complejos, determinados por el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico, pero su evolución futura es muy incierta (IPCC 2000). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado varios escenarios de emisiones a largo plazo, los cuales se han utilizado para el análisis de un posible CC, de sus repercusiones y de las opciones para mitigarlo. Los escenarios de lo que podría suceder en el futuro representan un instrumento adecuado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras y evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis (IPCC 2000).

Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes (demográficas, económicas y tecnológicas) de las emisiones de GEI y su evolución,

se desarrollaron cuatro líneas evolutivas o familias de escenarios (A1, A2, B1, B2). Los escenarios de la familia A representan un desarrollo más enfocado en el crecimiento económico que los de la familia B, que consideran un desarrollo con objetivos ambientales. Asimismo, los escenarios de la familia 1 representan un mundo globalizado, mientras que los de la familia 2 consideran un mundo regionalizado. Entre las cuatro líneas evolutivas, se desarrolló un total de 40 escenarios de emisiones, pero el IPCC ha tomado seis como escenarios representativos: tres de la familia A1 por caracterizar de forma distinta el desarrollo de tecnologías de energía, y uno de cada uno de los restantes escenarios B1, B2 y A2 (IPCC 2000). Aunque estas proyecciones a futuro son relativamente crudas, es importante evaluar y monitorear la posible respuesta de la vegetación, ecosistemas y especies nativas importantes en todo el mundo bajo CC (Yates et ál. 2000).

#### Zonas de vida

Los escenarios de emisiones generados con GCM o RCM ayudan a determinar cambios sobre distintas variables climáticas que permiten conocer posibles impactos del CC sobre la biodiversidad y los ecosistemas. El modelo de ZV de Holdridge (1967) es un modelo bioclimático que explica la distribución geográfica de las principales asociaciones vegetales del mundo a partir de variables climáticas como precipitación y temperatura; por ello, es una herramienta útil para determinar el impacto del CC en la distribución de los ecosistemas.

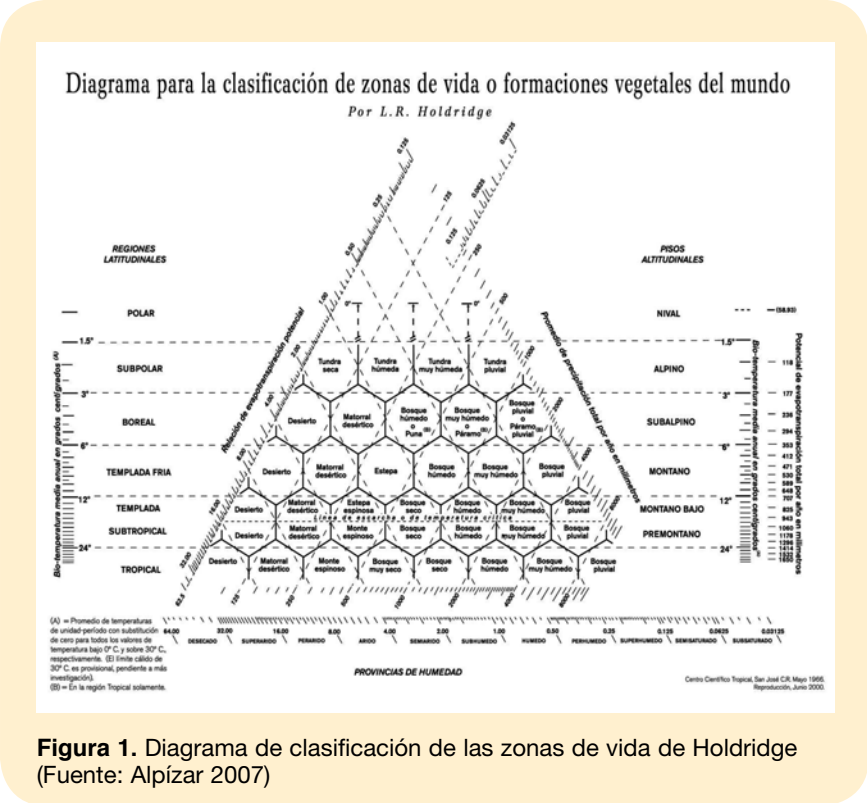
El diagrama de ZV de Holdridge es una representación gráfica de las ZV más comunes en el planeta. Las ZV están determinadas principalmente por valores anuales de precipitación y temperatura, expresada como biotemperatura (promedio de las temperaturas entre 0°C y 30°C durante un año), que es

una medida del calor efectivo en el crecimiento de las plantas. Ambas medidas se expresan en progresión logarítmica y establecen divisiones en el diagrama (Fig. 1). El diagrama muestra las posiciones climáticas de las ZV basales o a nivel del mar, y las posiciones relativas en altura de las distintas ZV, superpuestas a las ZV basales de cada región latitudinal. De esta manera, la temperatura determina no sólo los pisos altitudinales sino que a través de una corrección con la altitud de cada zona (Fórmula 1), se obtiene la temperatura a nivel del mar que determina la región latitudinal a la que esta pertenece (Holdridge 1967).

