

Modelación de nichos ecológicos

basado en tres escenarios de **cambio climático** para

cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica

Mario Quesada-Quirós¹

Luis Guillermo Acosta-Vargas¹

Dagoberto Arias-Aguilar¹

Alexánder Rodríguez-González²

Resumen

El cambio climático genera diferentes respuestas en el patrón de distribución de la flora y fauna. Según las predicciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) por medio de modelos globales, las zonas altas son las que sufrirán efectos mayores, debido a los cambios drásticos en variables ambientales como la temperatura y precipitación. Por ello se realizaron modelos de nicho ecológico con el algoritmo MaxEnt (basado en máxima entropía) para las especies: *Comarostaphylis arbutoides* (Lindl.), *Ilex pallida* (Standl.), *Myrrhidendron donnellsmithii* (J.M. Coult. & Rose), *Quercus costaricensis* (Liebm.) y *Vaccinium consanguineum* (Klotzsch). A partir de las proyecciones al 2050 y 2070 de Worldclim

Abstract

Ecological niche modeling based on three climate change scenarios for five species of plants in high areas of Costa Rica

Climate change generates different responses in the distribution pattern of flora and fauna. According to the predictions of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) through global models, areas that are most affected are the highland areas, due to drastic changes in environmental variables such as temperature and precipitation. That is why ecological niche models with MaxEnt (algorithm based on maximum entropy) were made for the following species: *Comarostaphylis*

1. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica; mariofgm@gmail.com, lacosta@itcr.ac.cr, darias@itcr.ac.cr.

2. Museo Nacional de Costa Rica, Herbario Nacional, San José, Costa Rica; arodriguez@museocostarica.go.cr.

Recibido: 20/07/2016

Aceptado: 27/09/2016

(capas con información del clima global), se generaron los modelos en los escenarios de Representative Concentration Pathways de: RCP 2,6 (mitigación), RCP 4,5 (estabilización) y RCP 8,5 (pesimista). Las variables de mayor aporte fueron la temperatura máxima del periodo más caliente y la temperatura media en el trimestre más lluvioso; se utilizaron el test de Jackknife y el Área bajo la curva (AUC) para la validación y análisis de los modelos. La mayoría de las modelaciones muestran una tendencia a la reducción del área a mediano y largo plazo en comparación con nicho ecológico actual. Sin embargo, la especie *Ilex pallida* tiene proyecciones favorables en la colonización de nuevas áreas para los RCP 2,6 y RCP 4,5 en lugares de mayor elevación que las actuales.

Palabras clave: Cambio climático, biogeografía, Costa Rica, MaxEnt, modelamiento de especies, nicho ecológico.

Introducción

El cambio climático ha causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos, con evidencias sólidas en los últimos años (IPCC, 2014). Estos cambios son atribuidos al ser humano por su contribución al aumento de emisión de gases de efecto invernadero, los que provocan una tendencia de aumento de la temperatura global (IPCC 2001).

Los seres vivos presentan diferentes respuestas de adaptación ante cambios en las condiciones climáticas y ambientales. Cambios drásticos en su ambiente natural, pueden significar perjudiciales para la conservación y funcionamiento de los ecosistemas (Alsos, Alm, Normand, & Brochmann 2009). Según menciona Rosenzweig (1995), la distribución de las especies constituye la unidad básica de la biogeografía y es un elemento clave para el entendimiento de la biología; además para varios autores, ésta variable se verá comprometida por el cambio climático, afectando gradualmente a las especies (Plischoff & Fuentes-Castillo, 2011; Phillips & Dudík, 2008).

Según Castaño (2002), el calentamiento global afecta con mayor fuerza los ecosistemas pequeños como los páramos. En los ecosistemas de altas montañas persiste la fragilidad y es común el espacio reducido. Cuando el terreno o las condiciones de suelo no permiten migrar altitudinalmente a las especies, se considera que el espacio es igual de vulnerable que una isla pequeña (Kappelle y Horn, 2005). Es por ello que, el modelado de especies fundamentado en nichos ecológicos se ha convertido en la principal herramienta para intentar

arbutoides (Lindl.), *Ilex pallida* (Standl.), *Myrrhidendron donnellsmithii* (J.M. Coult. & Rose), *Quercus costaricensis* (Liebm.) and *Vaccinium consanguineum* (Klotzsch). From 2050 and 2070 projections of Worldclim, models generated in scenarios Representative Concentration Pathways of: RCP 2,6 (mitigation), RCP 4,5 (stabilization) and RCP 8,5 (pessimistic). The variables of greatest contribution were the maximum temperature of the warmest period and the average temperature in the wettest quarter; Jackknife test and area under the curve (AUC) were used for validation and models analysis. Most modeling shows a tendency to a reduction in the area in a medium to long term period of time, compared to the current ecological niche. However, the species *Ilex pallida* has favorable projections in the colonization of new areas for the RCP 2,6 and RCP4,5 scenarios in places of higher elevation than the ones used today.

Key words: Climatic change, biogeography, Costa Rica, MaxEnt, Species Modelling, ecological niche.

predecir la futura distribución de especies por cambios ambientales (Phillips, Anderson & Schapire, 2006).

Actualmente se pueden encontrar varios programas para el modelado de especies por distintos métodos y datos para desarrollar las predicciones (Elith et al., 2006). Dentro de estos programas se encuentra MaxEnt (Phillips et al., 2006), el cual permite proyectar las variaciones en la distribución de una especie o un grupo de especies frente a cambios ambientales de temperatura, humedad y precipitación (Morales, 2012).

MaxEnt ofrece ventajas en comparación con otros programas, ya que solo necesita datos de reportes georreferenciados, puede utilizar datos continuos o categorizados y sus algoritmos son eficientes, garantizando la óptima distribución de la probabilidad de máxima entropía (Phillips et al., 2006). Sin embargo, cuando existen datos sesgados, otros programas de modelación como Bioclim generan mejores resultados que MaxEnt (Varela, Mateo, García-Valdés y Fernández-González, 2014)

En el presente trabajo se evaluaron los cambios en los nichos ecológicos de cinco especies de árboles en el escenario actual y en respuesta a los efectos del cambio climático a mediano (2041-2060) y largo plazo (2061-2080).

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio lo constituye todo el territorio de Costa Rica, ubicada en las coordenadas geográficas

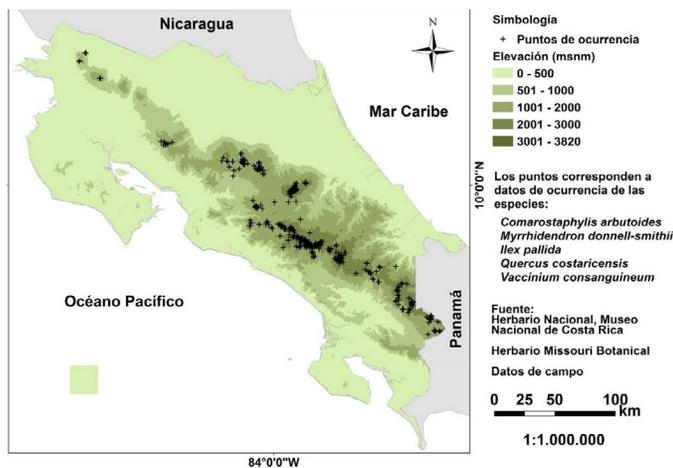


Figura 1. Ubicación de los datos de ocurrencias para las especies de zonas altas estudiadas en Costa Rica.

Figure 1. Location of data occurrences for upland species studied in Costa Rica.

