

# Impacto del cambio climático en sistemas silvopastoriles de Centroamérica

## Distribución potencial de especies leñosas y gramíneas

Efraín José Leguía Hidalgo<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Consultor internacional. Proyecto *Construcción de capacidades para la adaptación al cambio y variabilidad climática en fincas ganaderas en Nicaragua y Honduras*, ejecutado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), con financiamiento de la Agencia de los Estados Unidos de América para el Desarrollo Internacional (USAID). El contenido de este documento es o responsabilidad de los autores y no necesariamente refleja la opinión de USAID, ni del gobierno de los Estados Unidos.

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, 2015

ISBN 978-9977-57-643-5

634.92  
L521 Leguía Hidalgo, Efraín José  
Impacto del cambio climático en sistemas silvopastoriles de Centroamérica: distribución potencial de especies leñosas y gramíneas / CATIE. – 1º ed. – Turrialba, C.R : CATIE, 2015.  
58 p. : il. – (Serie técnica. Boletín técnico / CATIE ; no. 75)

ISBN 978-9977-57-643-5

1. Sistemas Silvopascícolas – América Central. 2. Modelación - Plantas leñosas.  
3. Nicho ecológico – Modelos. I. CATIE. II. Título. III. Serie.

## Créditos:

Autor: Efraín José Leguía Hidalgo

Revisión técnica: Maarten van Zonneveld, Emmanuel Zapata

Revisión filológica: Elizabeth Mora y Lorena Orozco

Fotografías de portada: Cristobal Villanueva

Diseño y diagramación: Silvia Francis, OCI

# Contenido

1.	Introducción.....	7
1.1.	Ganadería y cambio climático .....	8
1.2.	Cambio climático y distribución de especies .....	9
1.3.	Modelos de nicho ecológico .....	10
1.4.	Emisiones de GEI .....	13
2.	Modelos de nicho ecológico.....	16
2.1.	Maxent.....	16
2.2.	EcoCrop (Diva-GIS) .....	21
3.	Distribución actual y futura de las especies leñosas y gramíneas evaluadas.....	25
3.1.	<i>Cordia alliodora</i> .....	25
3.2.	<i>Guazuma ulmifolia</i> .....	29
3.3.	<i>Tabebuia rosea</i> .....	32
3.4.	<i>Gliricidia sepium</i> .....	34
3.5.	<i>Cedrela odorata</i> .....	35
3.6.	<i>Brachiaria brizantha</i> .....	41
3.7.	<i>Paspalum notatum</i> .....	43
4.	Impactos provocados por el cambio climático.....	47
4.1.	Críticas a los modelos de nicho ecológico .....	48
4.2.	Incertidumbre asociada al clima futuro .....	49
4.3.	Comportamiento de las principales plagas y enfermedades.....	50
5.	Conclusiones.....	52
	Bibliografía .....	55

## Cuadros

Cuadro 1.	Algoritmos usados por modelos de nicho ecológico .....	11
Cuadro 2.	Modelos de circulación global disponibles .....	14
Cuadro 3.	Condiciones potenciales para el desarrollo de <i>Cordia alliodora</i> en siete países centroamericanos.....	26
Cuadro 4.	Tipo de cambios esperados en la distribución de <i>Cordia alliodora</i> por país .....	28
Cuadro 5.	Condiciones potenciales para el desarrollo de <i>Guazuma ulmifolia</i> en siete países centroamericanos ...	29

Cuadro 6.	Tipos de cambios esperados en la distribución de <i>Guazuma ulmifolia</i> por país .....	31
Cuadro 7.	Condiciones potenciales para el desarrollo de <i>Tabebuia rosea</i> en siete países centroamericanos.....	27
Cuadro 8.	Tipos de cambios esperados en la distribución de <i>Tabebuia rosea</i> por país .....	34
Cuadro 9.	Condiciones potenciales para el desarrollo de <i>Gliricidia sepium</i> en siete países centroamericanos.....	35
Cuadro 10.	Tipos de cambios esperados en la distribución de <i>Gliricidia sepium</i> por país .....	31
Cuadro 11.	Condiciones potenciales para el desarrollo de <i>Cedrela odorata</i> en siete países centroamericanos .....	37
Cuadro 12.	Tipo de cambios esperados en la distribución de <i>Cedrela odorata</i> por país.....	39
Cuadro 13.	Adecuación de <i>Brachiaria brizantha</i> en siete países de Centroamérica .....	41
Cuadro 14.	Tipos de cambios esperados en la distribución de <i>Brachiaria brizantha</i> por país.....	43
Cuadro 15.	Adecuación climatológica para el desarrollo y crecimiento de <i>Paspalum notatum</i> en siete países de Centroamérica (climatología 1950-2000) .....	44
Cuadro 16.	Tipos de cambios esperados en la distribución de <i>Paspalum notatum</i> por país.....	46

## Mapas

Mapa 1.	Variaciones en temperatura promedio anual y precipitación anual total según el escenario A2 del Modelo CCMA-CGCM3 .....	15
Mapa 2.	Registros de presencia para cinco especies leñosas usadas en sistemas silvopastoriles en la región centroamericana .....	19
Mapa 3.	Distribución actual y futura de <i>Cordia alliodora</i> en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080 .....	27
Mapa 4.	Distribución de <i>Cordia alliodora</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	29
Mapa 5.	Distribución actual y futura de <i>Guazuma ulmifolia</i> en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080 .....	30
Mapa 6.	Comparación en la distribución de <i>Guazuma umifolia</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3 .....	31
Mapa 7.	Distribución actual y futura de <i>Tabebuia rosea</i> en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080 .....	33
Mapa 8.	Distribución de <i>Tabebuia rosea</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	34
Mapa 9.	Distribución actual y futura de <i>Gliricidia sepium</i> en la región centroamericana, según climatología 1950-2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080 .....	36

Mapa 10.	Distribución de <i>Gliricidia sepium</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	37
Mapa 11.	Cambios en la distribución de <i>Cedrela odorata</i> según el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080.....	38
Mapa 12.	Distribución de <i>Cedrela odorata</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	39
Mapa 13.	Cambios en la distribución de <i>Brachiaria brizantha</i> según climatología actual y futura y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080.....	42
Mapa 14.	Distribución de <i>Brachiaria brizantha</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	43
Mapa 15.	Cambios en la distribución de <i>Paspalum notatum</i> según climatología actual y futura y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080.....	44
Mapa 16.	Distribución de <i>Paspalum notatum</i> : escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3.....	45
Mapa 17.	Variación en la precipitación total según 15 modelos de circulación general durante el periodo 2020-2050 con respecto a la climatología 1950-2000.....	51

## Figuras

Figura 1.	Distribución geográfica y distribución ambiental de especies.....	12
Figura 2.	Diagrama de función de nicho ecológico y su aplicación para modelar la distribución potencial de una especie en el tiempo y el espacio.....	17
Figura 3.	Interfaz de ingreso de datos a Maxent.....	18
Figura 4.	Modelo mecanicista EcoCrop.....	22
Figura 5.	Ventana para cargar datos climatológicos en Diva-GIS.....	23
Figura 6.	Ventanas de EcoCrop.....	24
Figura 7.	Área bajo la curva para las especies leñosas evaluadas.....	40

## Recuadros

Recuadro 1.	Cambio en la distribución de especies leñosas usadas en sistemas silvopastoriles en Centroamérica.....	18
Recuadro 2.	Funcionamiento de EcoCrop.....	23



# Introducción

Cada vez hay mayores evidencias –y reconocimiento internacional del cambio climático y su impacto sobre la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Tales ecosistemas han visto afectada su capacidad de proveer bienes y servicios de vital importancia para diversos sectores socioeconómicos y en diferentes escalas.

El desarrollo de sistemas silvopastoriles (SSP) depende de ciertos criterios técnicos, entre los que se incluyen la selección de especies que puedan desarrollarse de manera óptima en las condiciones edafoclimáticas de la zona y la interacción entre todos los componentes del sistema. Si bien es cierto que los sistemas agroforestales y silvopastoriles proveen servicios de gran importancia en el contexto de la mitigación y adaptación al cambio climático, estos sistemas también se verán afectados en la medida en que las especies que los componen sufran impactos provocados por alteraciones climáticas como consecuencia del acelerado calentamiento global. El cambio en las condiciones futuras de temperatura y régimen de precipitaciones significa un reto adicional para la selección de especies en un sistema productivo y/o en las zonas en donde se pretende usar tal sistema.

La evaluación del impacto potencial del cambio climático sobre las especies usadas en sistemas agroforestales es un aporte importante para tomar decisiones sobre futuras acciones que ayuden a minimizar los impactos negativos del cambio climático sobre los sistemas silvopastoriles y, por consiguiente, sobre los medios de vida de miles de familias productoras. Una de las maneras de evaluar el impacto del cambio climático en los sistemas productivos es la modelación de la idoneidad climática de especies en condiciones actuales y futuras. Para ello se emplean modelos de nicho ecológico, los cuales asumen que el clima y otras condiciones ambientales limitan la distribución de una especie.

Este documento pretende contribuir a la discusión regional sobre el impacto del cambio climático en los sistemas silvopastoriles, uno de los sectores productivos más importantes de la región mesoamericana. Los resultados que se exponen son de carácter exploratorio y se basan en supuestos, en la incertidumbre de los escenarios futuros y en una escala regional. Sin embargo, es necesario contar con estudios más detallados que incorporen un mayor número de modelos climáticos para validar y/o reducir la incertidumbre del análisis en los mapas presentados.

Este trabajo persigue los siguientes objetivos:

- Presentar dos herramientas usadas en la predicción del impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies utilizadas con mayor frecuencia por los productores en sistemas silvopastoriles.
- Modelar la distribución (adecuación) actual y futura de cinco especies leñosas y dos gramíneas usadas en sistemas silvopastoriles en Centroamérica mediante dos modelos de nicho ecológico.

### **Ganadería y cambio climático**

A pesar de la importancia de la ganadería para millones de productores y la magnitud de los cambios potenciales que podrían afectar tal sistema productivo, la relación entre el cambio climático y la ganadería en los países en desarrollo aún no ha alcanzado el protagonismo necesario en las agendas de investigación (Thornton *et al.* 2009).

El impacto del cambio climático en la ganadería es múltiple; por ejemplo,

- Efectos en la disponibilidad, cantidad y calidad de pastos y forrajes
- Estrés térmico de los animales
- Disponibilidad de agua
- Enfermedades del ganado y vectores de enfermedades
- Pérdida de biodiversidad de las especies vegetales
- Cambio en los sistemas y medios de vida de las comunidades
- Impactos indirectos

Debido al incremento constante de la temperatura, el estrés hídrico puede afectar la productividad de las pasturas; asimismo, las áreas de pastoreo pueden sufrir impactos significativos en la distribución de especies, composición de las pasturas y distribución de biomasa (Thornton *et al.* 2009).

En términos de calidad de las pasturas, el incremento de la temperatura media y la disminución de las precipitaciones, aunados a un manejo deficiente de las pasturas, pueden causar la lignificación de los pastos. Como resultado, estos son menos digestibles para los animales y, en consecuencia, se reduce la producción de carne y leche.

De otro lado, la actividad ganadera contribuye fuertemente a la generación de gases con efecto invernadero (GEI), principalmente la producción de metano (IPCC 2007). Se estima que la actividad ganadera genera el 50% de las emisiones provenientes del sector agrícola y contribuye con cerca del 9% de las emisiones de CO<sub>2</sub> antrópico, el 37-52% de las emisiones de metano y el 65-84% de las emisiones de óxido nitroso (Steinfeld *et al.* 2006, Scherr y Sthapit 2009). Adicional a las emisiones provenientes de la fermentación entérica y del estiércol, la crianza de ganado se asocia con procesos de cambios de uso de la tierra y deforestación, particularmente en América Central y del Sur (Barona *et al.* 2010, Pacheco *et al.* 2011). En consecuencia, la actividad ganadera no es solo una fuente importante de GEI, sino además uno de los sectores más vulnerables a los efectos adversos del cambio climático.

Sin embargo, los sistemas silvopastoriles pueden contribuir de manera significativa a mitigar las emisiones de GEI mediante la incorporación de especies forestales a sistemas dominados por gramíneas. Las especies leñosas pueden capturar grandes cantidades de carbono y mantenerlo en el sistema durante años (Andrade e Ibrahim 2003). Las estrategias de mitigación mediante sistemas silvopastoriles pueden planearse a nivel de finca, pero con un alcance a nivel de paisaje. En los países latinoamericanos, en donde la ganadería se practica de manera extensiva, el paso de sistemas productivos bajos en carbono a otros que almacenen grandes cantidades de carbono es una opción plausible para luchar contra el cambio climático.

### **Cambio climático y distribución de especies**

El clima es probablemente el factor más importante e influyente en los patrones de vegetación global, ya que tiene un impacto significativo en la distribución, estructura y ecología de los paisajes forestales (Easterling y Apps 2005). Tanto los registros de fósiles como las tendencias actuales observadas revelan que el cambio climático tiene una profunda influencia en el rango de expansión y contracción de la distribución de especies (Pearson y Dawson 2003).

Los cambios medioambientales afectan a las especies forestales de diferentes maneras. El rango de distribución de algunas especies podría reducirse, en tanto que el de otras especies podría expandirse. Algunas especies podrían extinguirse si los cambios continúan por periodos prolongados o si son demasiado rápidos, por lo que las especies no logran adaptarse (Rehfeldt *et al.* 2001, Hamrick 2004). No obstante, las especies pueden responder a cambios en el medio ambiente por medio de la plasticidad fenotípica; así, muchas de ellas se desplazan a otras zonas en donde encuentren condiciones favorables, o en donde se logren adaptar genéticamente, o una combinación de ambas respuestas (Alberto *et al.* 2013).

Hay evidencia científica que demuestra que los rangos geográficos de distribución de las especies arbóreas se han expandido y contraído como respuesta a los cambios ambientales ocurridos durante la historia evolutiva de la tierra (Hamrick 2004). Durante la década pasada se prestó mucha atención a los efectos de los cambios ambientales sobre las especies arbóreas debido al acelerado cambio climático (Davis y Zabinski 1992, Alig *et al.* 2002). Macias *et al.* (2006) y Andreu *et al.* (2007) mencionan que las especies ubicadas en el límite de su distribución geográfica aportan información valiosa respecto a la respuesta del crecimiento del árbol al cambio climático a través de gradientes climáticas. Estos autores usaron información dendroclimática extraída de una población de *Abies alba* y pinos, ubicada en la península Ibérica, para analizar el impacto de las sequías de verano sobre dichas especies. Para ello construyeron la cronología de los anillos de crecimiento de las especies mencionadas. Los resultados revelan que la variabilidad en el crecimiento interanual se ha incrementado marcadamente durante el último siglo, y que el clima ha sido el factor limitante para la formación de los anillos de crecimiento debido al incremento en la variabilidad de las precipitaciones y las olas de calor más frecuentes desde la segunda mitad del siglo XX.

### **Modelos de nicho ecológico**

En el amplio rango de modelos existentes para evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies, los más usados han sido aquellos basados en la “*envoltura bioclimática*” (Pearson 2007b, Foody 2008, Warrent y Seifert 2011). La estrategia más común para estimar la distribución potencial de una especie es caracterizar las condiciones ambientales adecuadas para tal especie y luego identificar espacialmente los sitios con condiciones ambientales similares. Esta caracterización se puede realizar mediante aproximaciones mecánicas o correlaciones (Pearson 2007b).

En el Cuadro 1 se listan algunos modelos usados para la predicción de la distribución de especies. Pearson (2007b) agrupa los modelos de nicho ecológico en *mecanicistas* y *correlativos*. Los modelos mecanicistas, como el EcoCrop, tratan de incorporar mecanismos fisiológicos que limitan la tolerancia de una especie a condiciones ambientales (Ramírez-Villegas *et al.* 2013, Mateo *et al.* 2011). Los modelos correlativos, como el Maxent, buscan determinar las condiciones adecuadas para una especie; para ello se asocian registros de ocurrencia conocida con un juego de variables ambientales que podrían afectar la fisiología y la probabilidad de persistencia de la especie (Warrent y Seifert 2011).

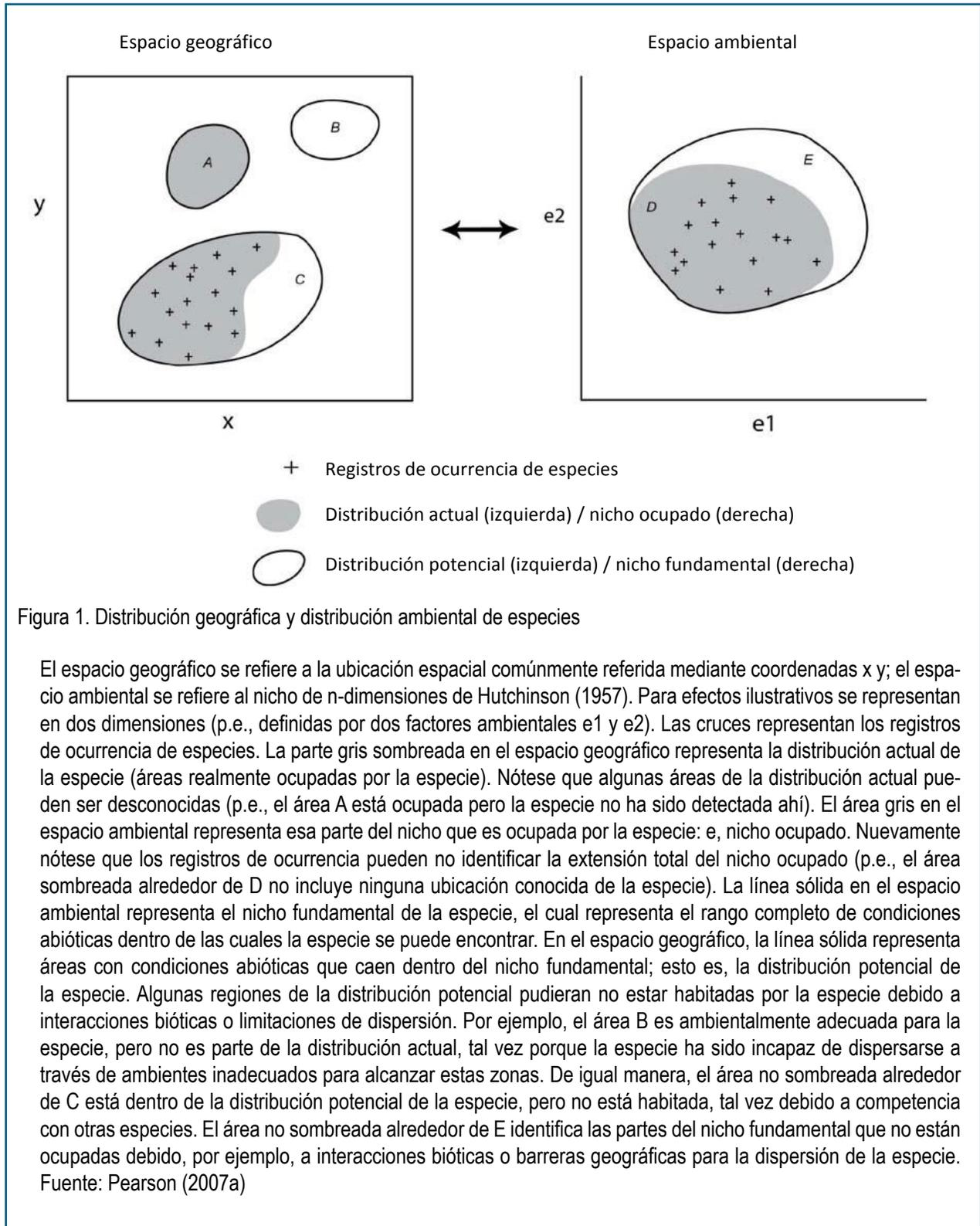
El enfoque de modelos de nicho ecológico se sustenta en la teoría de nicho ecológico (Pearson y Dawson 2003). Hutchinson (1957) define el nicho ecológico como las condiciones ambientales

dentro de las cuales una especie puede sobrevivir y crecer. La autora define el concepto de nicho fundamental como una formalización abstracta de nicho ecológico, el cual podría definir las propiedades ecológicas de una especie. Pearson (2007a) explica las relación entre distribución hipotética de una especie en un espacio geográfico y en un espacio ambiental (Figura 1).