### Metodología

Un estudio de impactos esperados toma en cuenta la sensibilidad de un sistema y su exposición a ciertos cambios (Carter et ál. 1994). En el presente estudio, los impactos esperados sobre los ecosistemas se estudiaron mediante los cambios en la extensión y distribución geográfica de las ZV, provocados por el cambio en las variables ambientales que el modelo utiliza. El estudio se realizó en la región centroamericana y constó de dos etapas. 1) Elaboración de un mapa actual de ZV para Centroamérica. 2) Elaboración de mapas de ZV considerando un horizonte de tiempo futuro (promedio entre los años 2011-2040) bajo dos escenarios de CC (A2 y B1), que toman en cuenta los cambios potenciales en las variables climáticas durante ese periodo.

**Elaboración del mapa actual de ZV**  
El mapa base de ZV se creó con base en información de precipitación, temperatura y altura obtenida de WorldClim, un grupo de capas digitales de clima global promedio para el periodo 1950-2000, con una



**Figura 1.** Diagrama de clasificación de las zonas de vida de Holdridge (Fuente: Alpizar 2007)

resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> (30 arcosegundos; Hijmans et ál. 2005). Para la creación de la capa de biotemperatura (T) se utilizaron las capas de temperaturas mínimas y máximas de cada mes (Lugo et ál. 1999); las temperaturas inferiores a 0°C y superiores a 30°C, se reclasificaron como 0 y 30°C, respectivamente, y posteriormente promediadas para obtener una capa de biotemperatura promedio anual. Con la capa de altura y biotemperatura promedio se obtuvo la capa de temperatura a nivel de mar (T<sub>mar</sub>), usando la fórmula de corrección de Holdridge (Fórmula 1).

$$T_{mar} \text{ °C} = T_{real} \text{ °C} + (6/1000 \times \text{Altura en metros}) \quad [1]$$

La capa de temperatura a nivel de mar fue reclasificada en categorías de zonas latitudinales establecidas en el diagrama de Holdridge; se les

asignó un código C<sub>1</sub> de 1 a 6 con los siguientes valores:

- C<sub>1</sub> = 1 para T<sub>mar</sub> > 24°C Tropical
- C<sub>1</sub> = 2 para 12°C < T<sub>mar</sub> < 24°C templado o subtropical, según el régimen de heladas
- C<sub>1</sub> = 3 para 6°C < T<sub>mar</sub> < 12°C templado frío
- C<sub>1</sub> = 4 para 3°C < T<sub>mar</sub> < 6°C Boreal
- C<sub>1</sub> = 5 para 1,5°C < T<sub>mar</sub> < 3°C Subpolar
- C<sub>1</sub> = 6 para T<sub>mar</sub> < 1,5°C Polar

Además, se definió un código C<sub>2</sub> para el piso altitudinal. Cuando la T y la T<sub>mar</sub> corresponden a la misma zona latitudinal, se considera que el piso es basal (C<sub>2</sub>=10). En caso contrario, la capa de T fue reclasificada según las categorías altitudinales establecidas por Holdridge (sin diferenciar los pisos premontano y montano bajo<sup>5</sup>, el cual se consideró como premontano, simplemente):

<sup>5</sup> Según Holdridge (1967), investigaciones en Costa Rica han mostrado que, en las mismas provincias de humedad, los bosques premontano y montano bajo son similares.

- $C_2 = 10$  para  $T > 24^\circ\text{C}$  Basal
- $C_2 = 20$  para  $12^\circ\text{C} < T < 24^\circ\text{C}$   
Premontano o montano bajo  
según el régimen de heladas
- $C_2 = 30$  para  $6^\circ\text{C} < T < 12^\circ\text{C}$   
Montano
- $C_2 = 40$  para  $3^\circ\text{C} < T < 6^\circ\text{C}$   
Subalpino
- $C_2 = 50$  para  $1,5^\circ\text{C} < T < 3^\circ\text{C}$  Alpino
- $C_2 = 60$  para  $T < 1,5^\circ\text{C}$  Alpino

Los rangos de precipitación se obtuvieron a partir de las capas de precipitación mensual promedio arrojadas por WorldClim, las cuales fueron sumadas para obtener la precipitación total promedio anual. Esta capa fue reclasificada en ocho rangos con un código numérico  $C_3$  según las categorías del diagrama de Holdridge:

- $C_3 = 100$  para  $P < 125$  mm
- $C_3 = 200$  para  $125$  mm  $< P < 250$  mm
- $C_3 = 300$  para  $250$  mm  $< P < 500$  mm
- $C_3 = 400$  para  $500$  mm  $< P < 1000$  mm
- $C_3 = 500$  para  $1000$  mm  $< P < 2000$  mm
- $C_3 = 600$  para  $2000$  mm  $< P < 4000$  mm
- $C_3 = 700$  para  $4000$  mm  $< P < 8000$  mm
- $C_3 = 800$  para  $P > 8000$  mm