8° y 11° latitud norte; entre 83° y 86° longitud oeste, en una extensión continental aproximada de 51100 km² (ITCR, 2014). Limita al Norte con Nicaragua, al Sureste con Panamá, al Este con el mar Caribe y el Oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). Representa una localidad de gran importancia para el estudio de la biogeografía, ya que es puente de migración para muchas especies entre América del Sur y América del Norte (Guariguata y Kattan, 2003). La Cordillera de Talamanca es la que presenta la altitud máxima en Costa Rica con 3820 msnm, su forma angosta y con fuerte influencia de las vertientes pacífico y caribe, genera cambios drásticos en variables climáticas en distancias muy reducidas (Berner, 1992).

Especies evaluadas

La selección de las cinco especies se realizó según la importancia de representación de las mismas, en su distribución. Se utilizó la información de las colecciones de especies de plantas del Herbario Nacional de Costa Rica (CR) por medio de la página digital del Herbario Nacional de Costa Rica (CR) (Ecobiosis, 2016) y visitas

a la colección física, base de datos de Trópicos (Mobot, 2016) Missouri Botanical Garden (MO), base de datos ATTA (INBio, 2016) y datos de campo en recorridos sobre el Parque Nacional Volcán Irazú. Se recopiló un total de 718 ocurrencias en todas las cinco especies, distribuidas según se observa en el cuadro 1.

Se consideró varios criterios de selección de las especies a estudiar, algunos de ellos son: número mínimo de ocurrencias para cada especie según lo recomendado para el programa MaxEnt, especies que se consideren importantes y se ubiquen de forma natural en zonas altas de Costa Rica, facilidad de identificación, entre otros. Además, se destacó el nivel de categoría según la metodología de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en investigaciones realizadas (Rodríguez et al., 2011).

La especie *Vaccinium consanguineum* es conocida por su importancia alimenticia, los frutos en general del género *Vaccinium* sp. son muy cotizados para diferentes usos comestibles, conocido como arándanos con altos valores nutricionales (Hine-Gómez y Abdelnour-Esquivel, 2013).

Rodríguez et al. (2011) sostiene que especies como *M. donnellsmithii* y *C. arbutoides* se encuentran en la una categoría de severamente fragmentada y la especie *I. pallida* con poblaciones raras y aisladas, muy vulnerable por su distribución actual.

Datos de clima

La información sobre las variables climáticas se obtuvo de Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005) con una resolución espacial de 0,93 x 0,93 km equivalente a 0,86 kilómetros cuadrados (Cuadro 2). Todas las capas fueron modificadas al tamaño de Costa Rica para su análisis con MaxEnt. Dichas variables contienen información de la combinación de temperatura y precipitación en diferentes épocas del año. Los datos corresponden a proyecciones a medio y largo plazo, además de la información del clima en los últimos años (1950-2000) de estaciones meteorológicas de todo el planeta (Hijmans et al., 2005).

Cuadro 1. Información general de las cinco especies evaluadas en las zonas altas de Costa Rica.

Table 1. Overview of the five species evaluated in the highlands of Costa Rica.

Nombre científico	Nombre común	Ocurrencias	Importancia de la especie
<i>Comarostaphylis arbutoides</i>	Arrayán	123	Formación de rodales
<i>Myrrhidendron donnellsmithii</i>	Arracachillo	119	Distribución restringida en Costa Rica
<i>Ilex pallida</i>	Azulillo	119	Distribución restringida mundial
<i>Quercus costaricensis</i>	Roble, Encino	118	Formación de rodales
<i>Vaccinium consanguineum</i>	Arándano	239	Usos, frutos comestibles

Cuadro 2. Variables ambientales utilizadas en MaxEnt para generar los modelos de nicho ecológico.

Table 2. Environmental variables used in Maxent to generate ecological niche models.

Variabes	Descripción
bio_1	Temperatura media anual (°C)
bio_2	Rango medio diario (Media de la mensual (temperatura máxima temperatura mínima) (°C)
bio_3	Isotermalidad (Bio_2/Bio_7) x (100) (°C)
bio_4	Estacionalidad de la Temperatura (desviación estándar x 100) (°C)
bio_5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
bio_6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
bio_7	Rango anual de temperatura (bio_5 x bio_6) (°C)
bio_8	Temperatura media del cuarto más húmedo (°C)
bio_9	Temperatura media del cuarto más seco (°C)
bio_10	Temperatura media del cuarto más caluroso (°C)
bio_11	Temperatura media del cuarto más frío (°C)
bio_12	Precipitación anual (mm)
bio_13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
bio_14	Precipitación del mes más seco (mm)
bio_15	Estacionalidad en las precipitaciones (Coeficiente de variación) (mm)
bio_16	Precipitación del cuarto más húmedo (mm)
bio_17	Precipitación del cuarto más seco (mm)
bio_18	Precipitación del cuarto más caluroso (mm)
bio_19	Precipitación del cuarto más frío. (mm)

Análisis de datos

El programa utilizado para el modelado de especies corresponde a MaxEnt 3.3.3k. Este programa funciona con algoritmos que predicen el potencial de distribución de las especies en relación con las condiciones ambientales conocidas y recopiladas a través del tiempo (Phillips et al., 2006) y se considera como uno de los programas más eficientes en dichas predicciones (Elith et al., 2006). Se calibró con las siguientes especificaciones para todos los casos: con los puntos reportados de colecta en visitas de campo y herbarios, el 75% de las ocurrencias para el entrenamiento del modelo y el 25% restante para realizar su respectiva validación, según sugieren varios autores (Alba-Sánchez et al, 2010). Además, se configuró con un umbral de convergencia de 0,00001 y como límite superior de corrida un valor de 10000 interacciones según recomienda Phillips et al, (2006).

Para los resultados de salida utilizados para MaxEnt se eligió el formato logístico ya que presenta facilidad para la interpretación en programas de sistemas de Información geográfica (Phillips & Dudík, 2008); para la visualización y configuración de las capas y mapas generados se utilizó Arcgis 10.2 y QGIS 2.8. Se convirtieron las capas raster en binomial de presencia-ausencia utilizando umbrales de corte que maximiza la sensibilidad y la especificidad del modelo, generaron datos de distribución cercanas

a las probabilidades reales de encontrar la especie en el sitio previsto.

Para cada especie se realizaron modelos predictivos con la distribución potencial actual y dos proyecciones a los años 2050 (promedio de 2041-2060) y 2070 (promedio de 2061-2080).

Se utilizaron los escenarios climáticos de trayectorias de concentración representativas (RCP) en tres diferentes circunstancias: RCP 2,6 (mitigación), RCP 4,5 (estabilización) y RCP 8,5 (aumento considerable en las emisiones de carbono equivalente) utilizadas por el IPCC en el quinto informe (Hijmans et al., 2005; IPCC, 2013). Los RCP están representados por el valor de forzamiento relativo W/m², que corresponde con la energía solar media absorbida por metro cuadrado sobre la tierra. Se utilizaron todos los RCP disponibles en la página de Worldclim (Hijmans et al., 2005) con un total de 15 Modelos de Circulación Global (GCM) para el escenario RCP 2,6; además 19 y 17 GCM en los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 respectivamente.