En teoría, los modelos de nicho ecológico consideran el clima como el factor más importante en la distribución natural y potencial de una especie determinada. Esto implica que ni los factores edáficos ni la interacción entre tales especies forman parte de tales modelos.

**Cuadro 1. Algoritmos usados por modelos de nicho ecológico**

Algoritmo	Abreviatura	Software	Versión	Autor / Desarrolladores
Maximum Entropy Method	MAXENT	MAXENT	3.3.1	M. Dudik / S. Phillips, R. Schapire
Generalized Linear Models	GLM	BIOMOD	2.9.2	S. Davies
Generalized Additive Models	GAM	BIOMOD	1.0.1	T. Hastie
Generalized Boosted Models / Boosted Regression Trees	GBM/BRT	BIOMOD	2.0-1	G. Ridgewab Kriegler, H. Southworth, D. Edwards
Classification Tree Analysis	CTA	BIOMOD	3.1-45	-
Artificial Neural Networks	ANN	BIOMOD	7.2-48	-
Surface Range Envelope	SRE	BIOMOD	1.1-0	W. Thuiller, B. Lafourcade
Mixture Discriminant Analysis	MDA	BIOMOD	0.3-4	-
Multivariate adaptive regression splines	MARS	BIOMOD	0.3-4	T. Hastie, R. Tibshirani
Random Forest	RF	BIOMOD	4.5-30	A. Liaw, M. Wiener
Bioclim	BIOCLIM	openModeller	0.2	HA. Nix / M. Muñoz
Climate Space Mode	CSM	openModeller	0.3	N. Caithness / T. Sutton, R. de Giovanni
Envelope Score	ENVSCORE	openModeller	0.1	HA. Nix / T. Sutton, C. Yesson
Environmental Distance	ENVDIST	openModeller	0.3	ME. Muñoz, R. de Giovanni, DJS. Bellini / DJS. Bellini
Genetic Algorithm for Rule-set Prediction - GARP with best subset	GARP	openModeller	3.0.1 alpha	RP. Anderson, D. Lew, D. Peterson, AT. Peterson / RS. Pereira
Supported Vector Mashines	SVM	openModeller	0.3	VN. Vapnik / R. de Giovanni, AC. Lorena



## Emisiones de GEI

El efecto de las actividades humanas en el clima depende de las emisiones antrópicas actuales y futuras de GEI; asimismo, los impactos de los cambios en el clima incidirán en el estado futuro del planeta (Arnell *et al.* 2004). Los escenarios de emisiones futuras de GEI son el resultado de la proyección del comportamiento de fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. Si bien la magnitud y la dirección de los cambios son inciertas, los modelos constituyen una herramienta apropiada para analizar de qué manera van a influir las fuerzas determinantes en las emisiones futuras de GEI, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los modelos son útiles, además, para analizar el cambio climático, evaluar sus impactos y definir iniciativas de adaptación y mitigación.

La posibilidad de que, en la realidad, las emisiones evolucionen en la forma descrita en los escenarios es incierta (IPCC 2000). Sin embargo, los expertos en modelación usan esta información para recrear condiciones de emisiones que junto con otras variables sirven para predecir el clima futuro<sup>2</sup>.

Las variables climatológicas empleadas se obtuvieron de la base de datos del programa de investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS, por sus siglas en inglés, <http://www.ccafs-climate.org>). Se seleccionó el escenario A2, con una resolución de 30 segundos. La base de datos de CCAFS contiene resultados de cuatro métodos para reducir la escala (*downscaling*) de los modelos de circulación general. La base de datos consta de cinco escenarios de emisiones de GEI, más el escenario base (que no es un escenario). En cuanto a los modelos de circulación general, CCAFS cuenta con resultados para 23 modelos<sup>3</sup>. Las variables climáticas que maneja esta base de datos son las siguientes:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Temperatura media
- Precipitación total
- Rango de temperatura diaria
- Radiación solar
- Días lluviosos
- Variables bioclimáticas

<sup>2</sup> Para mayor detalle de las variables y parámetros que se usan en los modelos de circulación general, consultar las referencias del Cuadro 2.

<sup>3</sup> Esta información se puede encontrar en formato esri-grid o ascii-grid para diversos periodos futuros. La mejor resolución es la de 30 segundos (aproximadamente 1km en el Ecuador), aunque también existen datos de menor resolución. Para mayor información y detalle consultar la página web del CCAFS.

Cuadro 2. Modelos de circulación global disponibles

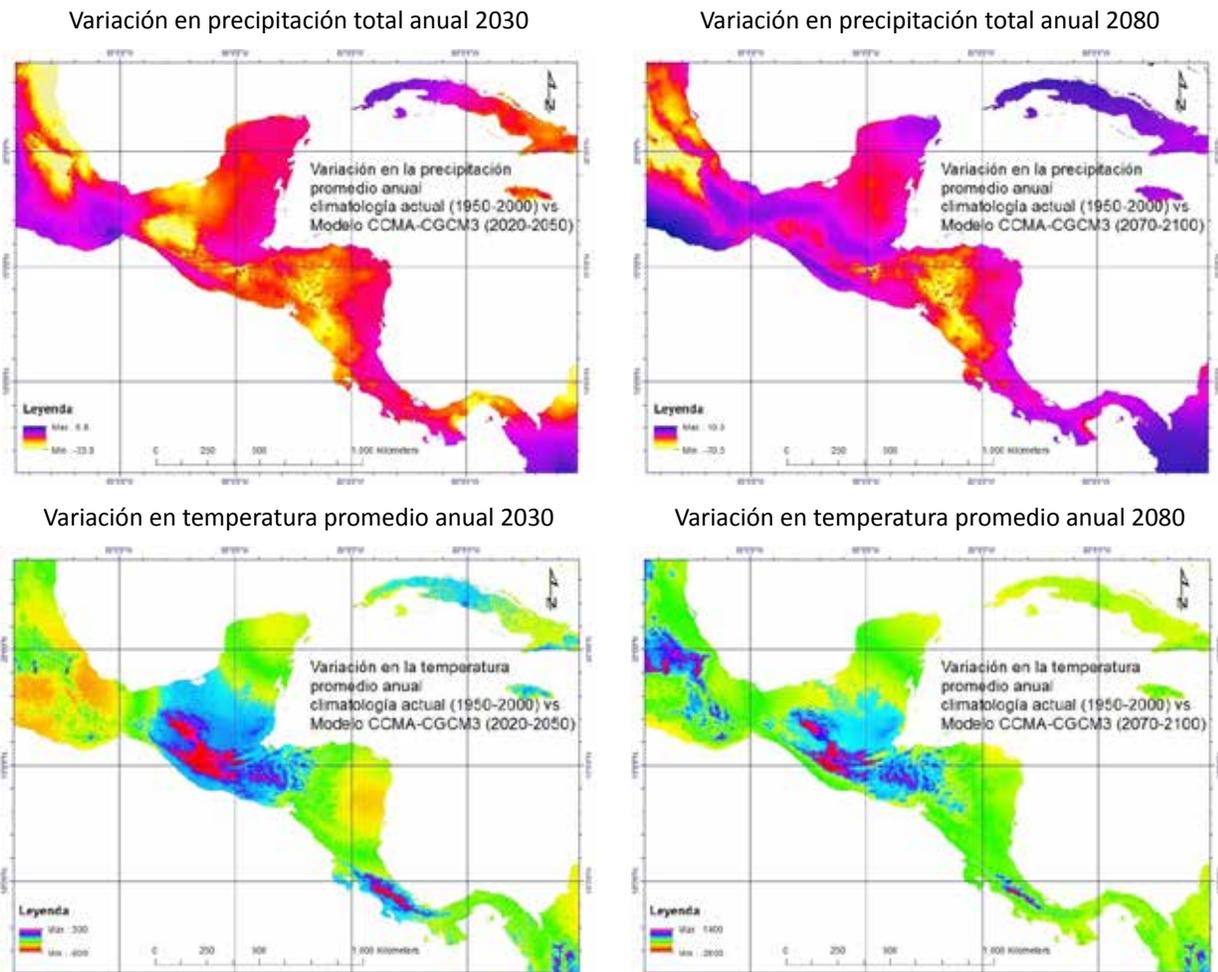
Modelo	País	Atmosfera	Océano	Referencia
BCCR-BCM2.0	Noruega	T63, L31	1.5x0.5, L35	N/A
CCMA-CGCM3.1 (T47)	Canadá	T47(3.75x3.75), L31	1.85x1.85, L29	Scinocca <i>et al.</i> 2008
CCMA-CGCM3.1 (T63)	Canadá	T63(2.8x2.8), L31	1.4x0.94, L29	Scinocca <i>et al.</i> 2008
CNRM-CM3	Francia	T63(2.8x2.8), L45	1.875x(0.5-2), L31	Salas-Melia <i>et al.</i> 2005
CSIRO-Mk3.0	Australia	T63, L18	1.875x0.84, L31	Gordon <i>et al.</i> 2002
CSIRO-Mk3.5	Australia	T63, L18	1.875x0.84, L31	Gordon <i>et al.</i> 2002
GFDL-CM2.0	USA	2.5x2.0, L24	1.0x(1/3-1), L50	Delworth <i>et al.</i> 2004
GFDL-CM2.1	USA	2.5x2.0, L24	1.0x(1/3-1), L50	Delworth <i>et al.</i> 2004
GISS-AOM	USA	4x3, L12	4x3, L16	Russell <i>et al.</i> 1995
GISS-MODEL-EH	USA	5x4, L20	5x4, L13	Schmidt <i>et al.</i> 2005
GISS-MODEL-ER	USA	5x4, L20	5x4, L13	Schmidt <i>et al.</i> 2005
IAP-FGOALS1.0-G	China	2.8x2.8, L26	1x1, L16	Yu <i>et al.</i> 2004
INGV-ECHAM4	Italia	T42, L19	2x(0.5-2), L31	Gualdi <i>et al.</i> 2006
INM-CM3.0	Rusia	5x4, L21	2.5x2, L33	Diansky <i>et al.</i> 2002
IPSL-CM4	Francia	2.5x3.75, L19	2x(1-2), L30	Marti <i>et al.</i> 2005
MIROC3.2-HIRES	Japón	T106, L56	0.28x0.19, L47	Hasumi y Emori 2004
MIROC3.2-MEDRES	Japón	T42, L20	1.4x(0.5-1.4), L43	Hasumi y Emori 2004
MIUB-ECHO-G	Alemania/Corea	T30, L19	T42, L20	Grötzner <i>et al.</i> 1996
MPI-ECHAM5	Alemania	T63, L32	1x1, L41	Jungclaus <i>et al.</i> 2005
MRI-CGCM2.3.2A	Japón	T42, L30	2.5x(0.5-2.0)	Yukimoto <i>et al.</i> 2001
NCAR-CCSM3.0	USA	T85 L26, 1.4x1.4	1x(0.27-1), L40	Collins <i>et al.</i> 2005
NCAR-PCM1	USA	T42(2.8x2.8), L18	1x(0.27-1), L40	Washington <i>et al.</i> 2000
UKMO-HADCM3	UK	3.75x2.5, L19	1.25x1.25, L20	Gordon <i>et al.</i> 2002
UKMO-HADGEM1	UK	1.875x1.25, L38	1.25x1.25, L20	Johns <i>et al.</i> 2006

Fuente: Ramírez-Villegas *et al.* (2013)

Para este trabajo se seleccionó el modelo CCMA-CGCM3, desarrollado por el Centro Canadiense para el Modelaje y Análisis Climático. La familia evolutiva A2<sup>4</sup> se caracteriza por una gran heterogeneidad basada en una orientación económica de mercado. En comparación con el escenario A1, el escenario A2 muestra un rápido crecimiento poblacional, pero un crecimiento económico más lento. El tema subyacente es la autosuficiencia y la conservación de la identidad local. El crecimiento económico se orienta regionalmente y, por ende, tanto el crecimiento del ingreso como el cambio tecnológico son diversos. Los patrones de fertilidad entre las regiones convergen lentamente, lo que resulta en un alto crecimiento de la población (IPCC 2000, Arnell *et al.* 2004).

<sup>4</sup> Ver el informe especial sobre escenarios de emisiones del Grupo de trabajo III del IPCC para una explicación detallada de las familias evolutivas (IPCC 2000).

Con el modelo CCMA-CGCM3 se esperaría que las precipitaciones totales disminuyan en la mayor parte de Centroamérica (colores de amarillo hacia rosado), mientras que en pocas zonas se experimentaría un incremento de la precipitación (tonos morados). De igual manera, la temperatura se incrementará en la zona con variaciones bastante altas (Mapa 1).



Mapa 1. Variaciones en temperatura promedio anual y precipitación anual total según el escenario A2 del Modelo CCMA-CGGM3

# Modelos de nicho ecológico

## Maxent

Maxent es un modelo que permite modelar la distribución geográfica de las especies a partir del concepto de máxima entropía desarrollado por Steven Phillips, Miro Dudik y Rob Schapire, con el apoyo de los laboratorios de investigación de AT&T, la Universidad de Princeton y el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural (Phillips *et al.* 2006). Este modelo forma parte del grupo de modelos de nicho ecológico desde hace pocos años, pero ya ha demostrado su buen desempeño, en comparación con otros métodos similares (Figura 2).

Maxent es un método de inteligencia artificial que pertenece a la categoría de modelos de nicho ecológico. Este calcula la distribución de máxima entropía<sup>5</sup> para una especie dentro de un área determinada, tipificada por valores climáticos observados en el sector o zona en la que se reportó la presencia de la especie en estudio. El producto de Maxent es un mapa de nicho climático que ofrece los valores de probabilidad para hábitats naturales adecuados para la especie (Phillips *et al.* 2006, Elith *et al.* 2011). De manera práctica, los insumos necesarios para correr el programa son un conjunto de datos que incluyen el nombre de la especie y las coordenadas (longitud y latitud) de los sitios de colecta y otro set (conjunto) de datos con las variables climatológicas que caracterizan las zonas en las cuales se hicieron las colectas. En la Figura 3 puede apreciarse la interfaz de Maxent, así como sus características principales<sup>6</sup>.

La exactitud de los nichos climáticos que predicen la distribución natural de las especies a partir de la climatología actual se somete a análisis estadísticos mediante el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) de la curva operada por el receptor (ROC, por sus siglas en inglés). La construcción de la curva ROC es un proceso repetitivo aplicado a cada umbral de idoneidad del modelo: el modelo de distribución se reclasifica en dos categorías a partir del umbral para obtener un modelo binario en el que los valores del modelo original inferiores al umbral indican ausencia y los valores iguales o superiores al umbral indican presencia. Sin embargo, Maxent usa solo datos de presencia y no de ausencia. AUC/ROC indica, para un punto de presencia y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por el modelo para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. El modelo toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación y cercanos a 0,5 cuando

<sup>5</sup> La verdadera distribución de una especie está representada como una probabilidad de distribución de  $\pi$  sobre un conjunto X de sitios en el área de estudio. Ver Phillips y Dudik (2008) para un análisis más detallado.

<sup>6</sup> El software así como documentos y tutoriales para cargar los datos de ubicación de los puntos de presencia de la especie, variables bioclimáticas y los ajustes para correr el análisis puede descargarse de <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>

el ajuste no es mejor que el obtenido por azar; esto demuestra su capacidad de discriminación (el lector interesado podrá encontrar explicaciones detalladas sobre el AUC en Phillips *et al.* 2006, Phillips y Dudik 2008, Elith *et al.* 2011).

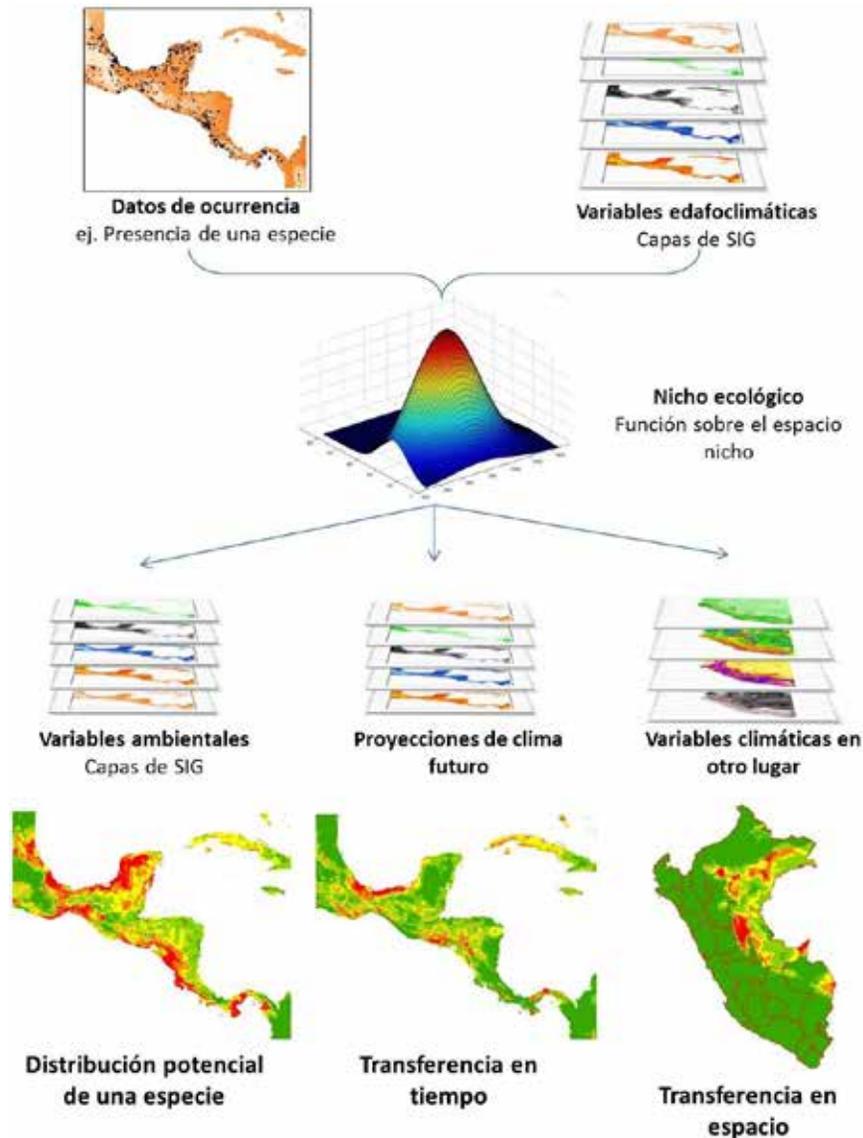


Figura 2. Diagrama de función de nicho ecológico y su aplicación para modelar la distribución potencial de una especie en el tiempo y el espacio