Finalmente, para obtener el mapa base de ZV, se sumaron las tres capas reclasificadas (región latitudinal, piso altitudinal y rango de precipitación) para obtener los códigos correspondientes a las distintas ZV presentes en la región centroamericana. Los códigos  $C_2$  y  $C_3$  informan sobre el hexágono al que corresponde la ZV en la Fig. 1 (p.e.,  $C_2=10$  y  $C_3=600$  indican el hexágono “bosque húmedo”); para conocer el nombre completo de la ZV, se debe usar también el código  $C_1$  que determina la región latitudinal (p.e., “tropical” con  $C_1=1$ ), de manera que la suma 611 corresponde a un bosque húmedo tropical.

#### Elaboración del mapa de ZV a futuro

Se realizó el modelaje de cambio de ZV con las salidas del modelo climático regional PRECIS. Este modelo se clasifica dentro de los RCM que, como los GCM, estiman el efecto de las emisiones según cada escenario de emisiones del IPCC pero a una escala de resolución mucho más fina. El modelo permite mejorar la representación de la información climática importante para evaluar los impactos y la vulnerabilidad de los países al CC (Jones et ál. 2004). PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*) es un RCM portátil que puede ser corrido en una computadora personal y aplicado a cualquier área del globo para generar escenarios de CC detallados (Jones et ál. 2004). Para la región de Centroamérica, México y el Caribe, los resultados de las corridas de PRECIS-Caribe se encuentran en <http://precis.insmet.cu/Precis-Caribe.htm> que arroja datos en formato *raster* de los cambios o anomalías para la precipitación y temperatura con una resolución de 50 km y para los escenarios A2 y B1.

Se obtuvieron las capas de cambio o anomalías promedio para el periodo 2011-2040 para la precipitación y temperatura bajo los dos escenarios evaluados. Las capas fueron remuestreadas para obtener los datos con una resolución de 1 km<sup>2</sup> como los datos de WorldClim y, posteriormente, suavizadas mediante una opción estadística que promedia los datos de las 50x50 celdas adyacentes y atenúa los cambios bruscos de temperatura o precipitación entre píxel y píxel. Las capas de cambio futuro para la temperatura y la precipitación se sumaron con las capas actuales de biotemperatura y precipitación total (promedios anuales); las capas resultantes fueron reclasificadas dentro de los rangos del diagrama de ZV de Holdridge para obtener las distribuciones futuras de las ZV.

Todo el trabajo de creación de mapas y modelaje de cambio se llevó a cabo con los programas de cómputo de sistemas de información geográfica, ArcView 3.3 y ArcGIS 9.2. Además se utilizó el programa Idrisi Los Andes 14.0 para el análisis espacial, que permitió comparar los mapas futuros con el actual y determinar los cambios en las ZV.

#### Resultados y discusión

Con base en las dos variables climáticas principales: temperatura y precipitación, se obtuvieron once ZV que van desde ambientes a nivel del mar hasta sistemas subalpinos ubicados en zonas montañosas, y abarcan desde bosques muy secos hasta bosques pluviales (Fig. 2). Este número sería más elevado si se hubiera tomado en cuenta la diferencia entre pisos premontano y montano bajo y se hubieran considerado las transiciones entre ZV. La mayoría de las ZV actuales correspondieron a los pisos altitudinales basal (36,4%) y premontano (36,4%); los pisos de mayor elevación estuvieron menos representados (montano 18,2% y subalpino 9,1%). Asimismo, la mayoría de las ZV encontradas correspondieron a provincias muy húmedas y pluviales (27,3% en ambos casos), seguidas de las provincias húmedas y secas (18,2% en ambos casos); solamente una ZV se caracterizó como muy seca (9,1%). En el piso basal estuvieron representadas todas las provincias de humedad menos la pluvial; en el piso premontano todas menos la muy seca; en el montano solamente la muy húmeda y la pluvial y en subalpino únicamente la pluvial.

Esta clasificación en ZV con base en las variables climáticas mencionadas no tomó en cuenta otros mecanismos importantes que controlan la respuesta de la vegetación, como el suelo, el relieve, la estacionalidad climática y los efectos indirectos del CO<sub>2</sub> (Yates et ál 2000, Chen et ál 2003, Alpízar 2007). Por

esa razón, no puede considerarse como una clasificación a nivel de asociaciones vegetales, que sería una representación más real de los ecosistemas y sus transiciones (Alpizar 2007). Sin embargo, para los objetivos de este estudio se considera suficiente con una clasificación gruesa de ecosistemas a partir de los factores primordiales que rigen el ambiente; con ella, es posible examinar de manera amplia cuáles ecosistemas resultan más sensibles al efecto del CC, mediante cambios en su distribución y extensión. Como indican Yates et ál. (2000), si se tiene un acceso limitado a modelos mecanicistas, a expertos en modelación y a datos regionales de alta resolución y recursos de cálculo, los modelos de correlación que, como el de Holdridge, se basan en relaciones simples entre medidas agregadas de clima y vegetación (Lugo et ál. 1999), pueden ser los únicos métodos aplicables en estudios de impacto climático en la región.