Evaluación de los modelos

Fueron valorados mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC). Los valores de AUC de 0,5 a 0,7 por lo general tienen una baja confianza, los valores de 0,7 -

Cuadro 3. Área de distribución de nicho ecológico actual y los porcentajes de cambio en las diferentes trayectorias de concentración representativas (RCP) para las especies seleccionadas, zonas altas de Costa Rica

Table 3. Range of current ecological niche and rates of change in different representative concentration pathways (RCP) for selected species highlands of Costa Rica

Especie	Actual (km ²)	Año 2050 (%)			Año 2070 (%)		
		RCP2,6	RCP4,5	RCP8,5	RCP2,6	RCP4,5	RCP8,5
<i>Comarostaphylis arbutoides</i>	1351,06	3,50	-30,17	-69,76	7,83	-48,25	-64,80
<i>Ilex pallida</i>	3214,68	10,27	15,57	-12,87	13,35	1,28	-21,72
<i>Myrrhidendron donnellsmithi</i>	756,80	7,50	32,05	-12,39	34,66	-23,86	-46,82
<i>Quercus costaricensis</i>	1687,32	-7,70	-24,26	-41,49	-5,35	-37,05	-55,50
<i>Vaccinium consanguineum</i>	2153,44	1,80	-13,66	-36,30	-8,51	-21,53	-56,67

0,9 tienen una aplicación útil en el modelo y los valores mayores a 0,9 tienen una alta confianza (Lobo, Jiménez-Valverde & Real, 2007), razón por la cuál se descartaron todos los modelos que produjeron valores inferiores a 0,7 en el AUC.

Las variables climáticas son la combinación de temperatura y precipitación, por lo que pueden estar correlacionadas entre sí. Para comprobar la certeza y el aporte de cada variable de forma individual, se utilizó el test Jackknife el cual tiene como función principal correr cada modelo con cada variable por si sola para medir el aporte de la variable particular (Shcheglovitova & Anderson, 2013).

Evaluación de los modelos

Fueron valorados mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC). Los valores de AUC de 0,5 a 0,7 por lo general tienen una baja confianza, los valores de 0,7 - 0,9 tienen una aplicación útil en el modelo y los valores

mayores a 0,9 tienen una alta confianza (Lobo, Jiménez-Valverde & Real, 2007), razón por la cuál se descartaron todos los modelos que produjeron valores inferiores a 0,7 en el AUC.

Las variables climáticas son la combinación de temperatura y precipitación, por lo que pueden estar correlacionadas entre sí. Para comprobar la certeza y el aporte de cada variable de forma individual, se utilizó el test Jackknife el cual tiene como función principal correr cada modelo con cada variable por si sola para medir el aporte de la variable particular (Shcheglovitova & Anderson, 2013).

Resultados

De las cinco especies en estudio, *Ilex pallida* es la única especie que presenta ganancia de todas las proyecciones en área de los escenarios RCP 2,6 y RCP 4,5 con respecto a la distribución potencial actual (Cuadro 3).

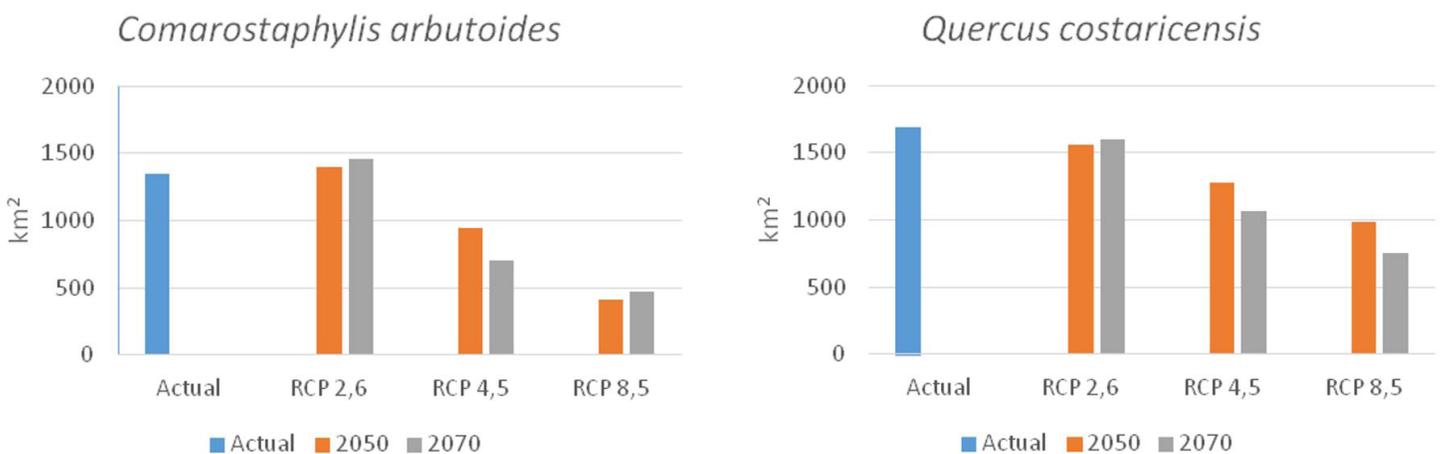


Figura 2. Distribución del área potencial en Costa Rica para dos especies seleccionadas que forman rodales: *Comarostaphylis arbutoides* y *Quercus costaricensis* en los escenarios RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 8,5; proyectados al 2050 y 2070 con MaxEnt.

Figure 2. Potential distribution area in Costa Rica for two selected species that form stands: *Comarostaphylis arbutoides* and *Quercus costaricensis* in CPR 2,6, RCP 4,5, RCP 8,5 scenario; projected to 2050 and 2070 with Maxent.

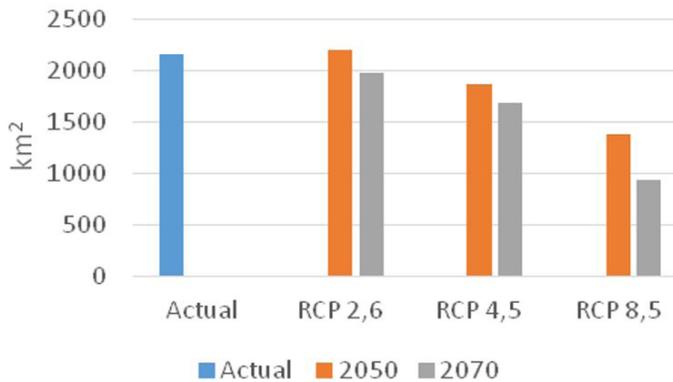


Figura 3. Distribución del área potencial en Costa Rica para la especie *Vaccinium consanguineum* de importancia por sus usos, en los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5; proyectados al 2050 y 2070 con MaxEnt.

Figure 3. Potential distribution area in Costa Rica for the species *Vaccinium consanguineum* of importance for their use in the RCP 2.6 scenario, RCP 4.5, 8.5 RCP; projected to 2050 and 2070 with Maxent.

Además, es la especie que tiene una distribución más amplia con respecto a las otras, con 3214,68 km² en la distribución actual.

En todas las proyecciones bajo el escenario RCP 8,5 tienden a disminuir en área en comparación a la distribución actual, siendo la especie más afectada el árbol *Comarostaphylis arbutoides* con una pérdida de 942,56 km² (-69,76%) para el año 2050 y 875,48 km² (-64,80%) para el año 2070 (Cuadro 3).

Las dos especies seleccionadas para este trabajo, *C. arbutoides* y *Q. costaricensis* comparten la característica principal de formar rodales puros (González 2005), e integran un comportamiento similar entre ellas (Figura 2). Sin embargo, el escenario RCP 2.6 para la especie *C. arbutoides* tiende a aumentar el área en las proyecciones de 2050 y 2070 con valores de 47,3 km² y 105,78 km² respectivamente, en relación al nicho ecológico actual (1351,06 km²). Para *Q. costaricensis*, los escenarios y proyecciones a mediano y largo plazo tienden a disminuir gradualmente, al punto que el RCP 8,5 a largo plazo puede tener un valor de 750,78 km², representando una pérdida de más de la mitad del área predicha para el nicho ecológico actual (1687,32 km²).