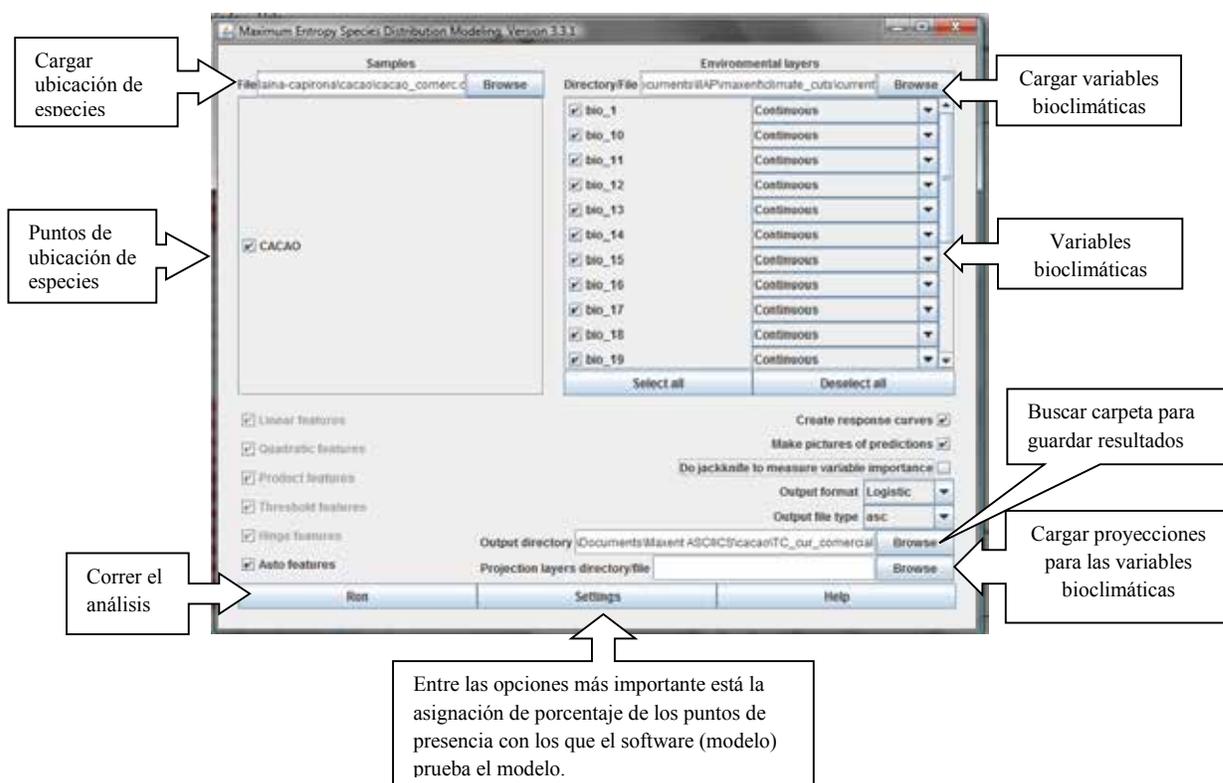


Figura 3. Interfaz de ingreso de datos a Maxent

### Recuadro 1. Cambio en la distribución de especies leñosas usadas en sistemas silvopastoriles en Centroamérica

A continuación se presenta un ejemplo práctico del uso de Maxent para analizar el impacto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies forestales usadas en SSP en Centroamérica. Para seleccionar las especies se consultó con expertos, quienes se basaron en criterios como abundancia de las especies en las parcelas, importancia económica, funciones ecológicas (ver López *et al.* 2007a, 2007b, Villanueva *et al.* 2008 para una explicación más detallada). Las especies seleccionadas fueron *Guazuma ulmifolia*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata* y *Gliricidia sepium*, todas nativas de la región.

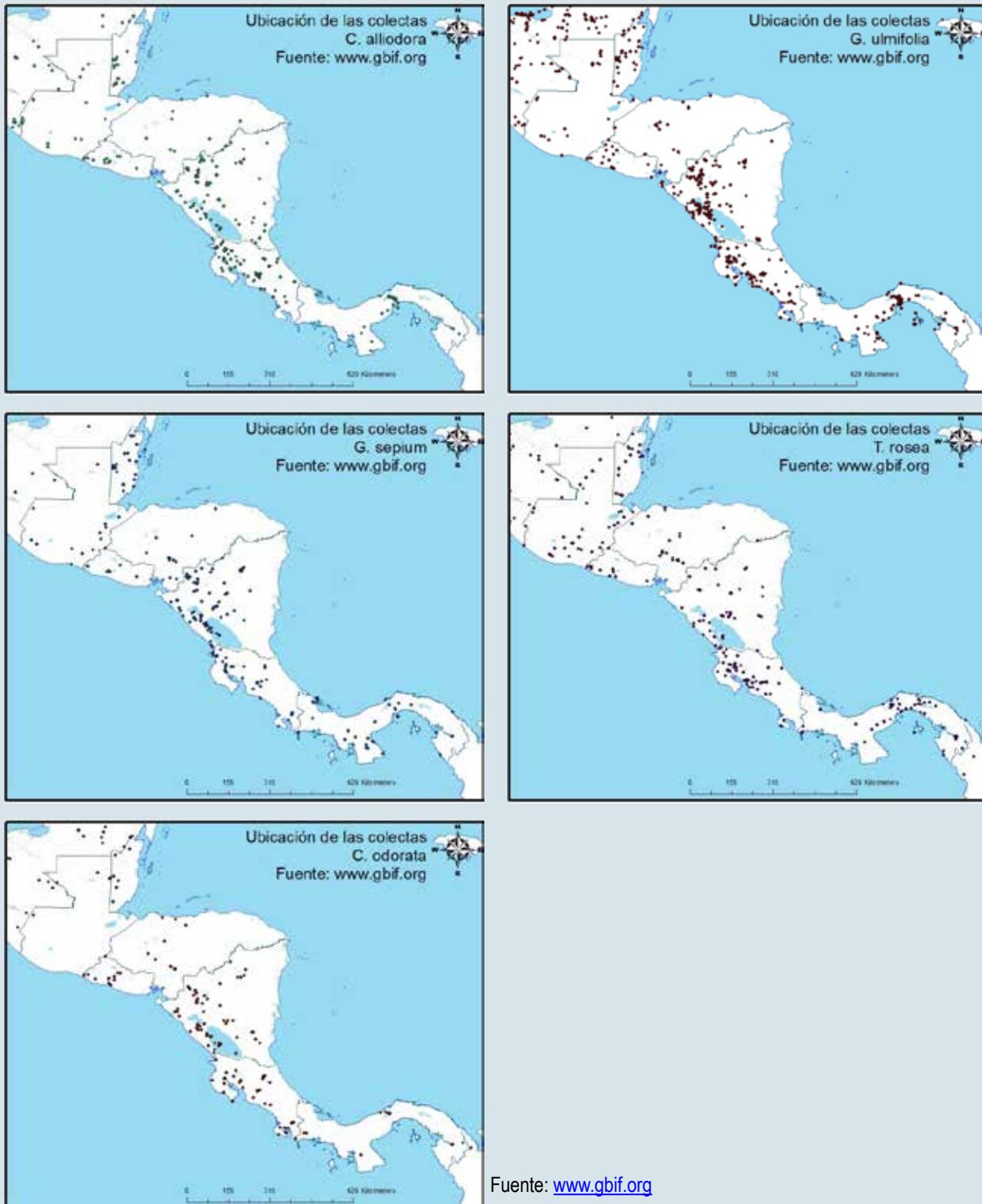
#### Insumos para el modelo

**Puntos de presencia de las especies.**- Los puntos de presencia de las cinco especies estudiadas se descargaron de la base de datos en línea de *Global Biodiversity Information Facility* ([www.gbif.org](http://www.gbif.org)). A través de este portal se tiene acceso a miles de bases de datos a nivel mundial y millones de registros de especies. Se descargó un archivo con las coordenadas de colecta de las especies de interés. Estas se trabajaron en Excel para depurar la información y eliminar lo no relevante para el análisis. Finalmente nos quedamos con un archivo con las siguientes características (ej. para *C. alliodora*):

ESPECIE	LAT	LON
<i>Cordia Alliodora</i>	-61,77	-16,62
<i>Cordia Alliodora</i>	-25,92	-56,25

Este archivo de Excel se exporta con extensión CVS, que es el formato de ingreso de los puntos de presencia de MaxEnt.

En el Mapa 2 se puede ver el detalle de los registros de ocurrencia de las especies de interés.



Fuente: [www.gbif.org](http://www.gbif.org)

Mapa 2. Registros de presencia para cinco especies leñosas usadas en sistemas silvopastoriles en la región centroamericana

**Climatología actual.**- Los datos de climatología actual provienen de la base de datos de WorldClim, la cual comprende la climatología promedio para el periodo 1950 – 2000 (a este periodo nos referiremos como 2000). Los datos fueron cortados para una extensión que abarca desde el sur de México hasta la zona noroeste de Colombia, incluyendo también algunas de las islas del Caribe. Nuestro análisis se enfoca en siete países: Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. Las variables bioclimáticas representan tendencias anuales de temperatura promedio y precipitación anual. También se puede observar estacionalidad como rangos de temperatura y precipitación y factores extremos o limitantes ambientales tales como temperatura del mes más frío y más caliente y precipitación en el trimestre más húmedo y más seco<sup>7</sup>. Los datos climáticos deben ingresarse con la extensión \*.ascii<sup>8</sup>.

**Climatología futura.**- Los datos climáticos para los horizontes 2020-2050 y 2070-2100 (al primer periodo nos referiremos como 2030 y al segundo como 2080) del modelo CCMA-CGCM3<sup>9</sup> proceden de la base de datos del programa CCAFS del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Al igual que la climatología actual, el formato de ingreso de la climatología futura es \*.ascii. A continuación se presenta una lista de las 19 variables bioclimáticas utilizadas para la predicción de distribución de especies.

BIO1 = Temperatura promedio anual

BIO2 = Rango diurno promedio (promedio mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))

BIO3 = Isotermalidad (P2/P7) (\* 100)

BIO4 = Temperatura estacional (desviación estándar \*100)

BIO5 = Temperatura máxima del mes más caliente

BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío

BIO7 = Rango de temperatura anual (P5-P6)

BIO8 = Temperatura promedio del trimestre más húmedo

BIO9 = Temperatura promedio del trimestre más seco

BIO10 = Temperatura promedio del trimestre más caliente

BIO11 = Temperatura promedio del trimestre más frío

BIO12 = Precipitación anual

BIO13 = Precipitación del mes más húmedo

BIO14 = Precipitación del mes más seco

BIO15 = Precipitación estacional (coeficiente de variación)

BIO16 = Precipitación en el trimestre más húmedo

BIO17 = Precipitación en el trimestre más seco

BIO18 = Precipitación en el trimestre más caliente

BIO19 = Precipitación en el trimestre más frío

<sup>7</sup> En <http://www.ccafs-climate.org/downloads/docs/bioclimatic-variables.pdf> se encuentra una descripción de las variables bioclimáticas; en Ramírez-Villegas y Bueno-Cabrera (2009) se detalla cómo se generan estas variables.

<sup>8</sup> Código estándar estadounidense para el intercambio de información.

<sup>9</sup> Este es uno de los modelos más usados para la predicción de distribución de especies (Zonneveld *et al.* 2009ab).

**Base de datos de suelos de Soterlac.**- Los modelos de nicho ecológico parten de la premisa de que las variables climáticas condicionan la adecuación de una zona para una especie determinada. Sin embargo, Maxent permite el ingreso de variables edáficas. Soterlac (*Development of a soil and terrain database for Latin America and the Caribbean*) es una base espacial georreferenciada que se vincula a una base de datos con parámetros que tipifican las condiciones edáficas para América Latina y el Caribe (Dijkshoorn *et al.* 2005), la cual funciona con un formato espacial vectorial con polígonos a los que se les asignan atributos. Por separado, se prepararon *shapefiles*<sup>10</sup> para pH, textura y drenaje que luego fueron convertidos a formatos *raster*<sup>11</sup> con la misma resolución de la base de datos de clima y, finalmente, a \*.ascii.

**Supuestos metodológicos y alcances.**- Un supuesto importante de esta metodología es que, a futuro, las condiciones de suelo permanecerán constantes, por lo que solo se medirá el impacto del cambio en los patrones de temperatura y precipitación. Asimismo, el proceso de modelación con Maxent no permite incluir mejoras en la capacidad adaptativa de las especies mediante prácticas silviculturales o de infraestructura. Tampoco se toma en cuenta la capacidad autónoma de una especie para adaptarse al medio. En cuanto a las incertidumbres, debemos tener en cuenta que la modelación es un proceso de abstracción de la realidad; en tal sentido, los resultados de tales procesos deben ser considerados como herramientas útiles para la toma de decisiones, pero no como verdades absolutas.

### EcoCrop (Diva-GIS)

EcoCrop es un modelo *mecanicista* desarrollado a partir de la base de datos de requerimientos ecológicos de la FAO (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/ClimateChange/EcoCropFB/>). Este *software* fue creado por el CIAT con el apoyo de Bioversity Internacional y el Centro Internacional de la Papa (CIP) y forma parte de Diva-GIS, un *software* que emplea el sistema de información geográfica para el análisis de datos de distribución de especies (Ramírez-Villegas *et al.* 2013, Hijmans *et al.* 2005). Mediante umbrales de precipitación y temperatura, EcoCrop evalúa la pertinencia de cierto lugar para albergar una determinada especie vegetal; el *software* usa la base de datos de climatología de WorldClim.

Con EcoCrop es posible:

- Identificar un cultivo adecuado para un medio ambiente específico.
- Identificar un cultivo con un hábito de crecimiento específico.
- Identificar cultivos para un uso definido.
- Observar los requerimientos ambientales y usos de un cultivo dado.

<sup>10</sup> Un *shapefile* es un formato vectorial de almacenamiento digital en donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados.

<sup>11</sup> Los datos *raster* son cualquier tipo de imagen digital representada en mallas; el espacio se divide en celdas regulares, cada una de ellas representa un único valor.

El modelo requiere el ingreso de los siguientes parámetros para un año de crecimiento:

Abreviatura	Parámetro	Unidad
Tkill	Temperatura a la cual el cultivo muere	°C
Tmin	Temperatura mínima para el crecimiento del cultivo	°C
Topmin	Temperatura óptima mínima para el crecimiento del cultivo	°C
Topmax	Temperatura óptima máxima para el crecimiento del cultivo	
Tmax	Temperatura máxima que el cultivo soporta	°C
Rmin	Cantidad mínima de lluvia para el crecimiento del cultivo	mm
Ropmin	Cantidad óptima mínima de lluvia para el crecimiento del cultivo	mm
Ropmax	Cantidad óptima máxima de lluvia para el crecimiento del cultivo	mm
Rmax	Cantidad máxima de lluvia para el crecimiento del cultivo	mm
Gmin	Periodo de crecimiento mínimo	días
Gmax	Periodo de crecimiento máximo	días

En la página de EcoCrop en la internet (<http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>) se encuentra una relación de más de 2 500 especies vegetales con sus respectivos requerimientos de precipitación y temperatura. Asimismo, la versión de EcoCrop de Diva-GIS incorpora una relación de 1 710 especies con sus respectivos parámetros climáticos, lo que facilita el uso de esta herramienta. Si la especie de interés no se encuentra en la base de datos, sus parámetros pueden ser introducidos de manera manual al programa.

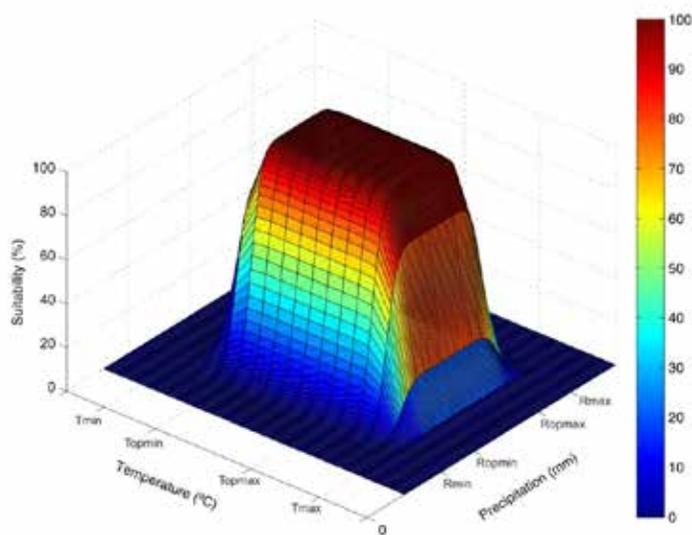


Figura 4. Modelo mecanicista EcoCrop

Fuente: Ramírez-Villegas *et al.* (2013)

## Recuadro 2. Funcionamiento de EcoCrop

Para iniciar el trabajo con EcoCrop es necesario dar antes un paso previo debido a que los datos climatológicos deben ser cargados en un formato especial con extensión \*.clm

Una vez que ya tenemos nuestra base de datos de climatología actual y futura con el formato o extensión \*.clm, se procede a cargarla en Diva-GIS. En la página inicial de Diva-GIS, diríjase al menú **Tools** y haga clic en **Options**; así se desplegará la ventana que se muestra en la Figura 5. Haga clic ahora en la pestaña **Climate** y busque el folder en el que se encuentran los datos de climatología actual. Para proyectar la distribución bajo condiciones de climatología futura se sigue el mismo procedimiento.

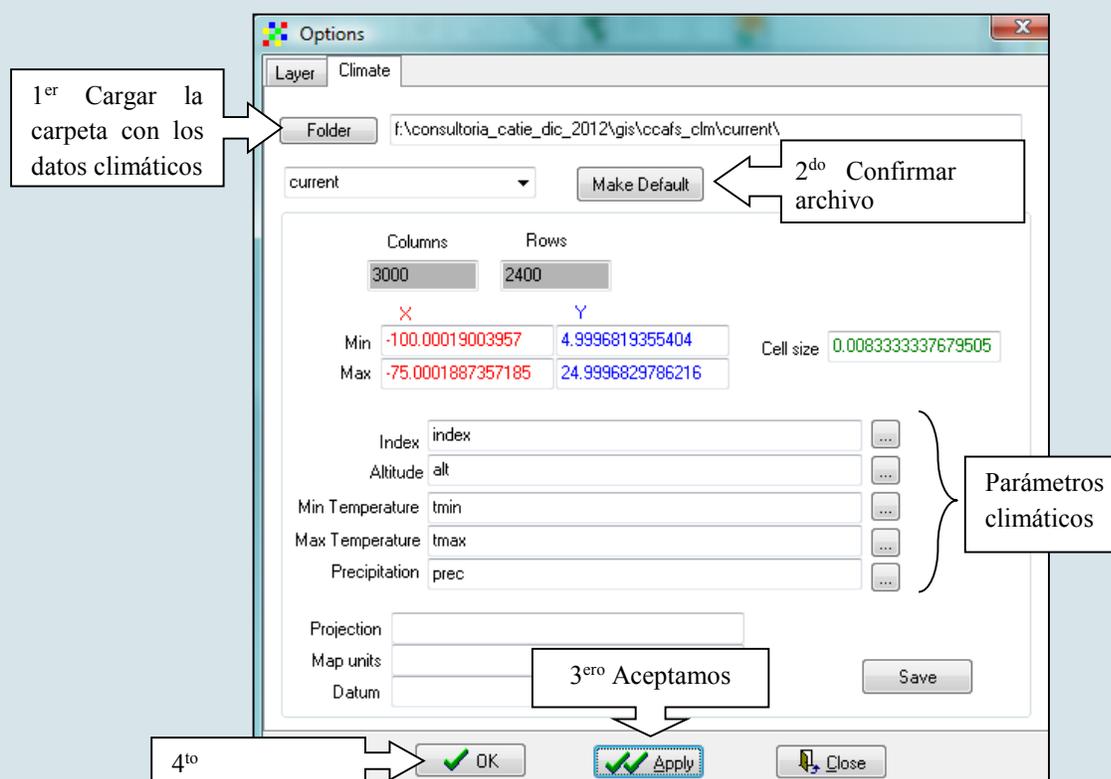


Figura 5. Ventana para cargar datos climatológicos en Diva-GIS

Ahora ya está listo para usar EcoCrop. Haga clic en el ícono que se encuentra en el menú principal **Modeling**; se desplegará una ventana como la que se muestra en la Figura 5. Esa ventana muestra tres pestañas:

En la primera (**Select**) se selecciona la especie que nos interesa modelar.