Según el mapa actual de ZV, las más extensas son el bosque húmedo tropical, el bosque seco tropical y el bosque húmedo premontano, con áreas superiores a los 100.000 km<sup>2</sup>.

En el otro extremo están el páramo pluvial subalpino, el bosque pluvial montano y el bosque muy seco tropical, con áreas menores a 2500 km<sup>2</sup> (Fig. 2 y Cuadro 1). Las ZV más afectadas por el CC serían las distribuidas en los pisos altitudinales premontano y montano, con cambios entre 36,1% y 62,7% en

ambos escenarios. El páramo pluvial subalpino es no sólo la ZV más restringida sino también las más afectada, puesto que un 78,8% de su área, en el escenario más optimista (B1), resultaría transformada (Cuadro 1, Fig. 3). El piso basal es el menos afectado bajo ambos escenarios: entre 0,6% y 9,9% de cambio

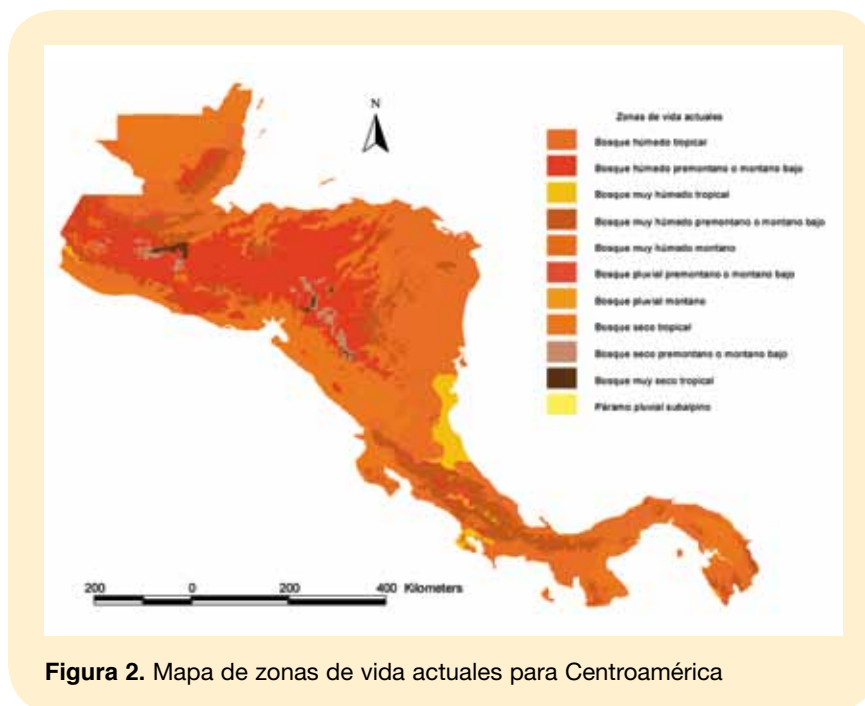


Figura 2. Mapa de zonas de vida actuales para Centroamérica

Cuadro 1. Zonas de vida actuales y futuras para el periodo 2011-2040 en Centroamérica

Zona de vida	Área actual en km <sup>2</sup> / Porcentaje del total	Área afectada (%) Escenario A2	Área afectada (%) Escenario B1	Principales direcciones de cambio para el escenario B1
Páramo pluvial subalpino	28 / 0,10	84,8	78,8	Bosque pluvial montano: 78,8%
Bosque pluvial montano	1.276 / 0,24	40,5	38,1	Bosque muy húmedo premontano: 37,3%
Bosque muy seco tropical	2.239 / 0,42	1,3	0,6	Monte espinoso tropical: 0,6%
Bosque muy húmedo montano	2.841 / 0,53	45,3	41,7	Bosque húmedo premontano: 41,7%
Bosque pluvial premontano	4.436 / 0,83	39,3	36,1	Bosque muy húmedo tropical: 21,5%
Bosque seco premontano	7.031 / 1,32	67,7	62,7	Bosque muy húmedo premontano: 9,8%
Bosque muy húmedo tropical	12.539 / 2,36	2,6	2,4	Bosque húmedo tropical: 4,8%
Bosque muy húmedo premontano	64.260 / 12,09	43,3	40,7	Bosque muy seco tropical: 62,1%
Bosque húmedo premontano	114.113 / 21,47	39,3	36,3	Bosque húmedo tropical: 2,4%
Bosque seco tropical	142.412 / 26,61	8,7	7,8	Bosque húmedo tropical: 28,3%
Bosque húmedo tropical	181.205 / 34,10	9,9	8,9	Bosque seco tropical: 6,5%
				Bosque húmedo premontano: 5,6%
				Bosque seco tropical: 31,3%
				Bosque seco premontano: 2,4%
				Bosque muy seco tropical: 2,3%
				Bosque húmedo tropical: 5,0%
				Bosque muy seco tropical: 3%
				Bosque seco tropical: 8,1%