La disminución en el escenario RCP 8,5 equivale a casi la mitad del nicho ecológico actual para la especie *V. consanguineum* (Figura 3), siendo de las pérdidas más importantes de las especies seleccionadas en este trabajo. Es así, donde pasa de 2153,44 km² a valores de 1371,7 km² en mediano plazo (año 2050) y baja a 933,1 km² a largo plazo (año 2070).

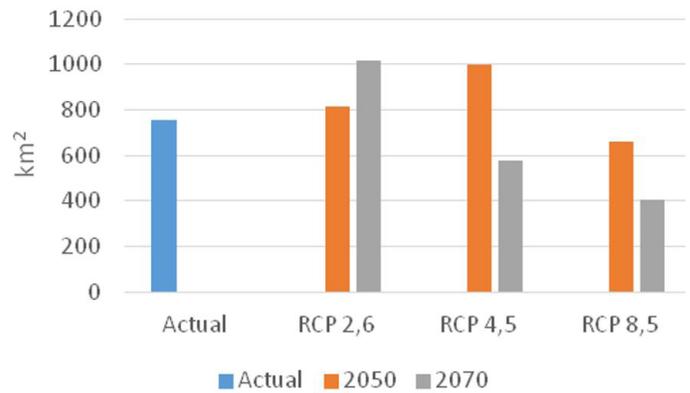


Figura 4. Distribución del área potencial en Costa Rica para la especie *Myrrhidendron donnellsmithi* con distribución restringida en el país, en los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5; proyectados al 2050 y 2070 con MaxEnt.

Figure 4. Potential distribution area in Costa Rica for the species with restricted *Myrrhidendron donnellsmithi* in the country, in the RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 scenario distribution; projected to 2050 and 2070 with Maxent.

En la figura 4 se aprecia la variabilidad que existe entre los tres escenarios para la especie *M. donnellsmithi*, ya que en el escenario RCP 2,6 el área aumenta con respecto al nicho potencial actual, pasa de tener 756,80 km² a valores superiores en las dos proyecciones estudiadas, se obtuvo 813,56 km² a mediano plazo y un total de 1019,10 km² a largo plazo. Para el escenario RCP 4,5 la proyección a mediano plazo tiene la mayor disponibilidad de área con 999,32 km², sin embargo, baja súbitamente con 576,20 km² en la proyección a largo plazo. El escenario RCP 8,5 si disminuyen ambas proyecciones en relación al nicho ecológico actual, con una pérdida de 46,82 % del área (Cuadro 3).

La especie *Ilex pallida* tiene la mayor distribución en el gradiente altitudinal de las cinco especies seleccionadas para este estudio. Para los escenarios RCP 2,6 y RCP 4,5 el área aumenta con respecto al nicho ecológico actual, asegurando nuevos terrenos de zonas altas con características similares a las actuales (Figura 5).

Las dos variables climáticas que mayor porcentaje de contribución aportaron para el modelaje de los nichos ecológicos para cada especie (Cuadro 4) fueron derivadas directas de la temperatura. Estos resultados se corroboraron con la prueba de Jackknife para detectar posibles correlaciones entre mismas variables. La temperatura promedio en el trimestre más seco (bio_9) y más frío (bio_11) obtuvieron valores mayores y más altos para dos especies. Sin embargo, las variables de temperatura máxima del periodo más caliente (bio_5) y la temperatura medio en el trimestre más lluvioso (bio_8) se frecuentaron en tres ocasiones cada uno para las cinco especies seleccionadas en este trabajo.

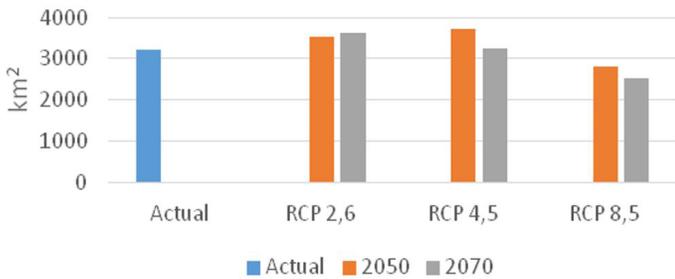


Figura 5. Distribución del área potencial en Costa Rica para la especie *Ilex pallida* con distribución restringida mundial, en los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5; proyectados al 2050 y 2070 con MaxEnt.

Figure 5. Potential distribution area in Costa Rica for the species *Ilex pallida* with restricted distribution in the RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 scenario; projected to 2050 and 2070 with MaxEnt.

Discusión

La distribución actual de las cinco especies seleccionadas ha sido ubicada en altitudes superiores a 1500 msnm (ITCR, 2014). En este tipo de elevaciones, el relieve se convierte en factor determinante, además del tipo de

suelo y la composición florística de las montañas altas ejercen influencia como limitante para la sobrevivencia a variaciones extremas en la temperatura (Guariguata y Kattan, 2003). Los modelos generados para las cinco especies tuvieron como principales determinantes capas con variables climáticas que derivan de la temperatura en un periodo de tiempo (Cuadro 4).

El comportamiento de la especie *M. donnellsmithii* (Figura 6) en los diferentes escenarios de cambio climático, tiene un planteamiento muy desigual entre escenarios RCP. La variabilidad de factores que influyen a las especies en zonas altas y tener una distribución muy limitada en comparación a las demás especies puede ocasionar que *M. donnellsmithii* obtenga una incertidumbre mayor en el comportamiento de los modelos que se generaron en MaxEnt.

Estudios realizados por Hidalgo, Amador, Alfaro y Quesada (2013) en Centroamérica, estiman una reducción de la precipitación media entre 5 - 10 % para el periodo proyectado a futuro (entre 2050-2099), mientras que las temperaturas podrían cambiar hasta 4 °C en el mismo periodo, este último genera mayor impacto en las contribuciones de las variables para el modelado de las cinco especies estudiadas.