En la segunda pestaña (**Parameters**) se verifican los parámetros climáticos de la especie de interés (base de datos de la FAO). Si la especie que queremos modelar no se encuentra dentro de la lista de la FAO (pestaña **Select**), ingrese en forma manual los parámetros según lo encontrado en la literatura y el conocimiento de la especie<sup>12</sup>.

En la tercera pestaña (**Predict**) se ajusta la extensión geográfica de la superficie que queremos modelar, a partir de la extensión de las variables climáticas. Verifique que la predicción se hará con base en la precipitación y la temperatura.

<sup>12</sup> Mucha información de referencia puede encontrarse en los diccionarios como <http://www.gbif.org/>

La versión actual de EcoCrop permite escoger el método o el algoritmo de predicción (factor limitante o interacción). Finalmente, es posible seleccionar la carpeta en la cual se guardan los resultados y agregar los resultados al mapa de Diva-GIS.

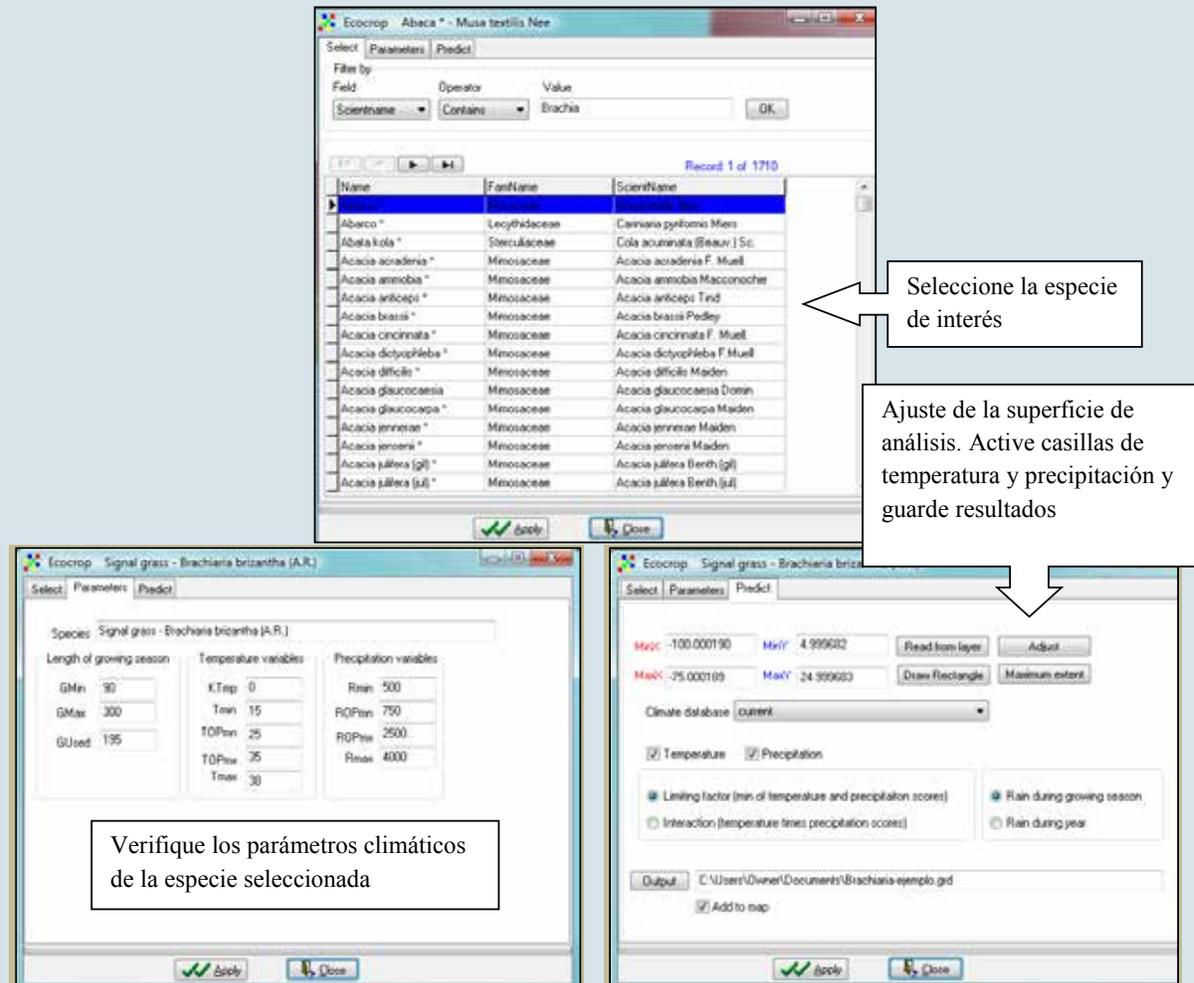


Figura 6. Ventanas de EcoCrop

# Distribución actual y futura de las especies leñosas y gramíneas evaluadas

A continuación se detallan los resultados de modelación de la distribución (adecuación) actual y futura de cinco especies leñosas y dos gramíneas usadas en sistemas silvopastoriles en Centroamérica. Para la modelación se usaron dos modelos de nicho ecológico: Maxent y EcoCrop. Las especies leñosas evaluadas fueron *Guazuma ulmifolia*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliodora*, *Cedrela odorata* y *Gliricidia sepium* y las gramíneas *Brachiaria brizantha* y *Paspalum notatum*. Para diferenciar entre los niveles de adecuación de las especies a las condiciones climáticas actuales y futuras, en los mapas se han usado las siguientes categorías:

- El color verde intenso representa las áreas inapropiadas para el desarrollo de la especie (probabilidad de adecuación inferior al 25%).
- El color verde claro representa las zonas con condiciones marginales (25% a 50% de adecuación).
- El color anaranjado representa las zonas con condiciones aptas (50 a 80% de adecuación).
- El color rojo representa las zonas con condiciones óptimas (80% a 100% de adecuación).

## ***Cordia alliodora***

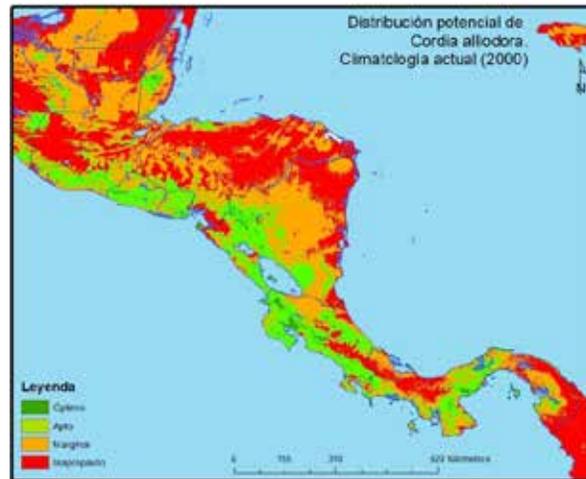
A nivel regional, Costa Rica es el país que posee la mayor superficie con condiciones óptimas para el desarrollo de *C. alliodora* (333 510 ha). Esta cifra es poco más del doble de la de Panamá, el segundo país con mayor superficie para el desarrollo óptimo de la especie, en tanto que Honduras solo posee 672 ha (Cuadro 3). Si se toman en cuenta las condiciones aptas y óptimas, Nicaragua y Costa Rica serían los países con mayores superficies con condiciones favorables<sup>13</sup> para el desarrollo de esta especie.

<sup>13</sup> Superficie con índice de adecuación mayor a 0,5.

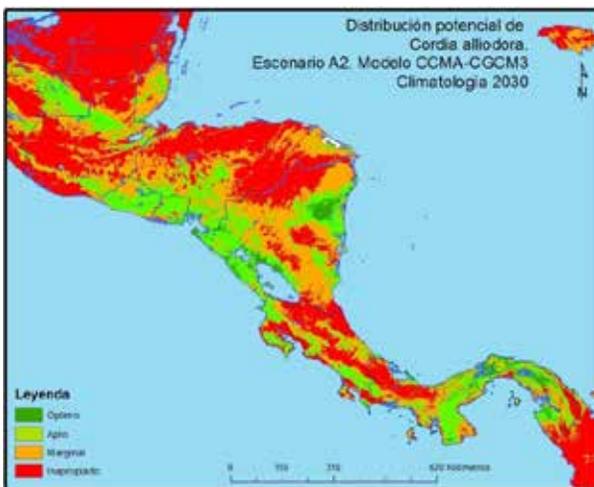
**Cuadro 3. Condiciones potenciales para el desarrollo de *Cordia alliodora* en siete países centroamericanos**

País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	Hectáreas			
Belice	870 234,30	1 090 755,18	296 798,99	38 811,53
Costa Rica	805 028,56	1 294 137,67	2 677 323,44	333 510,33
El Salvador	83 464,27	623 504,69	1 362 519,89	34 611,15
Guatemala	4 637 299,51	4 730 218,11	1 496 092,04	25 790,35
Honduras	6 405 739,60	4 194 417,39	648 370,95	672,06
Nicaragua	3 261 807,13	6 557 888,29	2 978 826,86	150 877,72
Panamá	2 741 402,22	3 127 520,38	1 798 267,51	152 809,89

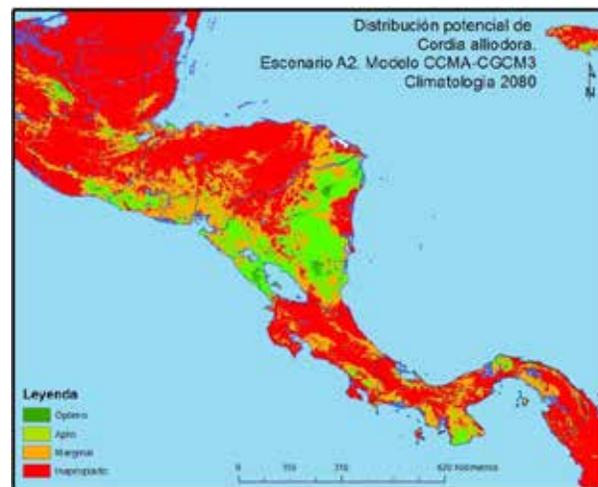
Es innegable que el cambio climático va a tener impactos positivos y negativos en la distribución de *C. alliodora*. Las nuevas zonas con condiciones inapropiadas, marginales, aptas y óptimas bajo el modelo CCMA-CGCM3 se muestran en el Mapa 3. El Mapa 4 muestra una comparación entre el escenario base y las proyecciones a futuro; se puede distinguir el tipo de cambio (p.e. de apto a óptimo, de inapropiado a apto...), así como la dirección de los cambios probables (positivos o negativos).



Climatología actual



Periodo 2030



Periodo 2080

Mapa 3. Distribución actual y futura de *Cordia alliodora* en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Durante el primer periodo de análisis (2030), el 50,2% del área de interés no presentaría cambios en sus condiciones climatológicas con respecto al escenario base para el desarrollo de *C. alliodora*. Sin embargo, para el segundo periodo (2080), más de la mitad del área de estudio habrá experimentado algún tipo de cambio.

Entre los cambios importantes en el primer periodo se destaca el mejoramiento de las condiciones climáticas en el 7,84% de la superficie en estudio, que cambiaría de inapropiado a marginal. En esta misma dirección, casi el 7,7% de la superficie cambiaría sus condiciones de marginal a apto.

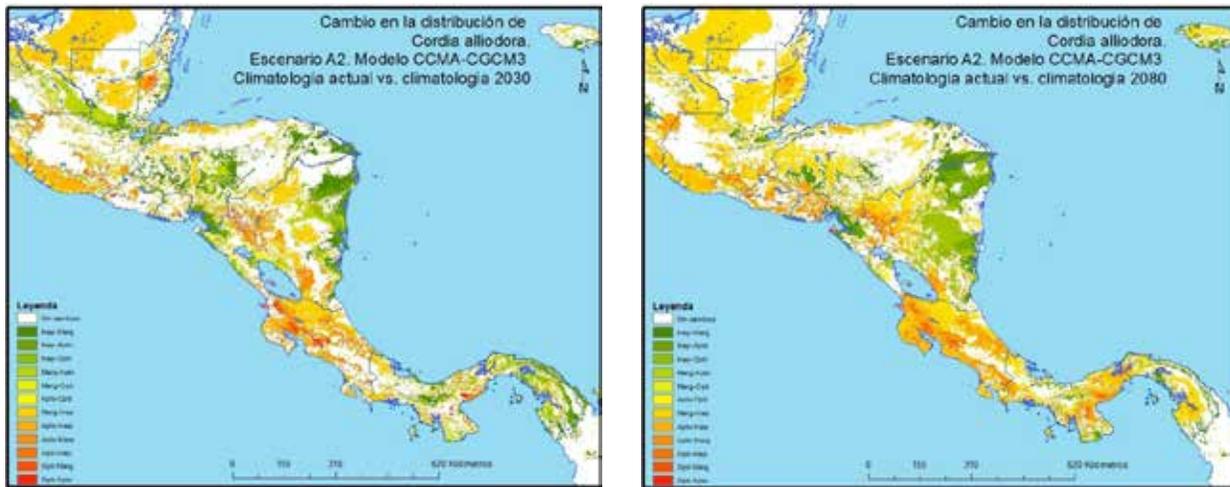
Por el contrario, casi el 26,9% de la superficie experimentarían algún tipo de cambio negativo; por ejemplo, el 14,4% de la superficie en estudio cambiaría de marginal a inapropiado y el 8,2% pasaría de apto a marginal.

Durante el periodo de análisis 2080, aproximadamente el 33% de la superficie en estudio experimentarían algún tipo de cambio positivo; así, el 16,3% pasará de apto a óptimo. Sin embargo, el 25% de la superficie de Centroamérica sufrirá algún tipo de cambio negativo: 12,1% de marginal a inapropiado, 3,9% de apto a marginal, entre otros cambios (Mapa 4).

Al analizar los cambios por país, se evidencia que para el primer periodo de análisis Belice, Costa Rica, El Salvador y Guatemala tendrán saldos negativos en las zonas con condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de *C. alliodora* y en las zonas en donde la especie tiene limitaciones climáticas. El caso de Costa Rica es el más llamativo debido a que el 58% de las zonas que actualmente muestran condiciones favorables, experimentarían algún tipo de cambio negativo hacia mediados del siglo. Panamá, Honduras y Nicaragua mostrarían mayores cambios positivos. Hacia finales de siglo, Costa Rica, El Salvador y Panamá se verían afectados por cambios negativos en las zonas con condiciones favorables para *C. alliodora*; en el resto de los países mejorarían las condiciones de adecuación para el crecimiento y desarrollo del laurel (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Tipo de cambios esperados en la distribución de *Cordia alliodora* por país**

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2030 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	58,3	39,2	67,1	56,6	59,8	41,9	44,1
Positivos	14,9	2,1	15,1	12,1	25,5	30,9	34,8
Negativos	26,8	58,7	17,8	31,3	14,7	27,2	21,0
	Escenario base vs. proyecciones 2080 (%)						
Sin cambios	39,7	19,2	45,4	52,2	57,4	33,1	36,4
Positivos	44,6	23,9	11,0	36,8	37,7	41,9	14,8
Negativos	15,7	57,0	43,6	11,0	4,8	25,0	48,9



Escenario base vs.proyecciones 2030

Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 4. Distribución de *Cordia alliodora*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

### Guazuma ulmifolia

A nivel regional, Panamá es el país que cuenta con la mayor superficie en condiciones óptimas para el desarrollo de *G. ulmifolia* seguido de Nicaragua y Costa Rica, en tanto que Guatemala es el menos favorecido (Cuadro 5). Nicaragua, con poco menos de 3 millones de hectáreas, y Panamá, con aproximadamente 2,5 millones de hectáreas, son los países con mayor superficie favorable (condiciones aptas y óptimas) para el desarrollo de esta especie.

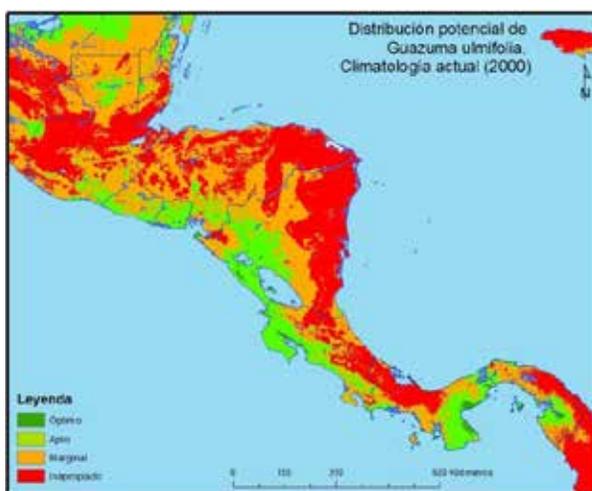
**Cuadro 5. Condiciones potenciales para el desarrollo de *Guazuma ulmifolia* en siete países centroamericanos**

País	ha			
	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
Belice	707 931,55	1 207 441,79	380 554,60	672,06
Costa Rica	1 493 303,14	1 731 145,41	1 772 141,14	113 410,31
El Salvador	72 039,23	957 015,02	1 072 441,51	2 604,24
Guatemala	4 496 754,73	5 342 969,82	1 048 919,38	756,07
Honduras	5 827 767,04	4 876 979,45	540 505,15	3 948,36
Nicaragua	5 482 885,09	4 469 458,40	2 874 993,42	122 063,10
Panamá	2 864 053,37	2 447 142,51	2 253 168,87	255 635,24

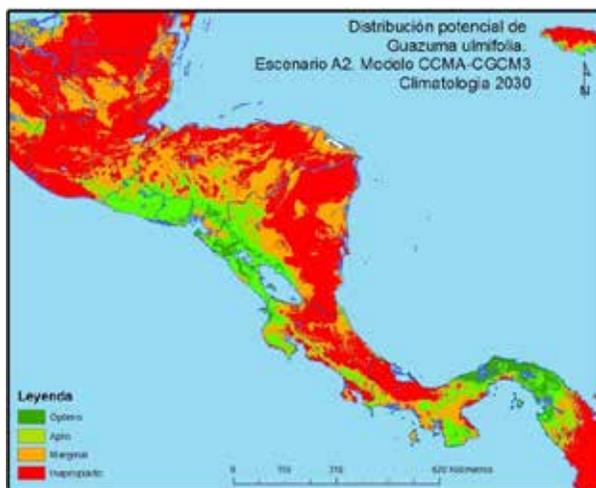
El cambio climático tendrá impactos positivos y negativos en la distribución de *G. ulmifolia*. Las nuevas zonas con condiciones inapropiadas, marginales, aptas y óptimas bajo el modelo CCMA-CGCM3 pueden verse en el Mapa 5. El Mapa 6 muestra la comparación entre el escenario base y las proyecciones a futuro; se puede distinguir el tipo de cambio (p.e. de apto a óptimo, de inapropiado

a apto...), así como la dirección de los cambios probables (positivos o negativos).