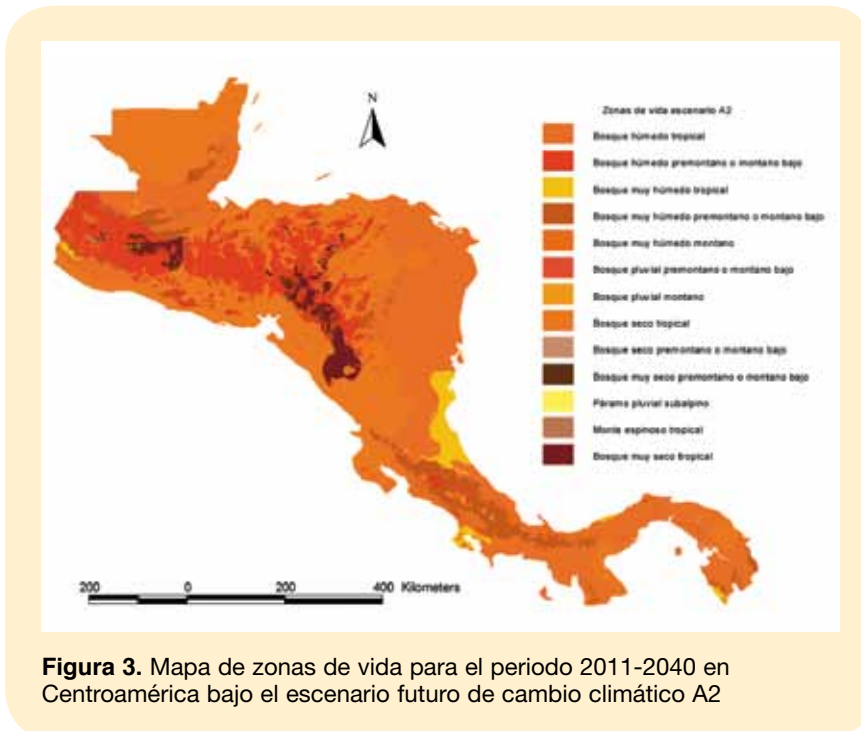
en su extensión. En el escenario A2 (Fig. 4), los cambios en el área de distribución de las distintas ZV serían siempre más drásticos; por ejemplo, bajo estos supuestos de cambio, el 84,8% del páramo pluvial subalpino

cambiaría hacia otra ZV. En ambos escenarios, la mayoría de los cambios se dieron hacia una ZV de piso altitudinal más bajo y provincias de humedad de menor precipitación (Cuadro 1); la transformación

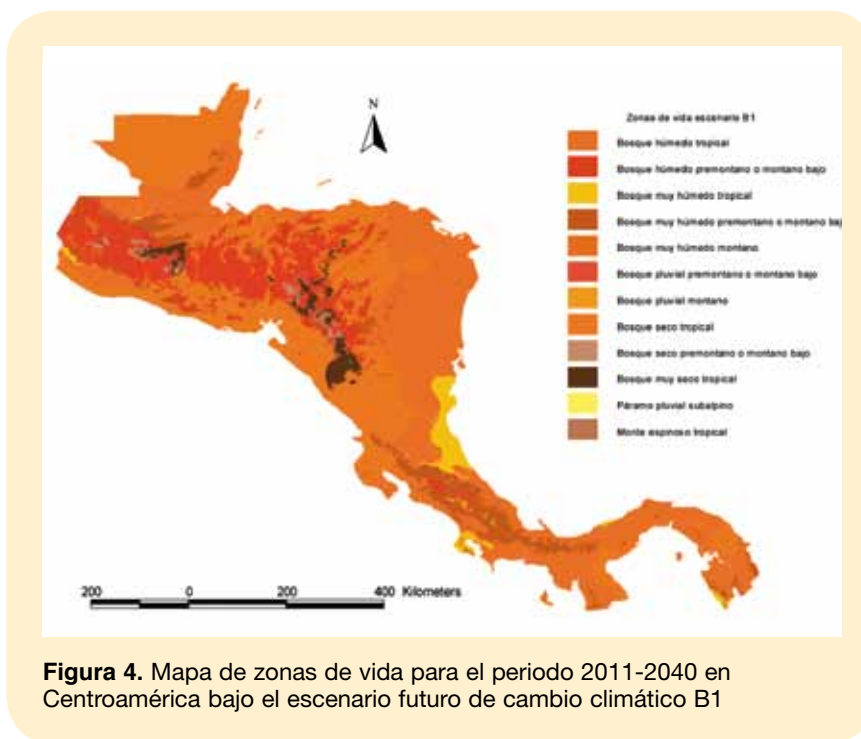
hacia bosque seco es una de las más notorias (Fig. 5). Así, cuatro zonas catalogadas como muy húmedas y cuatro como húmedas pasarían a zonas dentro de provincias húmedas y secas, respectivamente. Contrario a lo esperado, el bosque seco tropical cambió, en su mayor parte, a bosque húmedo tropical y en menor proporción a bosque muy seco tropical (Cuadro 1).