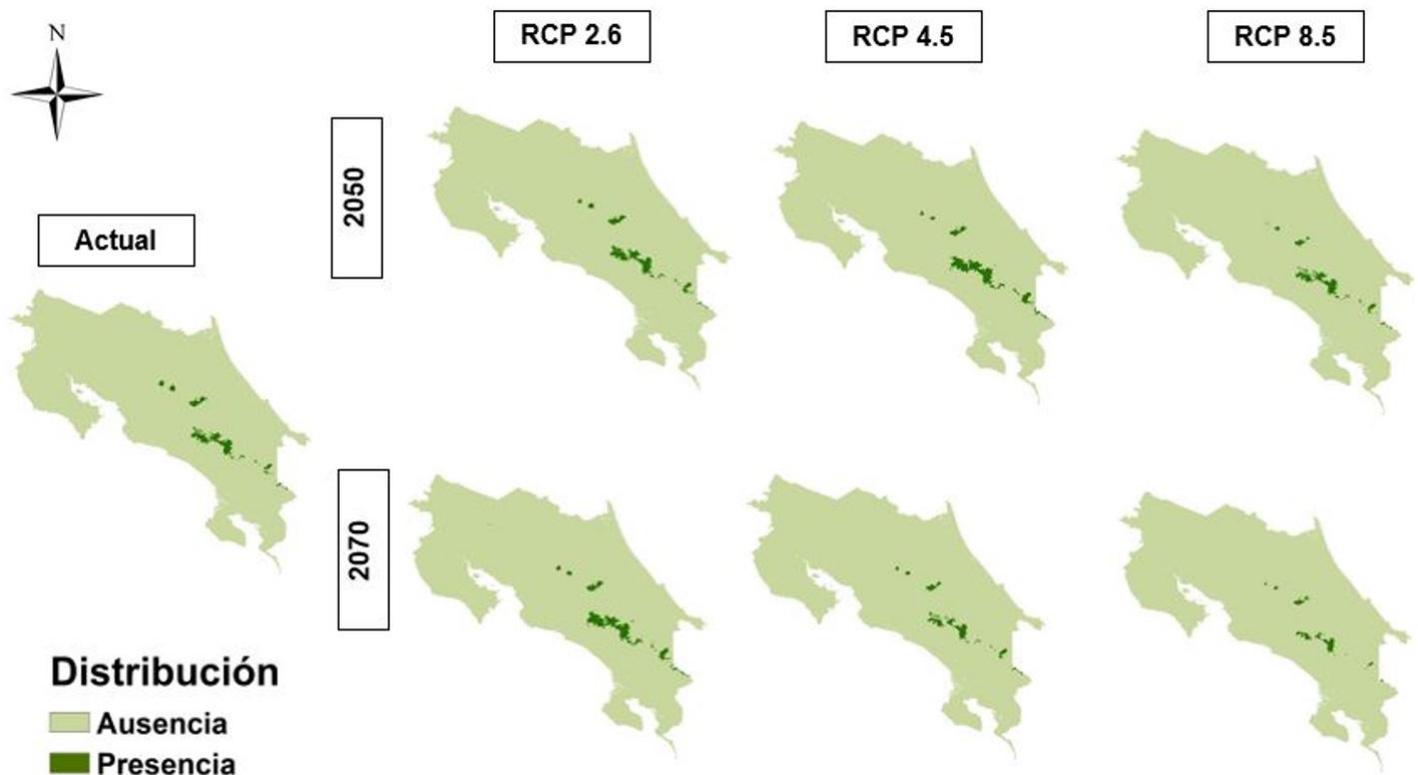


Figura 6. Distribución potencial de la especie *Myrrhidendron donnellsmithii* proyectado para los años 2050 y 2070, en tres escenarios de cambio climático: mitigación (RCP 2,6), estabilización (RCP 4,5) y aumento drástico de emisiones de CO2 (RCP 8,5) en zonas altas de Costa Rica.

Figure 6. potential distribution of the species *Myrrhidendron donnellsmithii* projected for the years 2050 and 2070 in three scenarios of climate change: mitigation (RCP 2.6), stabilization (RCP 4.5) and dramatic increase in CO2 emissions (RCP 8.5) in highlands of Costa Rica.

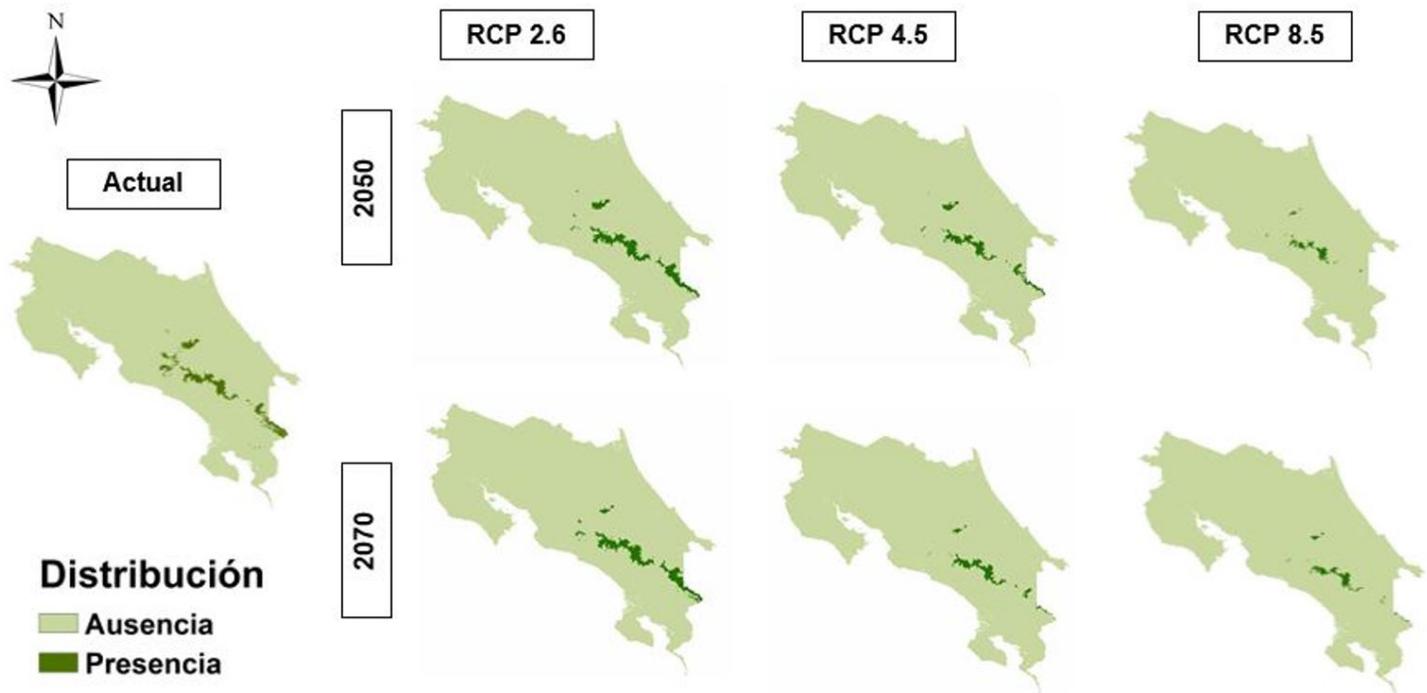


Figura 7. Distribución potencial de la especie *Comarostaphylis arbutoides* proyectado para los años 2050 y 2070, en tres escenarios de cambio climático: mitigación (RCP 2,6), estabilización (RCP 4,5) y aumento drástico de emisiones de CO2 (RCP 8,5) en zonas altas de Costa Rica.

Figure 7. Potential distribution of the species *Comarostaphylis arbutoides* projected for the years 2050 and 2070 in three scenarios of climate change: mitigation (RCP 2.6), stabilization (RCP 4.5) and dramatic increase in CO2 emissions (RCP 8.5) in highlands of Costa Rica.