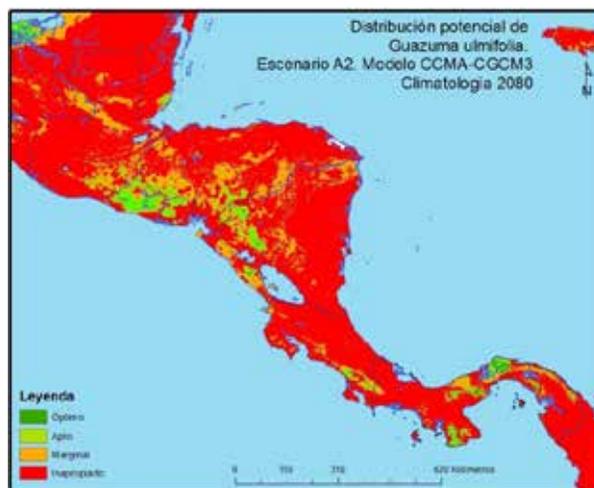
Durante el primer periodo de análisis (2030), el 56,1% del área de interés no presentaría cambios en las condiciones climatológicas apropiadas para el desarrollo de *G. ulmifolia*, con respecto al escenario base. Sin embargo, el 24,26% de la superficie en estudio sufriría algún tipo de cambio negativo: el 15,5% del área cambiaría de condición marginal a inapropiado y el 6,35% cambiaría de apto a marginal. En el 18,9% de la superficie en estudio se darían cambios positivos: de inapropiado a marginal en el 7,9% de la superficie y de marginal a apto en el 6,5% del área.



Climatología actual



Periodo 2030



Periodo 2080

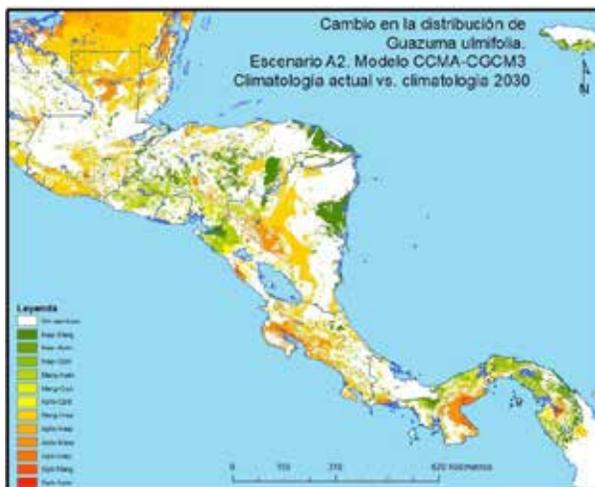
Mapa 5. Distribución actual y futura de *Guazuma ulmifolia* en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Durante el periodo de análisis 2080, una extensión equivalente al 45,1% del territorio de los siete países en estudio mantendría las mismas condiciones con respecto al escenario base. Sin embargo, el 47,7% del territorio sufriría algún tipo de cambio negativo y tan solo en el 7,3% ocurrirían cambios positivos. Entre los cambios negativos se destaca el paso de marginal a inapropiado en el 29% del territorio y de apto a inapropiado en el 13,2%. Los cambios positivos se darían en el 3,8% de la superficie, que cambiaría de inapropiado a marginal y en el 2,5% cambiaría de marginal a apto.

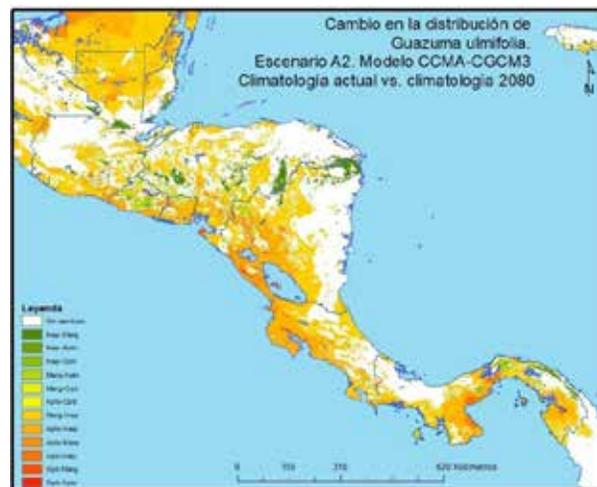
Al comparar el periodo actual con el horizonte 2030, las condiciones para el desarrollo y normal crecimiento de *G. ulmifolia* en Panamá, Honduras y El Salvador tendrían cambios positivos mayores a los cambios negativos. Lo contrario ocurrirá en Belice, Costa Rica, Guatemala y Nicaragua. Hacia finales del siglo XXI, en todos los países del istmo los cambios negativos serán mucho mayores que los cambios positivos (Cuadro 6).

**Cuadro 6. Tipos de cambios esperados en la distribución de *Guazuma ulmifolia* por país**

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2030 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	48,4	53,3	55,5	59,7	62,4	59,7	42,4
Positivos	2,8	6,7	42,3	4,1	26,9	18,4	37,1
Negativos	48,9	40,0	2,2	36,2	10,7	21,9	20,5
Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2080 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	27,6	32,0	24,9	49,5	59,1	46,1	36,5
Positivos	6,1	1,6	27,0	3,0	11,0	5,7	9,6
Negativos	66,3	66,5	48,1	47,5	29,9	48,2	53,9



Escenario base vs. proyecciones 2030



Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 6. Comparación en la distribución de *Guazuma ulmifolia*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

### **Tabebuia rosea**

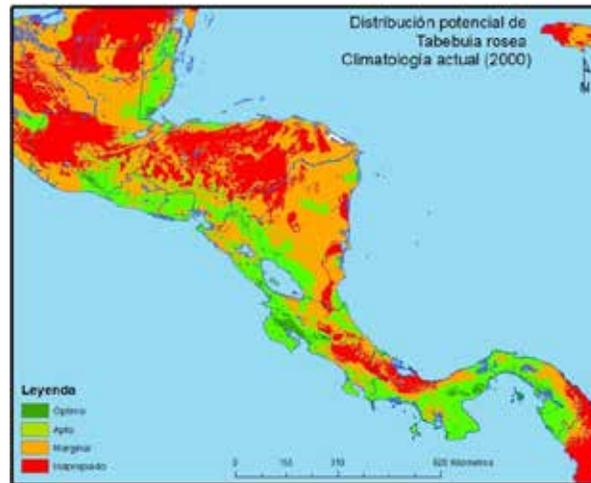
Según el escenario actual, Panamá y Costa Rica cuentan con la mayor superficie bajo condiciones óptimas para el crecimiento de *T. rosea*, en tanto que Honduras es el que tiene la menor extensión (Cuadro 7). Asimismo, si se juntan las áreas catalogadas como aptas y óptimas, Panamá y Nicaragua son los países con mayor superficie bajo condiciones favorables (cerca de 4,5 millones y 3,3 millones ha respectivamente). De otro lado, Honduras y Guatemala son los países con mayor superficie inapropiada para el crecimiento y desarrollo de la especie (Cuadro 7 y Mapa 7).

**Cuadro 7. Condiciones potenciales para el desarrollo de *Tabebuia rosea* en siete países centroamericanos**

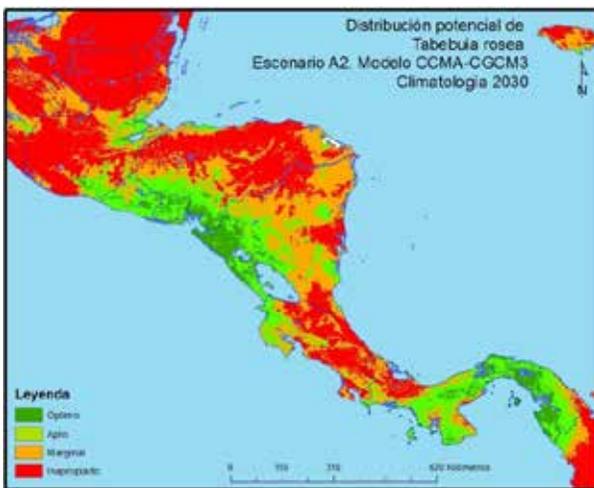
País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	ha			
Belice	108 369,03	919 547,61	1 192 992,48	75 690,88
Costa Rica	815 277,49	1 715 435,98	2 137 994,40	441 292,13
El Salvador	57 001,86	700 623,71	1 324 044,39	22 430,04
Guatemala	4 040 677,26	5 263 078,56	1 469 881,65	115 762,53
Honduras	5 560 454,74	4 700 059,36	971 128,30	17 557,60
Nicaragua	1 478 492,98	8 122 698,58	3 182 293,36	165 915,09
Panamá	1 403 076,53	1 893 112,14	4 003 636,04	520 175,30

Al comparar las condiciones de adecuación actual con los cambios climáticos proyectados para el periodo 2030, se aprecia que poco menos del 50% de la superficie bajo estudio mantendría las mismas categorías de adecuación para *T. rosea*. Sin embargo, el 20,7% experimentaría algún tipo de cambio positivo principalmente de marginal a apto (7,63%). Los cambios negativos ocurrirían en el 29,7% del territorio de la región; el paso de zonas marginales a inapropiadas (17,4%) sería el cambio más destacado durante este periodo.

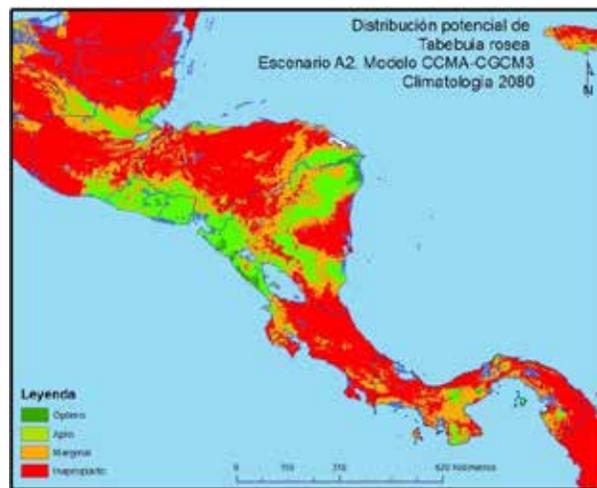
Hacia finales del siglo (alrededor del 2080) se esperaría que solo el 37,6% del territorio mantenga las mismas categorías de adecuación que en el periodo actual; sin embargo, a diferencia del periodo anterior, los cambios positivos serían mayores que los cambios negativos (32,4% contra 29,9%); el 17,2% de superficie pasaría de condiciones aptas a óptimas. El principal cambio negativo sería el paso de zonas marginales a inapropiadas (13,5%).



Climatología actual



Periodo 2030



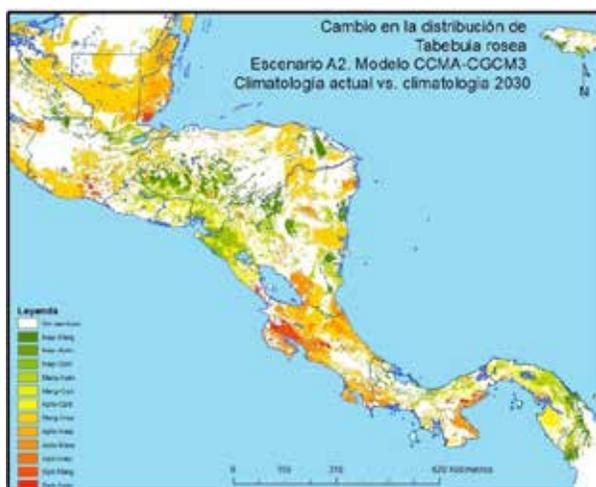
Periodo 2080

Mapa 7. Distribución actual y futura de *Tabebuia rosea* en la región centroamericana, según la climatología de 2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

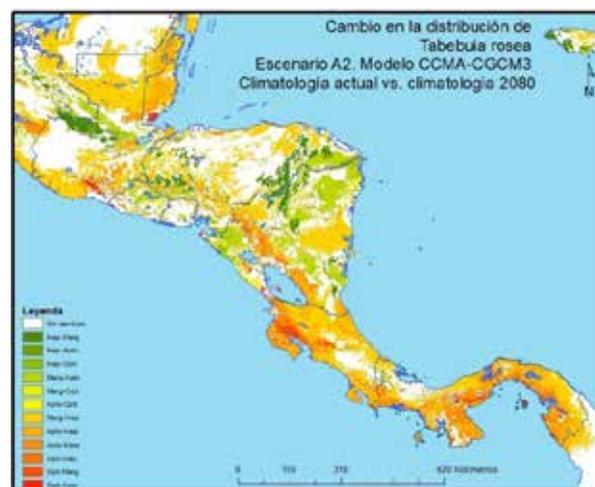
Hacia mediados de siglo se esperaría que Costa Rica sufra cambios negativos importantes en sus condiciones de adecuación para el desarrollo y crecimiento de *T. rosea* (62,8%). El Salvador, Panamá, Honduras y Nicaragua tendrían saldos favorables entre cambios positivos y negativos. Durante el segundo periodo de análisis, Honduras, Guatemala y el Salvador tendrían cambios positivos mayores a los cambios negativos, en tanto que el resto de países, principalmente Panamá, se verían seriamente afectados por algún tipo de cambio negativo (Cuadro 8 y Mapa 8).

**Cuadro 8. Tipos de cambios esperados en la distribución de *Tabebuia rosea* por país**

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2030 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	12,1	35,5	57,0	53,0	58,8	50,3	48,6
Positivos	1,6	1,7	40,5	7,6	24,6	28,3	33,7
Negativos	86,3	62,8	2,5	39,4	16,6	21,4	17,7
Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2080 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	10,0	17,7	60,7	46,3	53,8	36,2	19,7
Positivos	37,8	32,6	28,9	43,8	41,5	31,5	4,6
Negativos	52,1	49,8	10,4	10,0	4,7	32,3	75,8



Escenario base vs. proyecciones 2030



Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 8. Distribución de *Tabebuia rosea*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

### ***Gliricidia sepium***

Los resultados muestran que, en la actualidad, en Belice no hay zonas en las cuales *G. sepium* alcance su máximo desempeño. En la categoría compuesta de condiciones favorables (aptas y óptimas), Nicaragua es, de lejos, el país con mayor superficie (4,8 millones ha), seguido por Panamá (2,9 millones ha) y Costa Rica (2,4 millones ha) (Cuadro 9).

**Cuadro 9. Condiciones potenciales para el desarrollo de *Gliricidia sepium* en siete países centroamericanos**

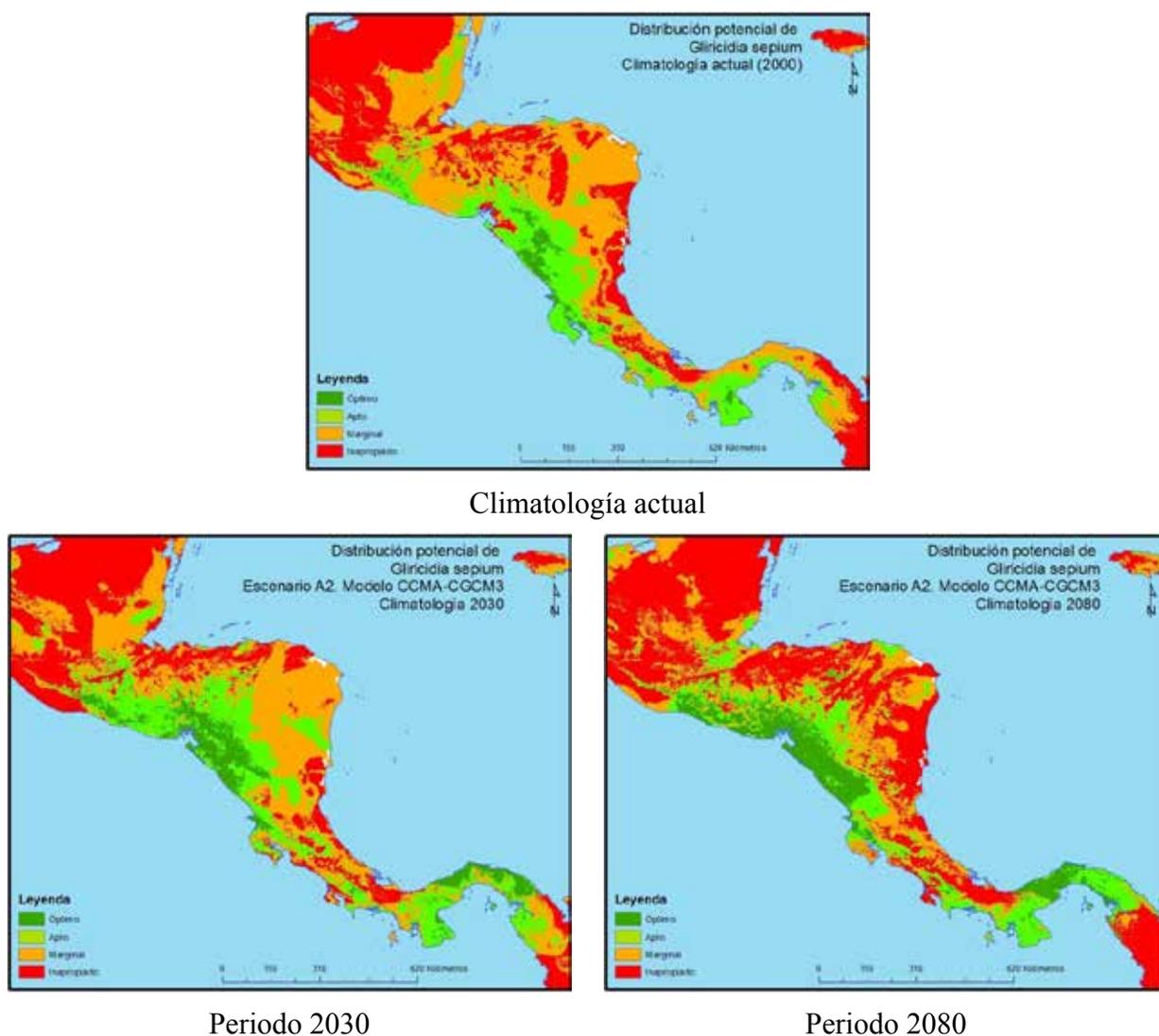
País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	ha			
Belice	211 950,45	1 658 898,84	425 750,71	0,00
Costa Rica	961 450,78	1 772 477,17	2 078 348,98	297 723,07
El Salvador	64 898,58	1 328 244,77	691 886,91	19 069,73
Guatemala	4 330 419,61	4 937 380,94	1 474 082,03	147 517,41
Honduras	3 611 729,54	6 609 384,97	996 078,57	32 006,91
Nicaragua	2 352 424,44	5 798 207,22	3 766 398,47	1 032 369,87
Panamá	1 639 642,04	3 294 275,54	2 754 526,46	131 555,96

Para *G. sepium*, los cambios en los patrones de temperatura y precipitación causarían cambios positivos marcadamente mayores que los cambios negativos; no obstante, los patrones climáticos a futuro afectarían las categorías de adecuación climática para la especie en el territorio centroamericano. El reacomodo de las categorías para los horizontes temporales del 2030 y 2080 se muestra en el Mapa 9.

