

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Generación de modelos de distribución de ecosistemas vulnerables al cambio climático*

[Generation of distribution models of vulnerable ecosystems towards climate change]

**ELENA POSADA¹, HÉCTOR MAURICIO RAMÍREZ-DAZA²,
PAOLA ISAACS-CUBIDES³, MARTHA PAOLA BARAJAS-BARBOSA⁴**

RECIBO: 15.09.2010 - AJUSTE: 11.10.2010 - APROBACIÓN: 11.12.2010

Resumen

Se presenta un avance de los resultados del proyecto “Uso de sensores remotos y tecnologías asociadas para estudio de ecosistemas forestales ante el cambio climático global”, realizadas en el marco de la red temática FORCLIM patrocinado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Cyted). De dicha red temática hace parte el grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Oficina CIAF. En este contexto, como modelo metodológico se están trabajando datos de presencias del ecosistema páramo y bosque seco tropical, obtenidos de polígonos de cobertura de los ecosistemas continentales costeros y marinos del IDEAM–IGAC et al (2007). Se emplean datos de temperatura, precipitación y alturas

* Modelo para citación de este artículo:

POSADA, Elena; RAMÍREZ DAZA, Héctor Mauricio; ISAACS CUBIDES, Paola y BARAJAS BARBOSA, Martha Paola (2010). Generación de modelos de distribución de ecosistemas vulnerables al cambio climático. En: Ventana Informática. No. 23 (jul.-dic., 2010). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales. p. 9-27. ISSN: 0123-9678

- 1 Ingeniera Forestal, Magister en Ingeniería Forestal. Coordinadora del Grupo Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas PR/AG, CIAF – Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC Bogotá, Colombia. Correo electrónico: epossada@igac.gov.co.
- 2 Ingeniero Forestal, Candidato Maestría en Geografía. Grupo PR/AG, CIAF-IGAC, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: hmramirez@igac.gov.co
- 3 Ecóloga, Candidata Maestría en Geomática. Investigadora grupo PR/AG, CIAF-IGAC, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: pjisaacs@igac.gov.co
- 4 Bióloga. Investigadora grupo PR/AG, CIAF-IGAC, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mpbarajas@igac.gov.co

descargados del proyecto WorldClim, los cuales se han procesado con ArcGIS y DIVA-GIS, para ser modelados junto con los datos de presencia en el programa MaxEnt. El resultado del modelo expresa el valor de idoneidad como una función de las variables ambientales. Para el trabajo se ha empleado un escenario futuro de incremento en la temperatura de tres y cinco grados Celsius, para determinar el comportamiento de dichas coberturas ante el calentamiento global. Se obtuvieron mapas de idoneidad actuales y futuros presentando una elevada tendencia a la disminución del páramo y aumento de los bosques secos, siendo la altura la variable que más contribuye para el páramo y la precipitación para bosque seco. Se presenta un proceso metodológico el cual sirve como insumo para modelar distribución de especies, en este caso incluyendo algunas variables empleadas para estudiar cambio climático y su integración con los datos obtenidos de sensores remotos.

Palabras clave: Cambio climático, Distribución de especies, Red temática FORCLIM, Sensores remotos.

Abstract

We present progress in the results of the research "Remote sensing use and associated technologies for ecosystem spatial changes evaluation concerning global climate change, in the frame of the thematic net FORCLIM, sponsored for the Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Cyted). The Remote Sensing and Geographic Applications Group of the Instituto Geográfico Agustín Codazzi-CIAF is member of the net. In this sense, as a method we are using paramo and tropical dry forest ecosystem presence data obtained from the geodatabase of the continental and marine ecosystems of IDEAM-IGAC et al (2007). We are using temperature, precipitation and elevation data from WorldClim Project, which were processed with DIVA-GIS software in order to be modeled among the presence data with MaxEnt program. The model result shows the suitable value as a function of the environmental variables. For this work we used two future scenarios, the first with 3°C and the second with 5°C increment. The suitable paramo current models and paramo future models showed a considerable decreasing, for the tropical dry forest the distribution raised. We present a methodology process, which is helpful as an species distribution modeling input; according to the climatic variables, and data recovered from remote sensing techniques (presence data).

Keywords: Climate change, Remote sensing, Species distributions, Thematic net FORCLIM.

Introducción

Los ecosistemas forestales están en equilibrio con su entorno físico y climático, suponen el nivel más avanzado en la sucesión ecológica. El cambio climático global (CCG) modificará previsiblemente los escenarios actuales lo que influirá en la distribución espacial de los bosques y sus características y conllevará a la modificación de patrones existentes de convivencia entre el hombre y la naturaleza; en consecuencia afectará los sistemas socio-económicos y la calidad de vida de la población local (MAVDT, IDEAM y PNUD, 2008).