En el escenario A2, además del páramo pluvial subalpino, otras ZV tuvieron cambios notables; entre ellas, el bosque seco premontano (67,7% de su área total), que cambió a bosque muy seco tropical; el bosque muy húmedo montano (45,3%) hacia bosque húmedo premontano; el bosque muy húmedo premontano (43,3%), en su mayoría hacia bosque húmedo tropical, y el bosque pluvial montano (40,5%), en su mayoría a bosque muy húmedo premontano. Las ZV que sufrieron menos cambios son el bosque muy seco tropical y el bosque muy húmedo tropical, con cambios de menos de 3%. Cabe resaltar otras ZV con pequeños cambios proporcionales de área pero que abarcan áreas de gran extensión en la región. Tal es el caso del bosque húmedo tropical con una extensión de más de 180 mil km<sup>2</sup> y un cambio del 8,9% de su área original a bosque seco tropical (Fig. 5), lo que representa un total de 16.197,24 km<sup>2</sup> bajo cambio potencial. Otro caso es el del bosque seco tropical, con un área original de más de 140 mil km<sup>2</sup> y un 5,5% (7.788,16 km<sup>2</sup>) que pasaría a bosque muy seco tropical, siempre en el escenario A2. Por último, resalta el cambio en el bosque húmedo premontano hacia bosque seco tropical, por la extensión original del primero (114.113 km<sup>2</sup>) y la magnitud del cambio (31,3%).

Para los dos escenarios climáticos evaluados en el presente trabajo, se observa la aparición de una ZV de clima caliente y seca: el monte espinoso tropical, originado por la



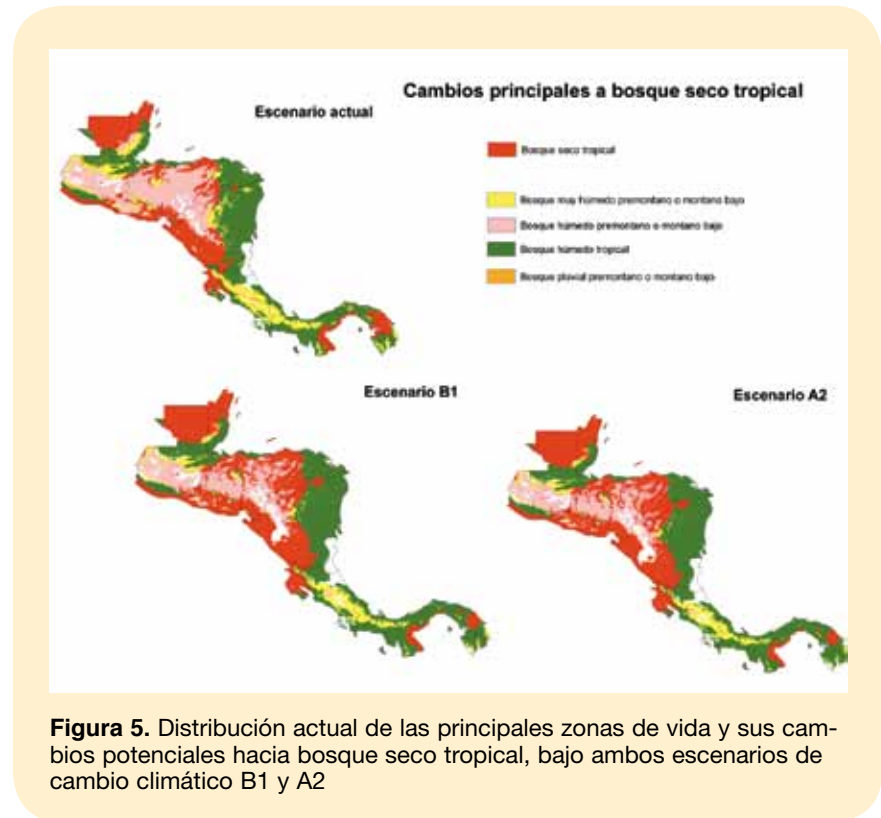
**Figura 3.** Mapa de zonas de vida para el periodo 2011-2040 en Centroamérica bajo el escenario futuro de cambio climático A2