Durante el periodo de comparación (2030), el 54% de la superficie centroamericana mantendría las mismas categorías de adecuación con respecto al periodo base. En el 28,4% de la superficie de la región ocurrirían cambios positivos, mientras que el 16,5% se vería afectado de manera negativa. Los cambios más importantes en cada una de estas categorías serían el paso de condiciones marginales a aptas en el 11,9% de la superficie, y de marginales a inapropiadas en el 8,1% (Mapa 10).

Para el segundo periodo de análisis (2080), se esperaría que el 45,6% del territorio mantenga las mismas categorías de adecuación del periodo actual, así como la tendencia al incremento de los cambios positivos (37,8% contra 16,2%). Los cambios positivos serían favorecidos básicamente por el paso de condiciones aptas a óptimas en el 17,3% de la superficie; el principal cambio negativo sería el paso de zonas marginales a inapropiadas (8,5%).

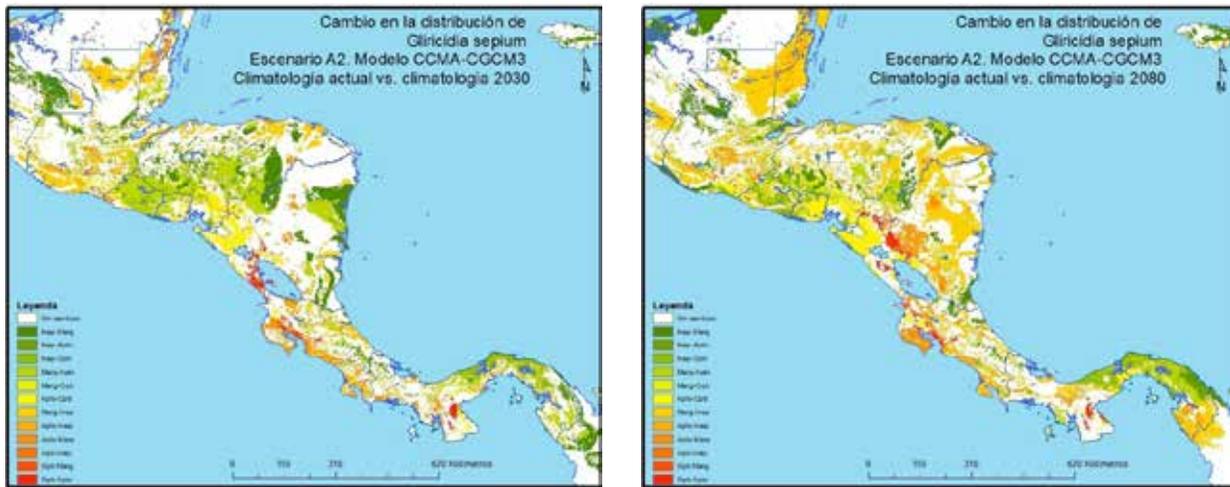
*G. sepium* es una de las especies cuya distribución potencial se vería favorecida por efecto del cambio climático. A nivel regional, los cambios positivos serían mayores que los cambios negativos (28% vs. 16%); sin embargo, Belice, Guatemala y principalmente Costa Rica sufrirían cambios negativos mayores a los cambios positivos. Hasta finales de siglo se mantendría esta tendencia al incremento de las áreas favorables para el desarrollo de *G. sepium* (Cuadro 10 y Mapa 10).



Mapa 9. Distribución actual y futura de *Gliricidia sepium* en la región centroamericana, según climatología 1950-2000 y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Cuadro 10. Tipos de cambios esperados en la distribución de *Gliricidia sepium* por país

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2020-2050 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	53,8	51,7	20,2	64,4	50,2	58,9	51,7
Positivos	12,3	14,0	75,2	12,9	39,9	29,7	35,2
Negativos	33,9	34,3	4,5	22,7	9,9	11,4	13,1
Escenario base vs. proyecciones 2070-2100 (%)							
Sin cambios	18,6	49,2	25,5	54,6	47,2	46,6	38,6
Positivos	61,8	24,6	68,7	39,8	51,0	22,2	40,4
Negativos	19,6	26,2	5,8	5,6	1,8	31,3	21,0



Escenario base vs. proyecciones 2030

Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 10. Distribución de *Gliricidia sepium*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

### ***Cedrela odorata***

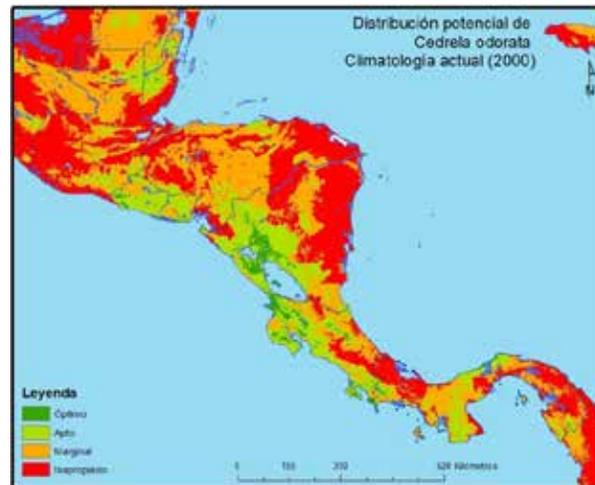
Las condiciones de adecuación actual (clima promedio del 2000) muestran que Nicaragua, seguido de Costa Rica son los países con mayores superficies de categoría óptima (746 743 ha y 526 895 ha respectivamente). Honduras no tiene superficie con condiciones óptimas. En la categoría de zonas inapropiadas, Guatemala y Nicaragua superan los 5 millones de hectáreas (Cuadro 11 y Mapa 11).

**Cuadro 11. Condiciones potenciales para el desarrollo de *Cedrela odorata* en siete países centroamericanos**

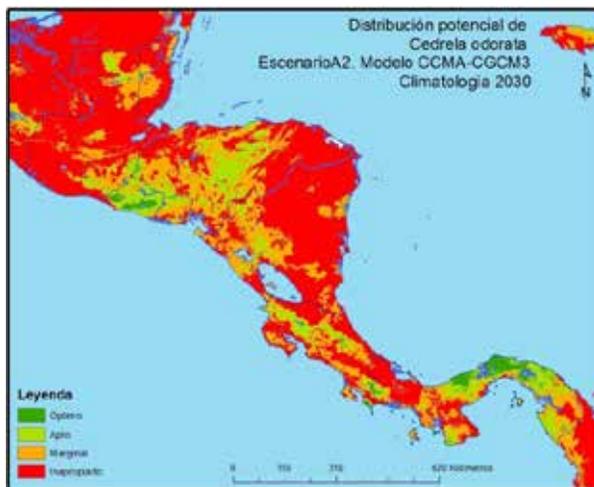
País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	ha			
Belice	743 802,81	788 075,66	754 220,58	10 500,95
Costa Rica	833 843,18	1 601 689,64	2 147 571,27	526 895,91
El Salvador	104 382,17	490 688,62	1 420 653,18	88 376,04
Guatemala	5 289 534,82	4 313 540,22	1 284 140,76	2 184,20
Honduras	4 841 013,32	5 339 021,46	1 069 165,22	0,00
Nicaragua	5 176 173,20	2 831 057,42	4 195 425,48	746 743,90
Panamá	3 333 908,09	2 871 465,09	1 533 643,45	80 983,36

Durante el primer periodo de comparación, poco menos del 50% del territorio de Centroamérica mantendría las mismas categorías. Los cambios positivos ocurrirían en el 14% de la superficie del istmo, mientras que los cambios negativos se extenderían al 37% de la región. Los principales cambios positivos ocurrirían con el paso de zonas marginales a aptas (5,5%), mientras que el paso de zonas marginales a inapropiadas y de aptas a marginales liderarían los cambios negativos, con 17,3% y 9,2% respectivamente.

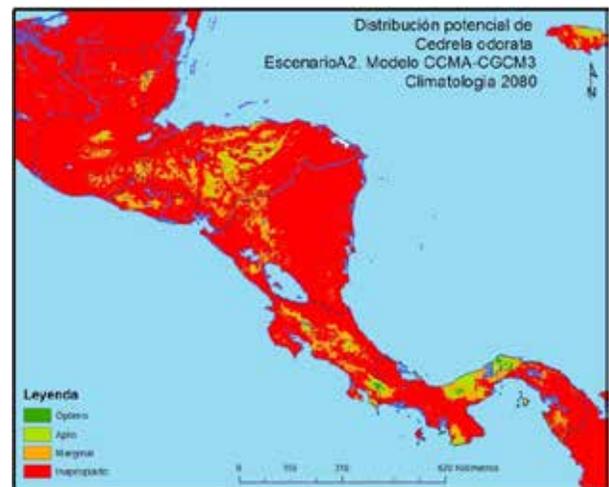
Durante el periodo 2080, se esperaría que casi el 43% del territorio mantenga las mismas condiciones de adecuación del periodo base. Asimismo, es de esperar que se mantenga la tendencia hacia mayores cambios negativos (34,1% contra 23,2%). Los cambios positivos serían favorecidos básicamente por el paso del 19,4% de la superficie bajo condiciones aptas a óptimas. Los principales cambios negativo se darían con el paso de zonas marginales a inapropiadas (18,2%) y zonas aptas a inapropiadas (11,3%).



Climatología actual



Periodo 2030



Periodo 2080

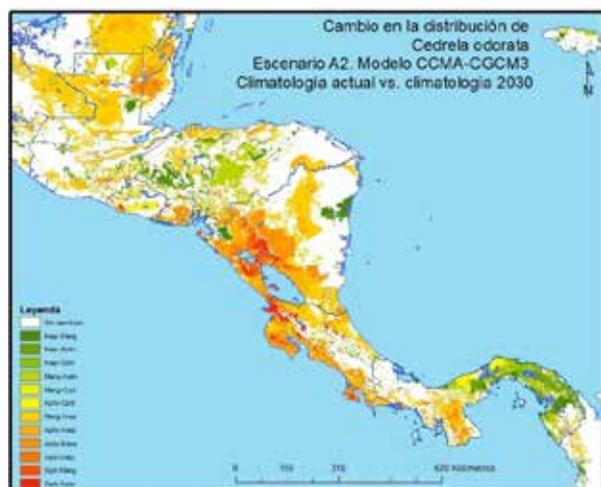
Mapa 11. Cambios en la distribución de *Cedrela odorata* según el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Durante el primer periodo de análisis, la distribución potencial futura del cedro se vería impactada desfavorablemente en todos los países del istmo excepto Honduras y Panamá; Costa Rica, Belice

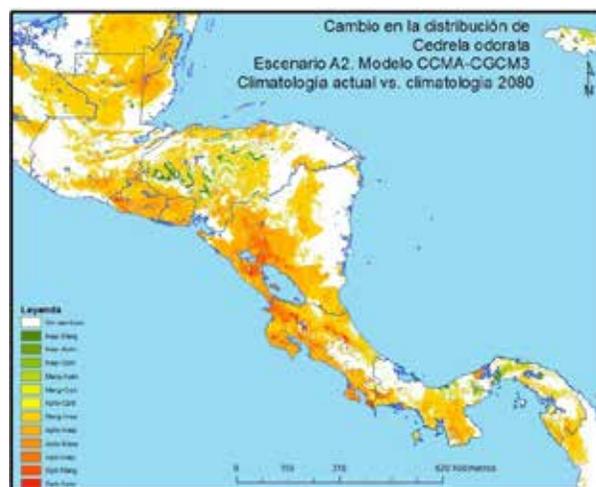
y Nicaragua serán los más afectados por los cambios negativos. Hacia finales de siglo, Nicaragua, El Salvador, Panamá y Costa Rica mantendrían saldos negativos, mientras que en el resto de los países, los cambios positivos serían mayores (Cuadro 12 y Mapa 12).

**Cuadro 12. Tipo de cambios esperados en la distribución de *Cedrela odorata* por país**

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2020-2050 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	41,5	36,0	50,8	61,1	60,7	41,4	40,2
Positivos	1,2	3,5	22,1	5,1	23,3	3,8	38,7
Negativos	57,3	60,4	27,1	33,7	15,9	54,7	21,0
Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2070-2100 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	30,5	22,4	5,0	53,1	51,6	40,4	46,2
Positivos	35,1	28,2	23,3	36,2	40,6	0,8	10,4
Negativos	34,4	49,4	71,7	10,6	7,8	58,8	43,4



Escenario base vs. proyecciones 2030



Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 12. Distribución de *Cedrela odorata*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

El poder predictivo, o capacidad de discriminación, de los modelos empleados se analizó por medio del área bajo la curva para las cinco especies estudiadas. La curva roja es el resultado de la modelación de la cantidad de puntos de registros seleccionados como datos de entrenamiento (*training data*), mientras que la curva azul se refiere al grado de ajuste del modelo con los datos de prueba (*test data*) (Figura 7). Los valores para los datos de entrenamiento y de prueba son mayores a 0,75 para las cinco especies, lo que significa que un alto porcentaje de los casos evaluados han sido clasificados de manera satisfactoria por los modelos de nicho ecológico utilizados.

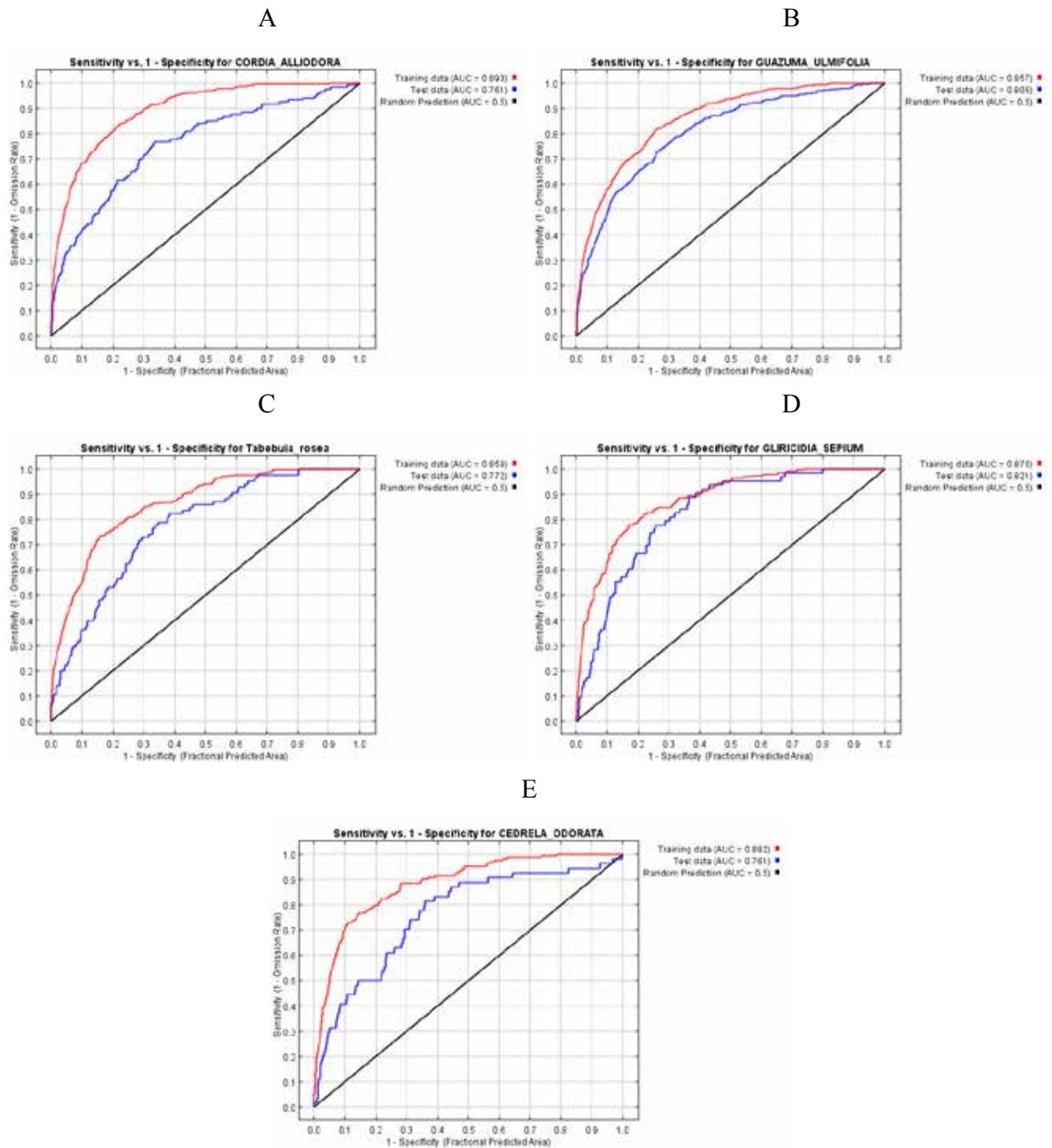


Figura 7. Área bajo la curva para las especies leñosas evaluadas

### ***Brachiaria brizantha***

A nivel regional, Nicaragua aporta poco más del 20% de la superficie continental con condiciones climáticas óptimas para el crecimiento y desarrollo de *B. brizantha* (aproximadamente 6 336 108 ha). Costa Rica y Belice contribuyen con apenas 2,6% y 3,1% de la superficie con condiciones óptimas en América Central; sin embargo, Belice y El Salvador (los países más pequeños del istmo) tienen una considerable proporción de sus territorios con condiciones climáticas óptimas (Cuadro 13 y Mapa 13).

**Cuadro 13. Adecuación de *Brachiaria brizantha* en siete países de Centroamérica**

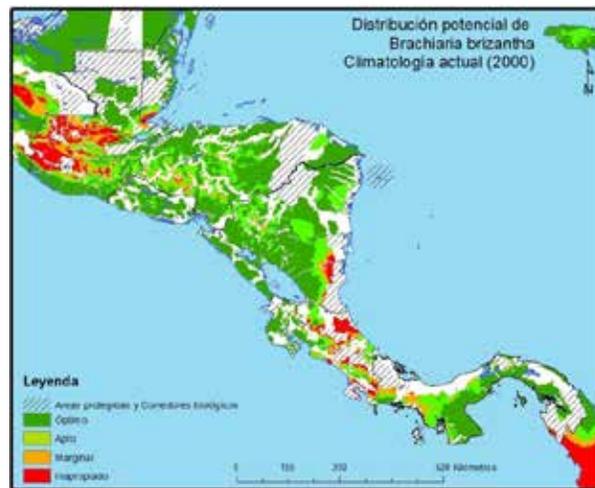
País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	%			
Belice	4,05	4,51	6,61	84,84
Costa Rica	23,47	17,32	25,36	33,84
El Salvador	0,33	0,36	11,05	88,26
Guatemala	22,45	16,57	18,22	42,76
Honduras	0,49	5,07	27,30	67,14
Nicaragua	1,83	2,36	22,09	73,72
Panamá	1,44	12,06	26,01	60,49

Durante el primer periodo de análisis (2030), el 76,6% del área de interés no presentaría cambios en sus condiciones climatológicas con respecto al escenario base; mientras que para el segundo periodo (2080), aproximadamente el 62,2% del área de estudio experimentaría algún tipo de cambio.