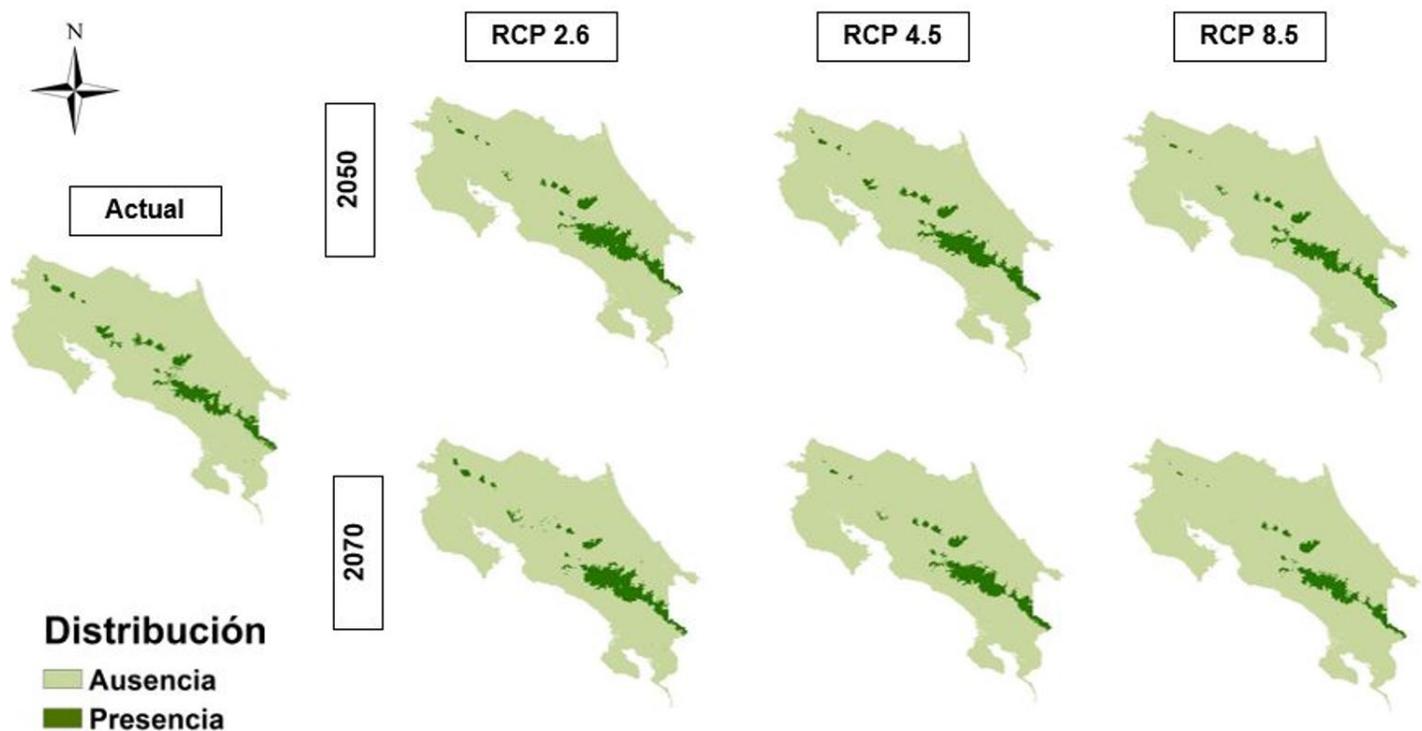


Figura 8. Distribución potencial de la especie *Ilex pallida* proyectado para los años 2050 y 2070, en tres escenarios de cambio climático: mitigación (RCP 2,6), estabilización (RCP 4,5) y aumento drástico de emisiones de CO2 (RCP 8,5) en zonas altas de Costa Rica.

Figure 8. Potential distribution of the species *Ilex pallida* projected for the years 2050 and 2070 in three scenarios of climate change: mitigation (RCP 2.6), stabilization (RCP 4.5) and dramatic increase in CO2 emissions (RCP 8.5) in highlands of Costa Rica.

Los cambios de temperatura y precipitación en Costa Rica son muy variables en distancias muy cortas (Guariguata y Kattan, 2003) lo que aumenta el error en las bases de datos como Worldclim en zonas altas (Hijmans et al., 2005). Con una cordillera que alcanza la altura máxima de 3820 msnm en el cerro Chirripó (Kappelle, 2008) y la cercanía con la vertiente pacífica y atlántica (Figura 1), los modelos de predicción (como MaxEnt) generan como respuesta una pérdida en el área de distribución de especies que se encuentran en mediana o alta gradiente altitudinal (Veintimilla, 2013).

Desde el punto de vista de la conservación, las predicciones son muy desfavorables para todas las especies en la proyección de RCP 8,5 con disminuciones que llegan a valores de 69,76% en pérdida de área con respecto al escenario actual en *C. arbutoides* (figura 7). Las zonas más afectadas se ubican en el sector del pacífico central y partes bajas del Parque Internacional La Amistad. Según Guariguata y Kattan (2003), los posibles cambios en la temperatura y precipitación generan cambios significativos en la distribución de zonas de vida, esto provoca amenazas en las actuales áreas protegidas.

Para las trayectorias de concentración representativas (RCP) 2,6 el IPCC estimó el aumento de 0,3-1,7 °C en la

temperatura global (IPCC, 2014) para el año 2100. Este aumento mínimo de temperatura se puede dar gracias a la implementación de energías limpias y renovables a nivel mundial, mediante compromisos políticos como París 2015; puede beneficiar a largo plazo la distribución de las especies en comparación a los escenarios más pesimistas. Según las predicciones modeladas de las cinco especies seleccionadas en este trabajo, la mayoría tendrá ganancia en área para invadir, con características climáticas similares a las que se desarrollan en la actualidad en el escenario RCP 2,6.

Según Veintimilla (2013), en los modelos proyectados a futuro, las especies que se encuentran en montañas altas, el rango inferior de distribución tiende a reducirse; forma contraria aquellas especies de partes bajas o medias, donde tienen la posibilidad de colonizar en el rango superior de la distribución altitudinal. Las cinco especies seleccionadas en este trabajo se encuentran en su mayoría por encima de los 1500 msnm. en terrenos de relieve desfavorable y suelos diversos, lo que facilita que sean especies muy vulnerables a su capacidad de readaptación debido a su crecimiento lento (González, 2005). La especie *I. pallida* (figura 8) mantiene sus proyecciones en un rango de distribución más amplio, de está forma beneficia la reacción en el tiempo ante cambios drásticos de temperatura y precipitación.