**Figura 4.** Mapa de zonas de vida para el periodo 2011-2040 en Centroamérica bajo el escenario futuro de cambio climático B1

pérdida de área del bosque muy seco tropical. Este cambio es más fuerte con el escenario A2, en el cual la disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura son mayores. Para la región centroamericana, otros autores como Aguilar et ál. (2005) han previsto un aumento en las temperaturas, que puede estar relacionado con la aparición de este tipo de ZV más secas. Los análisis de estos autores revelan una tendencia general al calentamiento por el incremento de las temperaturas cálidas máximas y mínimas y la disminución de eventos de temperaturas frías extremas entre los años 1961 y 2003. La tendencia general en la distribución de los ecosistemas hacia provincias de humedad más secas y generalmente en zonas altitudinales menores, se refleja en la amenaza a ecosistemas como el páramo pluvial subalpino y el bosque seco premontano, las ZV que sufren mayor pérdida de área en la región. El páramo, que bajo los escenarios propuestos prácticamente desaparece, además de ser sensible por su pequeña extensión (28 km<sup>2</sup> aproximadamente), tendría muy poca capacidad de adaptación al ser un ecosistema de montaña que no puede migrar a zonas con las condiciones adecuadas para su establecimiento (menor temperatura y mayor elevación) (IPCC 2002, Biringer et ál. 2005, Reid y Huq 2005, Karmalkar et ál. 2008). En el caso del bosque seco premontano, la transformación a bosque muy seco tropical refleja también las anomalías o cambios climáticos de los modelos propuestos, y coincide con los resultados de Mendoza et ál. (2001) en el pacífico de Nicaragua, donde se vienen incrementado las superficies de las zonas secas y muy secas.

Aunque el cambio observado en las ZV se debe al CC, no se debe descartar el efecto de la fragmentación, la pérdida de hábitat y otros impactos de origen antropogénico que indudablemente afectan negati-



**Figura 5.** Distribución actual de las principales zonas de vida y sus cambios potenciales hacia bosque seco tropical, bajo ambos escenarios de cambio climático B1 y A2

vamente la disponibilidad de hábitat para la biodiversidad asociada a las ZV impactadas (IPCC 2002, Biringer et ál. 2005, Red y Huq 2005) y que no son tomados en cuenta bajo el presente enfoque. Además de determinar la distribución actual de los ecosistemas y los cambios potenciales en su distribución, sería conveniente considerar también su estado de alteración actual y hacer proyecciones mediante modelos de comportamiento del cambio de uso de la tierra (Alpízar 2007).

A pesar de que los modelos utilizados no consideran la capacidad de adaptación de especies individuales, sí podrían determinar un nivel de amenaza sobre las especies ligadas (endémicas, indicadoras) a ciertos ecosistemas que bajo el cambio sufren una pérdida importante de su área y conducen a la reducción o migración de las especies. En el caso particular de este trabajo, el conocimiento de las especies ligadas al páramo permitiría desarrollar

estrategias de conservación de las mismas y resaltar la importancia de implementar prácticas para la reducción de los efectos del CC en la región. Asimismo, la creación de un mapa actualizado de las ZV en la región, a partir de las capas ambientales digitales obtenidas de la base de datos de WorldClim, representa un aporte importante a los datos existentes. De hecho, muchos de los países latinoamericanos cuentan con mapas ecológicos basados en ZV elaborados hace muchos años, los cuales podrían sufrir cambios importantes justamente debido al CC (Alpízar 2007).

### Conclusiones y recomendaciones

Este estudio representa un ejercicio sencillo de modelación que, sin embargo, es muy útil para determinar el estado potencial de las regiones naturales de Centroamérica en el futuro. El mapa de ZV creado permite tener una representación,




con una resolución fina, de las condiciones climáticas actuales en la región centroamericana y puede ser usado para realizar trabajos a escalas más pequeñas (países o regiones geográficas específicas). Con base en ese mapa fue posible determinar cuáles ZV ocupan menor territorio y podrían ser más sensibles al calentamiento global. Con los escenarios de CC utilizados fue posible determinar el posible impacto del cambio climático sobre los ecosistemas naturales de la región.

Los resultados encontrados con los dos escenarios modelados concuerdan con las tendencias globales esperadas, donde los ecosistemas de altitudes mayores serán los más vulnerables al calentamiento global; también coinciden con otros estudios en la región centroamericana, que sugieren que los efectos del CC serán más pronunciados en

mayores elevaciones que en elevaciones bajas, particularmente en la vertiente pacífica.