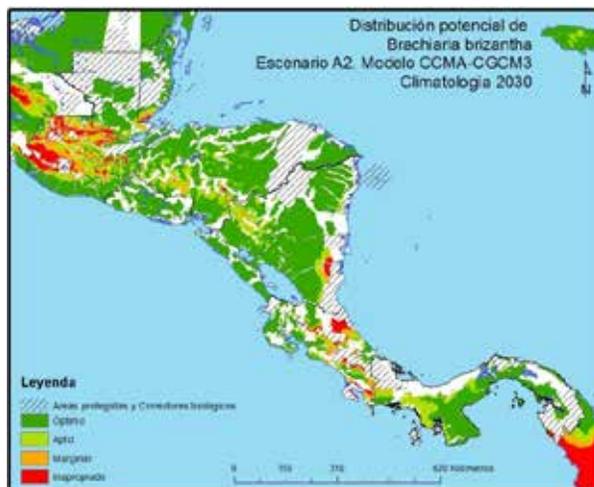
Durante el primer periodo de análisis, aproximadamente el 13,2% de la superficie en estudio mejoraría sus condiciones climáticas de aptas a óptimas para el desarrollo de *B. brizantha*. Por el contrario, apenas el 1,42% de la superficie centroamericana experimentaría cambios climatológicos negativos para el crecimiento y desarrollo de la especie.

Durante el periodo 2080, alrededor del 31,6% de la superficie en estudio tendría cambios positivos: el 11,9% pasaría de marginal a óptimo. Los cambios negativos se evidenciarían en poco más del 6,3% del territorio: el cambio negativo más importante sería de óptimo a inapropiado (1,7%).

La ubicación de los cambios y la dirección de los mismos a nivel regional pueden verse en el Mapa 14; en el Cuadro 14 se ofrece un análisis país por país. Es evidente que las condiciones de adecuación climática en los países centroamericanos para el horizonte 2030 tendrían pocos cambios en relación con el escenario base. Sin embargo, los cambios más relevantes serían positivos.



Climatología actual



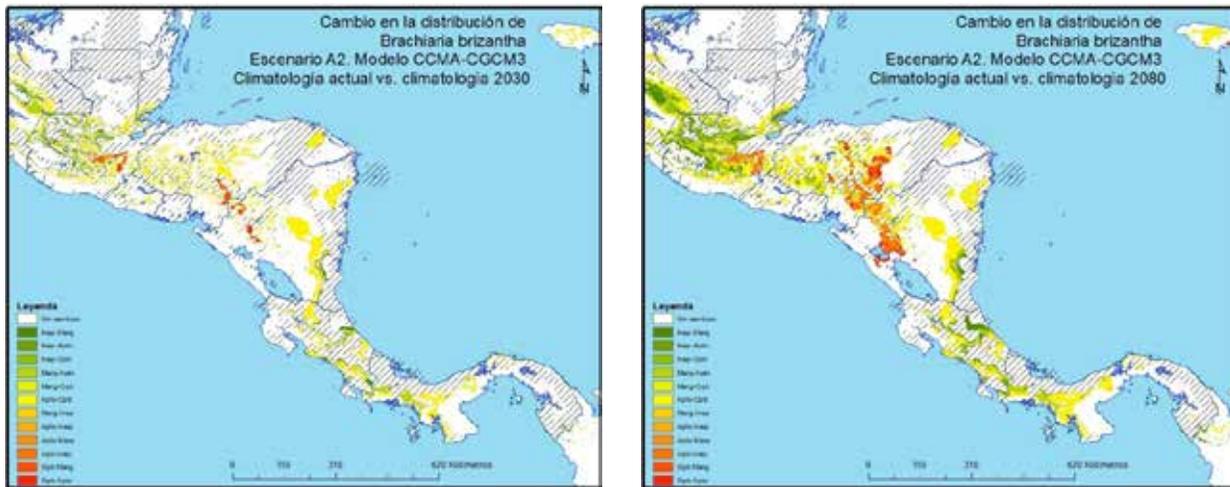
Periodo 2030



Periodo 2080

Mapa 13. Cambios en la distribución de *Brachiaria brizantha* según climatología actual y futura y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Para el periodo 2080, las condiciones climatológicas en Costa Rica permanecerían invariables en el 44,4% del territorio en tanto que en el resto del territorio tico, los cambios en los patrones de precipitación y temperatura mejorarían las condiciones para *B. brizantha*. En Belice y El Salvador las condiciones de adecuación climatológica permanecerían similares a las del escenario base en el 85% y 88% de sus territorios, respectivamente.



Escenario base vs. proyecciones 2030

Escenario base vs. proyecciones 2080

Mapa 14. Distribución de *Brachiaria brizantha*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA- CGCM3

Cuadro 14. Tipos de cambios esperados en la distribución de *Brachiaria brizantha* por país

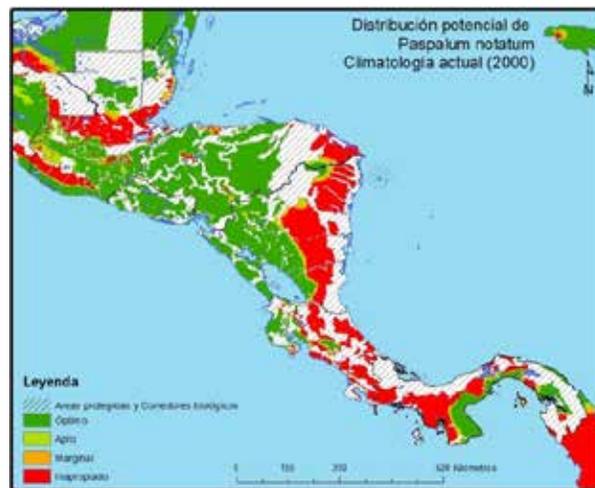
Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2030 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	91,4	61,1	91,3	70,0	77,7	80,7	77,0
Positivos	8,6	38,9	8,7	27,0	20,8	17,7	23,0
Negativos	0,0	0,0	0,0	3,0	1,5	1,5	0,0
Escenario base vs. proyecciones 2080 (%)							
Sin cambios	85,6	44,4	88,4	51,9	60,8	67,9	65,4
Positivos	14,4	55,6	11,6	42,9	27,6	23,2	34,6
Negativos	0,0	0,0	0,0	5,1	11,6	8,9	0,0

### *Paspalum notatum*

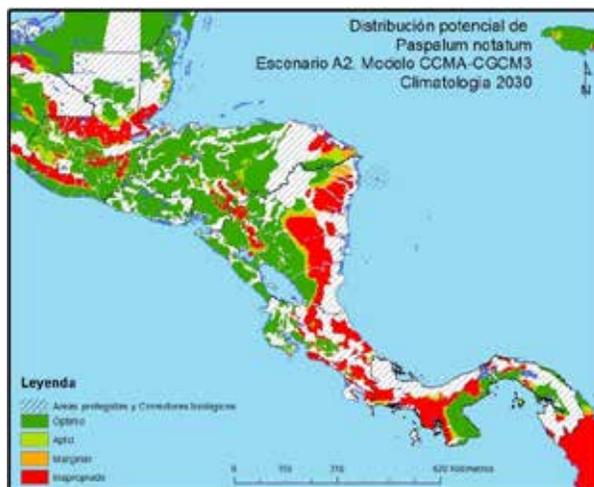
A nivel regional, Honduras aporta poco más del 20,1% de la superficie con condiciones climáticas óptimas para el crecimiento y desarrollo de *P. notatum*, seguido por Nicaragua (14,8%) y Guatemala (1,7%). Costa Rica y Belice contribuyen con apenas 1,9% y 23% de la superficie con condiciones óptimas en América Central. El Salvador constituye un caso relevante, ya que el 99,2% de su territorio ofrece condiciones climatológicas óptimas para la especie (Cuadro 15 y Mapa 15).

**Cuadro 15. Adecuación climatológica para el desarrollo y crecimiento de *Paspalum notatum* en siete países de Centroamérica (climatología 1950-2000)**

País	Inapropiado	Marginal	Apto	Óptimo
	%			
Belice	22,88	7,52	5,14	64,45
Costa Rica	68,91	2,95	3,71	24,43
El Salvador	0,06	0,28	0,47	99,19
Guatemala	33,24	4,07	9,69	53,00
Honduras	10,63	1,90	2,23	85,24
Nicaragua	38,89	3,05	3,80	54,26
Panamá	54,30	4,24	4,81	36,65



Climatología actual



Periodo 2030

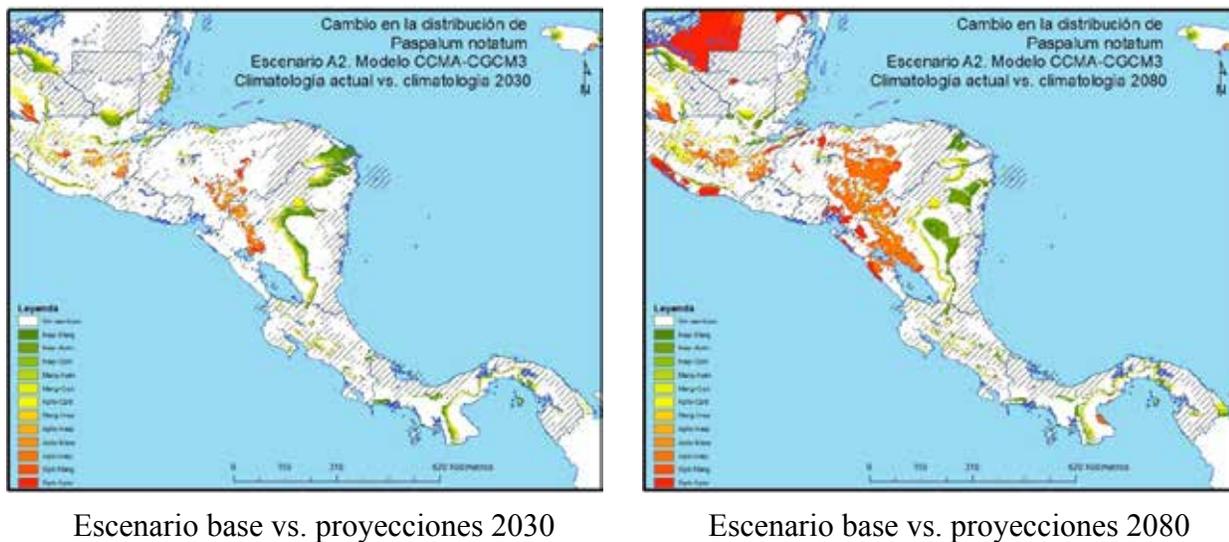


Periodo 2080

Mapa 15. Cambios en la distribución de *Paspalum notatum* según climatología actual y futura y el modelo CCMA-CGCM3 para los horizontes 2030 y 2080

Durante el primer periodo de análisis (2030), el 80,9% del área de interés no mostraría cambios en las condiciones climatológicas con respecto al escenario base, en tanto que para el segundo periodo (2080) se darían cambios en aproximadamente el 59,1% del área de estudio. Al igual que para el caso de *B. brizantha*, los cambios positivos serían mayores que los cambios negativos: 13,8% del territorio mostraría algún tipo de cambio positivo y 4,6% tendría cambios negativos.

Por el contrario, durante el periodo 2070-2100 los cambios negativos serían mayores que los cambios positivos: 17,6% y 14,3% respectivamente. El principal cambio positivo para el desarrollo de *P. notatum* sería el paso de inapropiado a apto (5,2%) y, el negativo, de apto a marginal (5,8%). La ubicación de los cambios y la dirección de los mismos a nivel regional pueden verse en el Mapa 16. Durante el periodo 2030, la adecuación climatológica de los países centroamericanos no experimentará muchos cambios. Por ejemplo, Nicaragua mantendrá las mismas condiciones de adecuación en el 77,4% de su territorio con respecto al escenario base, mientras que solo el 0,8% del territorio salvadoreño se verá afectado por el cambio en los patrones de climáticos. Para el periodo 2080, el 24% del territorio nicaragüense sufrirá algún tipo de cambio positivo, en tanto que el 27,7% padecerá cambios negativos. El Salvador continuará siendo el país más estable: solo el 2,5% de su territorio sufrirá algún cambio negativo (Cuadro 16).



Mapa 16. Distribución de *Paspalum notatum*: escenario base versus proyecciones futuras del modelo CCMA-CGCM3

**Cuadro 16. Tipos de cambios esperados en la distribución de *Paspalum notatum* por país**

Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2030 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	81,9	84,6	99,2	78,9	84,4	77,4	81,3
Positivos	18,1	15,4	0,8	14,7	9,0	16,6	18,6
Negativos	0,0	0,0	0,0	6,4	6,5	6,0	0,1
Tipo de cambio	Escenario base vs. proyecciones 2080 (%)						
	Belice	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Sin cambios	88,0	81,0	97,0	66,9	60,4	48,0	76,3
Positivos	11,5	19,0	0,5	15,4	6,3	24,3	22,0
Negativos	0,5	0,0	2,5	17,8	33,3	27,7	1,7

# Impactos provocados por el cambio climático

El cambio climático tendrá impactos negativos en la distribución de las especies evaluadas en la región centroamericana, pero también se presentarán impactos positivos. La especie cuya adecuación se verá más favorecida con los cambios en los futuros patrones de temperatura y precipitación es *G. sepium*; las zonas con categorías aptas y óptimas se concentran en la costa del Pacífico de Nicaragua, Honduras y Guatemala y en la zona norte de Costa Rica. Sin embargo, esto no quiere decir que las zonas que actualmente están en las categorías favorables vayan a permanecer como tales; muy probablemente, se darán desplazamientos hacia otras zonas.

El desplazamiento de las zonas con condiciones favorables para el desarrollo de una especie forestal usada en SSP implica retos importantes para los dueños de las parcelas y para la sociedad en su conjunto. Los cambios negativos evidencian la necesidad de diseñar estrategias de adaptación de los SSP para hacerle frente al futuro incremento de la temperatura y reducción de la precipitación. Entre tales estrategias se debe considerar el cambio de especies por otras con mejor rango de adaptación –por lo general, especies introducidas o exóticas. Leguía *et al.* (2009) observaron que el cambio futuro en los patrones de precipitación y temperatura tendrá impactos negativos en la distribución natural de especies forestales nativas, mientras que las especies forestales introducidas, con rangos de adaptación más amplios, serán afectadas de manera positiva.

Es necesario tomar en cuenta los alcances y limitaciones de estos resultados y, además, entender claramente los supuestos sobre los cuales descansa el proceso de modelaje e identificar las fuentes de incertidumbre. Así por ejemplo, los resultados expuestos se basan en registros de presencia de las especies en el territorio centroamericano; o sea que no se incluyen registros de otras zonas geográficas en donde las especies estudiadas se encuentran de manera natural (GBIF 2013). Este factor puede tener un doble impacto: a) la sobreestimación del impacto del cambio climático en la distribución de estas especies y b) la subestimación de la capacidad adaptativa de los sistemas silvopastoriles, al no tomarse en cuenta toda la variabilidad genética de la especie. Así, un proceso participativo de introducción, evaluación y selección de material genético de diferentes procedencias podría ser una buena estrategia de adaptación del SSP.

Se puede esperar que la capacidad de las especies forestales para persistir en su locación actual bajo nuevas condiciones de clima sea la clave para su supervivencia frente al cambio climático (Alberto *et al.* 2013). Sin embargo, las especies forestales están limitadas en su capacidad de cambiar a

otras zonas debido a su ciclo de vida (Zonneveld *et al.* 2009ab). Otro factor que se debe tomar en cuenta es el cambio en la distribución de áreas potenciales para el crecimiento y desarrollo de las especies de pasto evaluadas (McLaughlin *et al.* 2002, Jensen 2003). *B. brizantha* y *P. notatum* son especies introducidas, con rangos de tolerancia climática más amplios que las especies nativas; por esta razón, si bien es cierto que las condiciones de adecuación futura para ambas especies se mantendrán casi constantes, el impacto del cambio en los patrones de precipitación y temperatura futura será más positivo que negativo.

Según Macías *et al.* (2006) y Andreu *et al.* (2007), las especies que se ubican en la frontera de su distribución climática natural son las más susceptibles de sufrir impactos negativos debido al cambio climático. Este punto resalta la necesidad de contar con bases de datos de suelos con el mismo nivel de detalle que las bases de datos climatológicas. Mucho se ha avanzado con los procesos de modelaje del clima futuro; asimismo, el acceso a esta información por parte de la comunidad científica mundial también ha mejorado sustancialmente; sin embargo, pese a los esfuerzos realizados para tratar de unificar las bases de datos de suelos, aún estamos lejos de tener el mismo nivel de detalle que en los datos climáticos.

El impacto del cambio climático en la distribución de *B. brizantha* y *P. notatum* no será significativo; sin embargo, esto no quiere decir que se mantenga la cantidad y calidad de los pastos, en términos de materia seca y palatabilidad. Por ejemplo, las temperaturas altas y la ausencia de precipitaciones pueden favorecer el proceso de lignificación de los pastos y forrajes, lo que implica una merma en la productividad (FAO 2009).

En cuanto a plagas y enfermedades, ambas especies demostraron cierto grado de resistencia a plagas y enfermedades. Olivera *et al.* (2007) evaluaron 36 accesiones de *B. brizantha* en suelos ultisoles durante el periodo lluvioso. No se encontró ningún síntoma o lesión causada por plagas o enfermedades, por lo que los autores concluyen que la época favoreció el desarrollo de la planta por encima de cualquier patógeno. Sin embargo, Lascano *et al.* (2002) menciona que la variedad Toledo presentó cierto grado de susceptibilidad al ataque del cercópido (Homoptera: Cercopidae), conocido comúnmente como salivazo. *P. notatum*, por su parte, es una especie resistente a plagas y enfermedades.

### **Críticas a los modelos de nicho ecológico**

Estos modelos son herramientas que aportan datos importantes para la planificación de estrategias de adaptación de especies ante los efectos del cambio climático (Confalonieri *et al.* 2013, Mateo *et al.* 2011). No obstante, debemos tener presente que, por tratarse de modelos, toman en cuenta

muchas variables pero dejan de lado otras que pudieran ser relevantes para el proceso de distribución de las especies (Gray y Hamann 2012, Foody 2008, Pearson y Dawson 2003).

Un análisis de la literatura existente sobre el tema destaca tres procesos naturales importantes que los modelos de nicho ecológico omiten: a) las interacciones bióticas tales como la depredación, la competencia y la simbiosis; b) los cambios evolutivos; c) los mecanismos de dispersión de las especies (Pearson y Dawson 2003). Para simulaciones más realistas del impacto del cambio climático en la distribución de especies se requiere una mejor comprensión de las complejas interacciones entre los muchos factores que afectan la distribución (Alberto *et al.* 2013, Pearson y Dawson 2003).

McMahon *et al.* (2011) identificaron cinco formas de lograr avances a corto plazo: a) el mejoramiento de la accesibilidad y eficiencia de los datos de monitoreo de la biodiversidad; b) la cuantificación de los principales determinantes de la sensibilidad de las especies al cambio climático; c) la incorporación de las dinámicas de las comunidades a las proyecciones de respuesta de la biodiversidad; d) la consideración del proceso evolutivo en la respuesta de la especies al cambio climático y e) el mejoramiento del conjunto de reglas biofísicas que definen agrupaciones funcionales de las especies en los modelos globales.