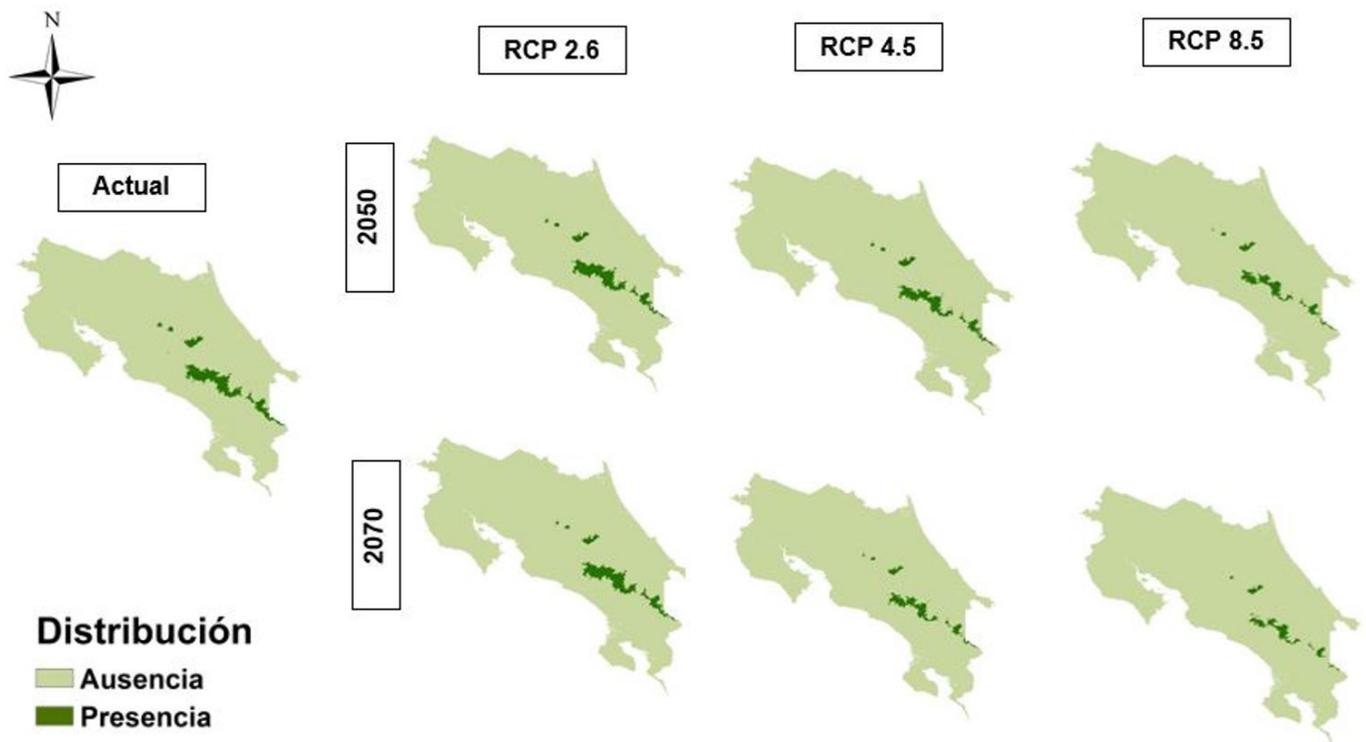


Figura 9. Distribución potencial de la especie *Vaccinium consanguineum* proyectado para los años 2050 y 2070, en tres escenarios de cambio climático: mitigación (RCP 2,6), estabilización (RCP 4,5) y aumento drástico de emisiones de CO2 (RCP 8,5) en zonas altas de Costa Rica.

Figure 9. Potential distribution of the species *Vaccinium consanguineum* projected for the years 2050 and 2070 in three scenarios of climate change: mitigation (RCP 2.6), stabilization (RCP 4.5) and dramatic increase in CO2 emissions (RCP 8.5) in highlands of Costa Rica.

Las especies del género *Vaccinium* spp. son de gran importancia para la fauna, sus frutos comestibles (González, 2005) se consideran además de gran interés económico para agricultores de zonas altas, debido al valor medicinal y nutricional de los frutos (Hine-Gómez y Abdelnour-Esquivel, 2013). En particular, *V. consanguineum* (figura 9) es una especie muy dominante en zonas de páramo por lo que es preocupante que todas las proyecciones son negativas, esta pérdida puede ser aprovechada por especies colonizadoras, las cuales pueden generar variaciones importantes en el equilibrio ecológico con otras plantas o animales del entorno.

Los bosques de robles o encinos (*Quercus* spp.) son una gran herencia del intercambio biótico entre el Sur y el Norte de América en los periodos glaciares (Kappelle, 2008). Según se aprecia en la figura 10, *Quercus costaricensis* tiene pérdidas netas en todas las proyecciones con respecto al área actual. Al visualizar las capas y la dinámica de la especie en los modelos generados, se logra apreciar la disminución del área en las cercanías del Pacífico Central, mientras que el Parque Internacional La Amistad (PILA) su comportamiento es constante en las zonas cercanas a Panamá. Según Kappelle (1994) los bosques de roble en la cordillera de Talamanca han sido muy amenazados en los últimos 100 años por la explotación forestal comercial y la extensión

de la agricultura. La degradación ha fomentado zonas de fragmentación a una tasa alarmante. Aunque Kappelle (1995) considera la Reserva Forestal Los Santos (hoy Parque Nacional Los Quetzales) como crucial para la biodiversidad en futuras generaciones, las modelaciones en este trabajo generan un valor contrario, pérdida considerable del área por condiciones climáticas adversas en el futuro.

Ranganathan y Daily (2008) sostienen que las áreas protegidas son una estrategia fundamental para la conservación futura de la biodiversidad, sin embargo, solo aseguran la supervivencia de las especies en el futuro. Por ello, expandir la conservación en los paisajes rurales aumenta la posibilidad de conexión entre las áreas protegidas y generan una oportunidad de disminuir la fragmentación. Además, con el cambio climático y las permutaciones en las variables climáticas, la posibilidad del movimiento de las zonas de vida a altitudes superiores genera traslado de la composición florística dentro de las áreas protegidas (Guariguata y Kattan, 2003).

Conclusiones

- Las variables climáticas más determinantes para la creación de los modelos de nicho ecológico actual, mediano y largo plazo son derivadas de la temperatura,

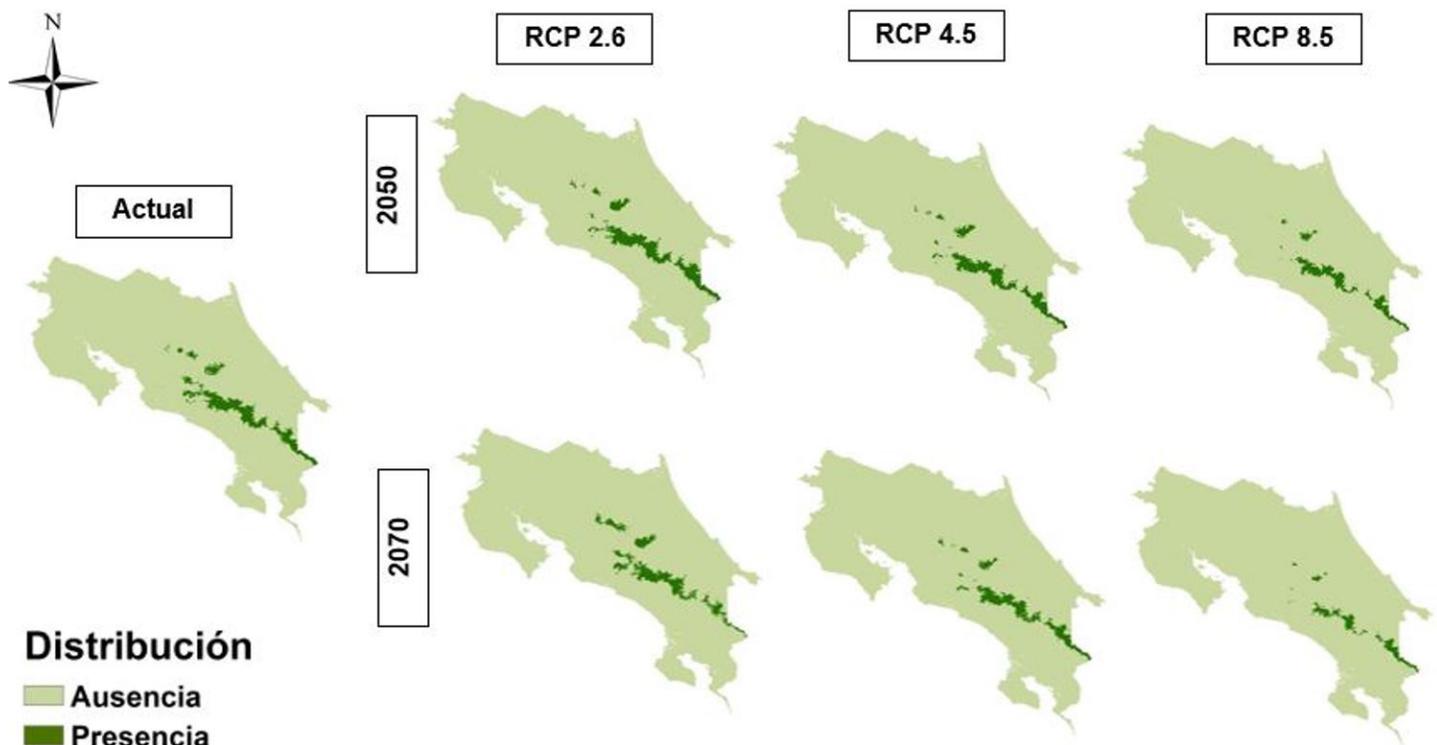


Figura 10. Distribución potencial de la especie *Quercus costaricensis* proyectado para los años 2050 y 2070, en tres escenarios de cambio climático: mitigación (RCP 2,6), estabilización (RCP 4,5) y aumento drástico de emisiones de CO2 (RCP 8,5) en zonas altas de Costa Rica.