Valdría la pena desarrollar el mismo estudio tomando en cuenta datos ambientales locales (p.e. tipo de suelo) que generen mayor grado de detalle a nivel de ecosistemas y sus transiciones. El uso de modelos de cambio y datos ambientales regionales de mayor resolución y la utilización de otros sistemas de vegetación permitirían establecer comparaciones con los resultados aquí presentados. También sería importante relacionar el grado de sensibilidad de las ZV con las comunidades y especies de flora y fauna que las componen y evaluar si especies claves o indicadores son afectadas por el cambio de distribución de las ZV donde existen las condiciones para desarrollarse. Investigar las capacidades de adaptación de los ecosistemas

(migración o modificación de la composición) y evaluar si los ecosistemas podrán seguir brindando los servicios ambientales que prestan es otro trabajo que queda pendiente.

Por ahora, los escenarios climáticos regionales de PRECIS están disponibles solamente para los escenarios de emisiones A2 y B1 del IPCC. Sin embargo, las salidas de otros modelos globales podrían ser utilizadas para comparar las tendencias a futuro. 

### Agradecimientos

Agradecemos a Pablo Imbach por la revisión e ideas para la ejecución de este trabajo; a Luis Molina por el aporte en la generación de los escenarios de CC; a Christian Brenes por todo el apoyo en el procesamiento de datos y la orientación en el uso de los programas de SIG. A Bryan Finegan por la revisión y comentarios al documento.

### Literatura citada

- Aguilar, E; Peterson, T.C; Ramírez Obando, P; Frutos, R; Retana, JA; Solera, M; Soley, J; González García, I; Araujo, RM; Rosa Santos, A; Valle, VE; Brunet, M; Aguilar, L; Alvarez, L; Bautista, M; Castañón, C; Herrera, L; Ruano, E; Sinay, JJ; Sánchez, E; Hernández Oviedo, GI; Obed, F; Salgado, JE; Vazquez, JL; Baca, M; Gutiérrez, M; Centella, C; Espinoza, J; Martínez, D; Olmedo, B; Ojeda Espinoza, CE; Núñez, R; Haylock, M; Benavides, H; Mayorga, R. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America 1961-2003. *Journal of Geophysical Research* 110, D23107.
- Alpízar, E. 2007. Vulnerabilidad de bosques ante cambio climático puede simularse con sistema de zonas de vida. *Ambientico* 165: 28-30.
- Biringer, J; Guariguata, MR; Locatelli, B; Pfund, JL; Spanger-Sigfried, E; Suárez, AG; Yeaman, S; Jarvis, A. 2005. Biodiversity in a changing climate: a framework for assessing, vulnerability and evaluating practical responses. *In* Robledo, C; Kanninen, M; Pedroni, L. (eds.). *Tropical forest and adaptation to climate change: In search of synergies*. Bogor, Indonesia, CIFOR. p. 154-183.
- Carter, TR; Parry, ML; Harasawa, H; Nishioka, S. 1994. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. London, United Kingdom, Department of Geography, University College London.
- Chen, X; Zhang X-S; Li, B-L. 2003. The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and Planetary Change* 38: 327-337.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical research letters* 33: L08707. DOI: 10.1029/2006GL025734.
- Hijmans, RJ; Cameros, SE; Parra, JL; Jones, P; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Holdridge, LR. 1967. *Life zone ecology*. San José, Costa Rica, Tropical Science Center. 206 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2000. Resumen para responsables de políticas: Escenarios de emisiones. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. s.n.t. 27 p.
- IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. s.n.t. 85 p.
- IPCC. 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. s.l. IPCC.
- Jiménez Méndez, M. 2009. Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 140 p.
- Jones, RG; Nogue, M; Hassell, DC; Hudson, D; Wilson, SS; Jenkins, GJ; Mitchell, JFB. 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Exeter, United Kingdom, Met Office Hadley Centre. 40 p.
- Karmalkar, AV; Bradley, RS; Diaz, HF. 2008. Climate change scenario for Costa Rican montane forests. *Geophysical Research Letters* 35: L11702, doi:10.1029/2008GL033940.
- Kirilenko, AP; Belotelov, NV; Bogatyrev, BG. 2000. Global model of vegetation migration: incorporation of climatic variability. *Ecological Modelling* 132: 125-133.
- Lugo, AE; Brown, SL; Dodson, R; Smith, TS; Shugart, HH. 1999. The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography* 26: 1025-1038.
- Mendoza, F; Chévez, M; González, B. 2001. Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamericana* 33:17-22.
- Reid, H; Huq, S. 2005. Climate change: Biodiversity and livelihood impacts. *In* Robledo, C; Kanninen, M; Pedroni, L. (eds.). *Tropical forest and adaptation to climate change: In search of synergies*. Bogor, Indonesia, CIFOR. p. 57-70.
- Reid, H; Pisupati, B; Baulch, H. 2004. How biodiversity and climate change interact (on line). Science and Development Net. Biodiversity Dossier Policy Brief. Consultado 20 nov. 2007. Available in <http://www.scidev.net/>
- Yates, DN; Kittel, TGF; Cannon, RF. 2000. Mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change* 44:59-87.