Una de las principales críticas que se hacen a modelos como Maxent es que utilizan una base de datos para la climatología actual, la cual proviene de la extrapolación de información colectada en estaciones meteorológicas a nivel mundial (Hijmans *et al.* 2005), pero con poca información de nivel local. Se debe agregar que las predicciones de distribución futura se basan en modelos de circulación global, con resoluciones muy gruesas, por lo que deben ser sometidas a procesos de reducción de resolución (*down scaling*) para que sean de utilidad. Excepto el modelo Preci-Caribe para Centroamérica, aun no se tienen modelos regionales de uso masivo, ni escenarios de emisiones, ni horizontes temporales.

Maxent permite trabajar con variables edáficas y cualitativas. La calidad de los análisis con este modelo depende del detalle de los datos que se incluyen. Así, las variables de suelos que se usaron para este estudio provienen de datos a una escala bastante gruesa que no aporta mucha información, pero que no podemos dejar de incluir.

### ***Incertidumbre asociada al clima futuro***

La incertidumbre asociada a las proyecciones de clima futuro es un elemento importante en el análisis del impacto del cambio climático. En general, hay múltiples fuentes de incertidumbre en los escenarios climáticos a futuro. El clima en sí mismo es muy complejo como para ser representado

por un modelo numérico y contiene numerosos supuestos y parámetros que cada centro de modelaje enfoca de manera diferente (Santoso *et al.* 2008). Según el IPCC (2007) e IPCC-TGICA (2007) citados por Santoso *et al.* (2008), la incertidumbre de los modelos puede deberse a:

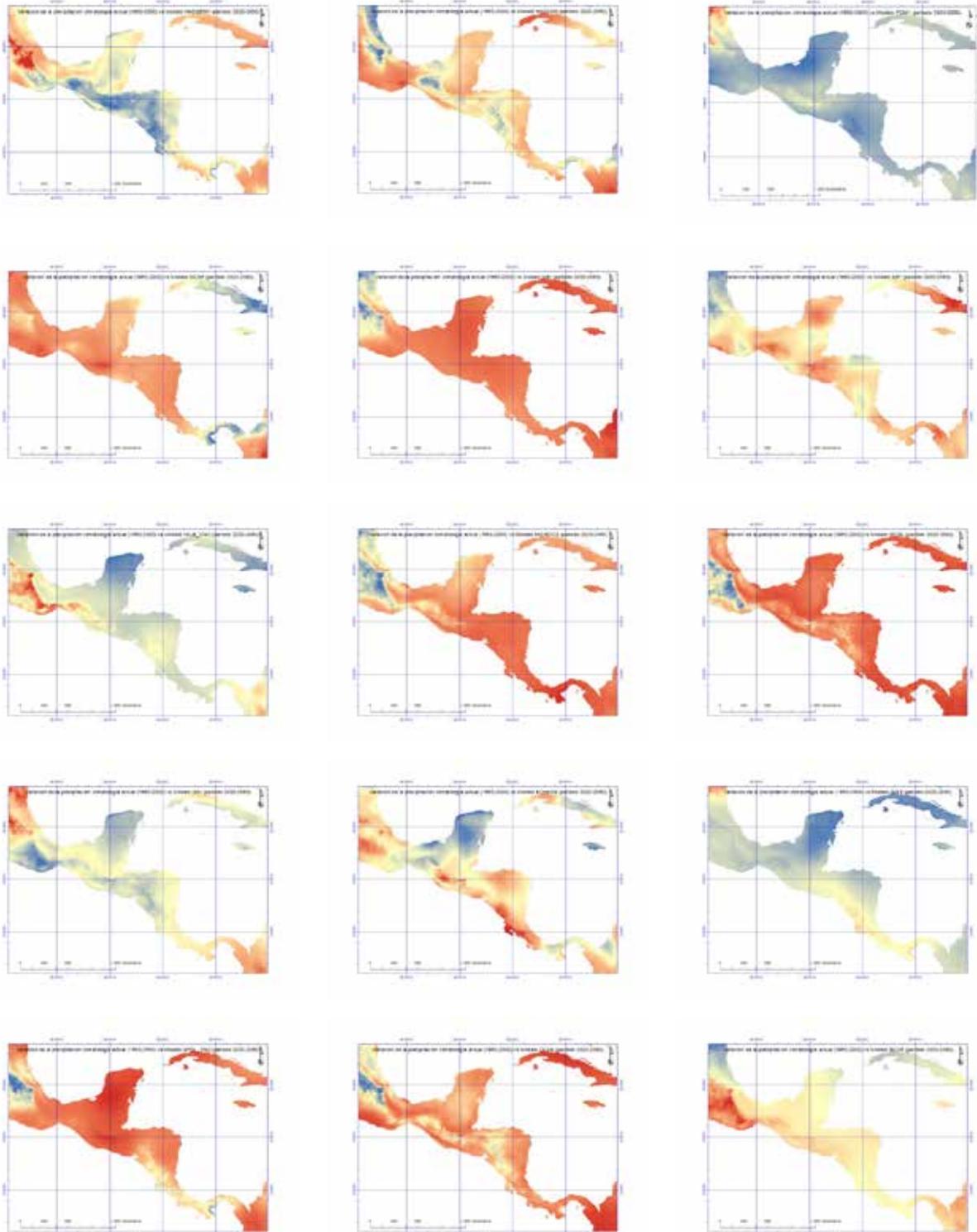
- Incertidumbre en las proyecciones de emisiones de GEI y aerosoles.
- Incertidumbre en la sensibilidad global del clima debido a las diferencias en que se modelan los procesos físicos y la retroalimentación por cada modelo.
- Cambios en la capa de hielo en la Antártida y Groenlandia, debido a los cambios en los flujos de hielo.
- Incertidumbres alrededor de las proyecciones regionales de cambio climático, particularmente en la precipitación, las cuales pueden arrojar resultados diferentes entre los modelos de circulación general para el mismo promedio de calentamiento global.

En el mapa 17 puede observarse un ejemplo de la incertidumbre en los modelos tomando como ejemplo la variación en la precipitación total de 15 modelos de circulación general con respecto a la precipitación anual promedio para el periodo 1950-2000.

### **Comportamiento de las principales plagas y enfermedades**

Como ya se mencionó, hay factores y procesos que los modelos de nicho ecológico no perciben; entre ellos, la interacción con otros componentes de los ecosistemas, como las plagas y enfermedades. Los cambios en precipitación y temperatura pueden afectar la supervivencia, reproducción, dispersión y distribución de plagas y enfermedades y, además, pueden favorecer la susceptibilidad de las especies forestales al ataque de patógenos.

Estudios basados en registros fósiles relacionan los cambios climáticos globales con aumentos en las poblaciones de insectos herbívoros (Currano *et al.* 2008). No obstante, la magnitud del impacto del cambio climático en la incidencia de plagas y enfermedades va a depender de la especie y su capacidad de adaptación. El cambio climático puede influir de las siguientes formas en las plagas forestales y en el nivel de daño que causan: impactos directos en su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; alteración de la fisiología y defensas del árbol huésped; impacto en las relaciones entre plagas, su medio ambiente y otras especies –p.e., enemigos, competidores y mutualistas (Moore y Allard 2008).



Mapa 17. Variación en la precipitación total según 15 modelos de circulación general durante el periodo 2020-2050 con respecto a la climatología 1950-2000

Diversos estudios reportados por Moore y Allard (2008) ilustran el efecto que el cambio climático tendrá en la distribución de especies plagas y en su fenología. Con el aumento gradual de la temperatura promedio se espera que los insectos perfeccionen con mayor rapidez sus etapas larvales y se vuelvan adultos en menor tiempo; en consecuencia, las respuestas esperadas de los insectos podrían incluir un adelanto en el ciclo de surgimiento de larvas e insectos adultos y el incremento en la duración del período de vuelo.

Eventos extremos, como las sequías, son cada vez más frecuentes y tendrán un doble impacto en la sanidad de los árboles. En primer lugar, las sequías someterán a los árboles a un estado de estrés que puede provocar la pérdida de biomasa en los bosques (Phillips *et al* 2009), con lo aumentaría la vulnerabilidad de los árboles al ataque de cualquier agente patógeno. En segundo lugar, el incremento de la temperatura puede favorecer la presencia de plagas en épocas y lugares en los cuales normalmente los insectos no se encuentran (Moore y Allard 2008).

Entre las plagas y enfermedades que atacan a las especies forestales evaluadas en Centroamérica se destacan:

Árbol	Plaga	Enfermedad
<i>Cordia alliodora</i>	<i>Dictyla monotripidia</i>	<i>Puccinia cordiae</i>
	<i>Ablicerus</i> sp.	<i>Fusarium</i> sp.
	<i>Oncideres punctata</i>	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Cerambix</i> spp	
	<i>Arsenura armida</i>	
	<i>Phelypera distigma</i>	
<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Akantaka insidiosa</i>	<i>Glomerularia</i> sp.
	<i>Acrospila gastralis</i>	<i>Prospodium</i> sp.
	<i>Lepidomis</i> sp.	
	<i>Amphicerus cornutos</i>	
<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Antitypona</i> sp.	<i>Colletotrichum</i> sp
	<i>Exophthalmus jekelianus</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>
	<i>Hylisia lineata</i>	<i>Phyllosticta</i> sp.
	<i>Azeta versicolor</i>	
<i>Cedrela odorata</i>	<i>Hypsipyla grandela</i>	<i>Fusarium</i> sp.
	<i>Sematoneura grijpmani</i>	<i>Phyllachora balansae</i>

Cabe mencionar que las buenas prácticas silviculturales forman parte de un esquema de adaptación planificada de las especies forestales.

## Conclusiones

Los sistemas silvopastoriles son una buena estrategia de producción ganadera que aprovecha los beneficios funcionales y económicos de las especies forestales que interactúan con pastos y ganado. Esta forma de explotación ganadera es una buena opción de adaptación frente al cambio climático; sin embargo, las especies que forman parte del SSP sufrirán por los cambios en los patrones de precipitación y temperatura.

Los SSP cuyo principal componente leñoso sea *C. alliodora*, *G. ulmiflora*, *T. rosea* o *C. odorata*, sufrirán impactos negativos por el cambio climático a nivel regional. Los SSP con *G. sepium* tendrán zonas más amplias con condiciones favorables para su crecimiento y desarrollo.

El enfoque de nicho ecológico para la predicción de la distribución futura de especies vegetales tiene sus críticos y defensores. Las críticas no deben ser menospreciadas sino que deben ser tomadas en cuenta para no caer en conclusiones absolutas sino, por el contrario, dimensionar el alcance de los resultados. Adicionalmente al enfoque de nicho ecológico, el desarrollo de modelos globales o regionales enfrenta el reto de mejorar la incertidumbre de sus resultados futuros. Aunque no es el objetivo de este trabajo hacer un análisis de incertidumbre, este aspecto no debe dejarse de lado.

Es de esperar que los resultados de este trabajo abran la puerta a la discusión sobre lo que puede ocurrir con el componente arbóreo de los sistemas silvopastoriles en la región centroamericana. La distribución de las especies no es más que la introducción; hacen falta trabajos detallados que incluyan la revisión de datos climáticos globales y locales y un proceso detallado de validación de resultados. Asimismo, debe reducirse la escala de análisis y enfocarse en zonas específicas por país.

# Bibliografía

- Alberto, F; Aitken, S; Alía, R; González-Martínez, S; Hänninen, H; Kremer, A; Lefèvre, F; Leonormand, T; Yeaman, S; Whetten, R; Savolainen, O. 2013. Potencial for evolutionary responses to climate change – evidence from tree populations. *Global Change Biology* 19: 1645-1661
- Alig, PR; Adams, DL; McClar, BA. 2002. Projecting global impacts of global climate change in US forests and agricultural sector and carbon budget. *Forest Ecology and Management* 169: 3-14.
- Andrade, H; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10(39/40): 109-116.
- Andreu, L; Gutiérrez, E; Macías, M; Ribas, M; Bosch, O; Camarero, J. 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology* 13: 804-815.
- Arnell, NW; Livermore, MJL; Kovats, S; Levy, PE; Nicholls, R; Parry, ML; Gaffin, SR. 2004. Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines. *Global Environmental Change* 14:3-20.
- Barona, E; Ramankutty, N; Hyman, G; Coomes, OT. 2010. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters* 5(2): 024002.
- Confalonieri, R; Francone, C; Capelli, G; Stella, T; Frasso, N; Carpani, M; Bregaglio, S; Acutis, M; Tubiello, FN; Fernandes, E. 2013. A multi-approach software library for estimating crop suitability to environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 90: 170-175.
- Currano, E; Wilf, P; Wing, S; Labandeira, C; Lovelock, E; Royer, D. 2008. Sharply increased insect herbivory during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *PNAS*. Consultado el 20 julio, 2014. <file:///C:/Users/Owner/Documents/consultorias/CC-especies%20silvopastoriles/Literature/PNAS-2008-Currano-1960-4.pdf>
- Davis, MV; Zabinski, C. 1992. Change in geographical range resulting from greenhouse warming: effects on biodiversity in forest. *In* Peters, RL; Lovejoy, TE. (Eds). *Global warming and biological diversity*. Yale University Press. p. 297-308.
- Dijkshoorn, K; Huting, J; Tempel, P. 2005. Update of the 1:5 million soil terrain database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; Version 2.0). Report 2005/01 ISRIC – World Soil Information. Wageningen, The Netherlands. 19 p.
- Easterling, W; Apps, M. 2005. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: a view from the IPCC. *Climate Change* 70:165-189.
- Elith, J; Phillips, S; Hastie, T; Dudík, M; Chee, Y; Yates, C. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43-57.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: la ganadería a examen*. Roma. 184 p.

- Foody, GM. 2008. Refining prediction of climate change impacts on plant species distribution through the use of local statistics. *Ecological Informatics* 3: 228-236.
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). 2013. The Global Biodiversity Information Facility: GBIF Backbone Taxonomy, 2013-07-01. Consultado el 29 jun. 2014. <http://www.gbif.org/dataset/d7dddbf4-2cf0-4f39-9b2a-bb099caae36c>.
- Gray, L; Hamann, A. 2012. Tracking suitable habitat for tree populations under climate change in western North America. *Climate Change* 117(1-2) 289-303.
- Hamrick, JL. 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *Forests Ecology and Management* 197: 323-335.
- Hijmans, R; Cameron, S; Parra, J; Jones, P; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land area. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hutchinson, GE; 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology* 22: 415-457.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Emissions scenarios: A special report of Working Group III of IPCC. Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the 4th assessment report of the IPCC [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva, Switzerland. 104 p.
- Jensen, NW. 2003. Consensus on ecological impacts remains elusive. *Science* 299: 38.
- Lascano, C. E., Pérez, R., Plazas, B., Camilo, H., Medrano, J., Argel, M., & Pedro, J. 2002. Pasto Toledo (*Brachiaria brizantha* CIAT 26110): Gramínea de crecimiento vigoroso para intensificar la ganadería colombiana. CIAT. 22 p
- Leguía, E; Locatelli, B; Imbach, P. 2009. Impacto del cambio climático sobre plantaciones forestales en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* 56-57: 150-159.
- López, F; Gómez, R; Harvey, C; López, M; Sinclair, F: 2007a. Toma de decisiones de productores ganaderos sobre el manejo de árboles en potreros en Matiguás, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45: 93-100.
- López, F; López, M; Gómez, R; Harvey, C; Villanueva, C; Gobbi, J; Ibrahim, M; Sinclair, F: 2007b. Cobertura arbórea y rentabilidad de fincas ganaderas en Rivas y Matiguás, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45: 101-108.
- Macías, M; Andreu, L; Bosch, O; Camarero, J; Gutiérrez, E. 2006. Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its southwestern distribution limit. *Climatic Change* 79: 289-313.
- Mateo, R; Felicísimo, Á; Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*. 84: 217-240.

- McLaughlin, JF; Hellman, JJ; Boggs, CL; Ehrlich, PR. 2002. Climate change hastens population extinction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99: 6070-6074.
- McMahon, S; Harrison, S; Armbruster, S; Bartlein, P; Beale, C; Edwards, M; Kattge, J; Midgley, G; Morin, X; Prentice, C. 2011. Improving assessment and modeling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. *Trends in Ecology Evolutions* 26(5): 249-259.
- Moore, B; Allard, G. 2008. Climate change impacts on forest health. Forest Health and Biosecurity Working Paper FBS/34E. Rome, FAO. Consultado el 20 julio 2014. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/k3837e/k3837e.pdf>
- Olivera, Y; Machado, R; Del Pozo, PP; Ramírez, J; Cepero, B. 2007. Evaluación de accesiones de *Brachiaria brizantha* en suelos ácidos: épocas de máxima precipitación. *Pastos y forrajes* 30: 303-313.
- Pacheco, C; Aguado, I; Mollicone, D. 2011. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *BioLlania* (10): 281-292.
- Pearson, R; Dawson, T. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography* 12: 361-371.
- Pearson, RG. 2007a. Lessons in conservation. <http://ncep.amnh.org/linc>
- Pearson, RG. 2007b. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners: Synthesis. American Museum of Natural History. 50 p.
- Phillips, S; Anderson, R; Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4): 231-259.
- Phillips, S; Dudik, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 3: 161-175.
- Phillips, OL; Aragão, LE; Lewis, SL; Fisher, JB; Lloyd, J; López-González, G; Andrade, A. 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* 323(5919): 1344-1347.
- Rehfeldt, G; Wykoff, W; Ying, C. 2001. Physiologic plasticity, evolution, and impacts of a changing climate on *Pinus contorta*. *Climatic Change* 50: 355-376.
- Ramírez-Villegas, J; Bueno-Cabrera, A. 2009. Working with climate data and niche modeling. I. Creation of bioclimate variables. Cali, Colombia, CIAT. Consultado 23 dic. 2012. [http://www.ccafs-climate.org/downloads/docs/Ramirez\\_Bueno-Cabrera\\_2009\\_tutorial\\_bcvars\\_creation.pdf](http://www.ccafs-climate.org/downloads/docs/Ramirez_Bueno-Cabrera_2009_tutorial_bcvars_creation.pdf)
- Ramírez-Villegas, J; Jarvis, A; Läderach, P. 2013. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 64-78.
- Santoso, H; Idinoba, M; Imbach, P. 2008. Climate scenarios: What we need to know and how to generate them. Bogor, Indonesia, CIFOR. Working paper No. 45. 32 p.
- Scherr SJ; Sthapit S. 2009. Mitigating climate changes through food and land use. *Worldwatch Report* 179. Washington, D.C., Worldwatch Institute. 48 p.

- Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M; de Haan, C. 2006 Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome, Italy, FAO.
- Thornton, PK; van de Steeg, J; Notenbaert, A; Herrero, M. 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems* 101: 113-127.
- Villanueva, C; Ibrahim, M; Torres, K; Torres, M. 2008. Planificación agroecológica de fincas ganaderas: la experiencia de Copán, Honduras. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie técnica. Informe técnico No. 365. 36 p.
- Warrent, D; Seifert, S. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications* 21(2): 335-342.
- Zonneveld, M, van; Jarvis, A; Dvorak, W; Lema, G; Leibing, C. 2009a. Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumani* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management* 257(7): 1566–1576.
- Zonneveld, M, van; Koskela, J; Vinceti, B; Jarvis, A. 2009b. Impact of climate change on the distribution of tropical pines in Southeast Asia. *Unasylva* (231/232): 24-29.