Figure 9. Potential distribution of the species *Quercus costaricensis* projected for the years 2050 and 2070 in three scenarios of climate change: mitigation (RCP 2.6), stabilization (RCP 4.5) and dramatic increase in CO2 emissions (RCP 8.5) in highlands of Costa Rica.

mientras que la precipitación tiene aportes mínimos en cuanto a las modificaciones que se predicen a mediano y largo plazo.

- La especie *Quercus costaricensis* presenta pérdidas en el área a ocupar en todos los modelos proyectados a mediano o largo plazo. Sin embargo, presenta mejoras en la capacidad de desplazamiento en las zonas altas de la cordillera de Talamanca, cerca de Panamá, contrario en la zona Pacífico Central donde disminuirá de forma preocupante.
- En el escenario pesimista (RCP 8,5) las cinco especies seleccionadas en este trabajo tendrán pérdidas importantes de hábitat, en algunos casos con valores cercanos al 69 % en la disminución.
- Los esfuerzos de conservación y políticas deben ir orientados a lograr los resultados del escenario de mitigación RCP 2,6 para garantizar el menor impacto del cambio Climático a mediano o largo plazo.
- Las zonas con mayor impacto o desplazamiento de las especies según los modelos se ubican en el Sector Noroeste de Costa Rica. Además, algunos sectores de la Zona Central del país pueden quedar severamente fragmentadas, como los siguientes: Parque Nacional Poás, Parque Nacional Volcán Irazú y Parque Nacional Turrialba.

Recomendaciones

- Realizar los análisis para mayor cantidad de especies de flora y fauna, con especies invasoras.
- Utilizar otras variables que no fueron consideradas en este trabajo que podrían presentar o tener influencia sobre la distribución de las plantas. De esta forma se puede mejorar la calidad de predecir y prevenir los efectos del cambio climático a mediano o largo plazo. Algunas variables pueden ser: tipo de suelo, altitud, zonas de vida y tipo de cobertura.
- Establecer parcelas permanentes en distintas zonas altitudinales y en sectores diversos para cuantificar las respuestas ecofisiológicas de las especies, que pueden ocasionar forma paulatina, cambios en la distribución por efecto del cambio climático.
- Realizar la evaluación de la incertidumbre de los modelos con base en los procedimientos y parámetros que recomienda el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para trabajos similares en el quinto informe.
- Reforzar las zonas fuera de las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) estableciendo convenios con municipalidades, Asociaciones Administradoras de

Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ASADAS) con el fin de fortalecer las nacientes, riveras de los ríos y lugares degradados.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento brindado al proyecto: Efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de especies de plantas en el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) basado en simulaciones a mediano y largo plazo.

Referencias

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito de Pando, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: A phytogeographic approach using pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2): 214-228.
- Alsos, I., Alm, T., Normand, S., & Brochmann, C. (2009). Past and future range shifts and loss of diversity in dwarf willow (*Salix herbacea* L.) inferred from genetics, fossils and modeling. *Global Ecology and Biogeography*, 18:223-239.
- Berner, P. (1992). Effects of slope on the dynamics of a tropical montane oak-bamboo forest in Costa Rica. Ph.D. dissertation. Gainesville, US, University of Florida.
- Castaño, C. (2002). Páramos y Ecosistemas Altoandinos de Colombia en condición hotspot y Global Climatic Tensor. Bogotá, Colombia. IDEAM.
- Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A. et al. (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.
- González, L. (2005). Árboles y arbustos comunes del Parque Internacional La Amistad. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto nacional de Biodiversidad. 288p.
- Guariguata, M. y Kattan, G. H. (2003). Ecología y conservación de Bosques Neotropicales. (Primera reimpresión) Cartago, Costa Rica: LUR.
- Hidalgo, H.G., Amador, J.A., Alfaro, E.J. & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, 495: 94-112.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978pp
- Hine-Gómez, A. y Abdelnour, A. (2013). Establecimiento in vitro de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.). *Tecnología en Marcha*, 26(4): 64-71.
- Instituto Nacional de Biodiversidad, Costa Rica (2016) Atta, base de datos. Recuperado de <http://atta.inbio.ac.cr/>
- IPCC. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Cambridge, New York. Cambridge University Press. 881p.
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Billir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza, 34p.
- ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). (2014). Atlas de Costa Rica 2014 (CD-ROM). Cartago, Costa Rica, ITCR 1 CD-ROM.
- Kappelle, M. (1994). Los bosques de roble (*Quercus*) de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad. 336p.
- Kappelle, M. (1995). The Los Santos Forest Reserve: A Buffer Zone Vital for the Costa Rican La Amistad Biosphere Reserve. *Environmental Conservation*, 21(02):166 - 169.
- Kappelle, M. y Horn, S. (2005). Páramos de Costa Rica. Distribución, impacto humano y conservación de los Páramos neotropicales. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad. 711p.
- Kappelle, M. (2008). Biodiversidad de los bosques de roble (encino) de la América tropical. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad. 336p.
- Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A. & Real, R. (2007). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2):145-151.
- Missouri Botanical Garden. (2016). TROPICOS, base de datos. Recuperado de: <http://www.tropicos.org/>
- Morales, N. (2012). Modelos de distribución de especies: Software MaxEnt y sus aplicaciones en Conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2(1): 1-3pp.
- Phillips, S., Anderson, R. & Sphapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(2006): 231-259.
- Phillips, S. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2008): 161-175.
- Pliscoff, P. y Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelamiento de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 48(2011): 48-61
- QGIS. (Quantum GIS Development Team). (2016). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- Ranganathan, J. y Daily, G.C. (2008). La biogeografía del paisaje rural: oportunidades de conservación para paisajes de Mesoamérica manejados por humanos. In: C. A. Harvey y J.C. Sáenz (Ed.) *Evaluación y conservación de biodiversidad en paisajes fragmentados de Mesoamérica*. 624pp. 15-30. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto nacional de Biodiversidad.
- Rodríguez, A., Monro, A.K., Chacón, O., Solano, D., Santamaría, D., Zamora, N., González, F. & Correa, M. (2011). Regional and global conservation assessments for 200 vascular plant species from Costa Rica and Panamá. *Phytotaxa* 21(2011): 1-216.
- Rosenzweig, M.L. (1995). *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Shcheglovitova, M. & Anderson, R. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small simple sizes. *Ecological Modelling*. 269(2013): 9-17.
- Varela, S., Mateo.R.G., García-Valdés, R. y Fernández-González, F. (2014). Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Ecosistemas*, 23(1): 46-53.
- Veintimilla, D.A. (2013). Identificación y caracterización de tipos de bosque tropical sobre un gradiente altitudinal en Costa Rica: el caso "Caribe-Villa Mills". Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica: CATIE. 125p.