La intensidad y localización de estas modificaciones son desconocidas, pero su repercusión en las economías locales y en la diversidad biológica son previsiblemente importantes. Si el CCG continúa, la única forma de mitigar sus efectos es determinar las zonas de cambio y la intensidad del mismo, conocimiento que serviría para plantear directrices sobre políticas de preservación, prospección y estudio, así como para priorizar actuaciones en planes de gestión a medio y largo plazo (IDEAM, 2010).

La Red Temática propuesta partirá de su experiencia actual en técnicas de análisis espacial y estudio de la diversidad biológica para intercambiar conocimiento, consolidar medios y métodos y difundir técnicas de estudio de este fenómeno en un marco de apertura a la sociedad. Tiene como objetivos el Constituir una Red para el estudio y previsión de los efectos potenciales del CCG en los ecosistemas forestales de Iberoamérica. En este sentido, datos, métodos, resultados y documentación serán públicos y se potenciará el uso de herramientas de software libres. Los resultados esperados son la consolidación de una línea de trabajo con métodos estandarizados aplicable al análisis del problema central de la línea de investigación y utilizable por cualquier grupo u organización incluyendo a los países participantes. De esta red, son miembros Colombia, Ecuador, Bolivia, Argentina y España, la cual lidera la iniciativa y brinda el soporte y el apoyo a los temas y metodologías abordadas.

Estando de acuerdo a lo planteado por la red, para Colombia está representada por el grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas de la oficina del Centro de Investigación en Información Geográfica (CIAF) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Como Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica del IGAC, el CIAF maneja los mismos objetivos de la red ya que contribuye, a partir de la interacción de sus grupos temáticos relacionados con la ciencia Geomática, a generar, actualizar, integrar, difundir, aplicar y compartir

los resultados de sus proyectos, mediante la transferencia de conocimientos, la asesoría y consultoría y la cooperación técnica. Su estructura funcional, en torno a la gestión de la información y el conocimiento sirve como apoyo a los procesos de planificación y desarrollo integral del país y la región.

El grupo de Percepción Remota, del cual hace parte el CIAF tiene por objetivo «Fomentar en el ámbito nacional el uso de las imágenes provenientes de sensores remotos para el estudio de los recursos naturales y la toma de decisiones en el marco de la planificación territorial, mediante la investigación, generación de propuestas metodológicas, capacitación, transferencia de tecnologías y la prestación de asesorías especializadas» (IGAC, 2010).

Tiene como misión investigar sobre los avances científicos y tecnológicos de la percepción remota a nivel mundial, para su adopción a las condiciones de Colombia, promoviendo los proyectos de investigación con aplicación práctica, conjunta e interdisciplinaria entre las áreas técnicas del IGAC y otros grupos que pueden beneficiarse del uso información geoespacial y proyectando los resultados a través de la docencia, asesoría y consultoría. Su visión es consolidarse como un grupo líder con proyección internacional en investigación, desarrollo tecnológico e innovación en el campo de la percepción remota, para su aplicación a nivel de Colombia y de Latinoamérica y el Caribe, reafirmando la integración armónica entre la ciencia y la sociedad.

Recientemente se esta desarrollando una serie de técnicas aplicadas a la generación de modelos de distribución de especies y más específicamente a la modelación de esta distribución y los efectos de los cambios en aquellas variables que determinan la presencia de la especie. Los modelos de distribución de especies indican la idoneidad o aptitud del hábitat para el desenvolvimiento optimo de las poblaciones de una especie particular o de las comunidades, calculada a partir de observaciones de campo y una serie de variables ambientales que actúan como predictoras o covariables (Phillips *et al.*, 2006).

Gracias al creciente desarrollo tecnológico de los sistemas, la difusión y acceso a la geoinformación y al avance en tecnologías geomáticas, especialmente en sensores remotos que son el insumo principal de base, los modelos son cada vez más robustos en sus predicciones y admiten incluir mayor cantidad de atributos. Estos modelos, son de vital importancia ya que son insumo para los tomadores de decisión en conservación y manejo, determinar posibles zonas de presencia de especies desconocidas o evaluar el impacto del cambio climático

global sobre la distribución de los organismos (Lawler *et al.*, 2006; Ruiz-Murcia, 2010).

El presente documento pretende abordar una metodología de aplicación de los modelos de distribución de especies en ecosistemas de bosque andino usando datos climáticos de la red *WorldClim* y escenarios actuales y futuros de cambio climático. Esto se hizo, para determinar los cambios ocurridos en dicha cobertura ante un eventual incremento de temperatura, incluyendo algunas de las variables que influyen sobre estos ecosistemas ante el calentamiento global. Para su realización se emplearon los programas, *MaxEnt* que permite modelar los datos de distribución de especies y determinar modelos de idoneidad y el programa DIVAGIS, ambos de libre disponibilidad en la red.

1. Marco teórico

El cambio climático global (CCG) modificará previsiblemente los escenarios actuales lo que influirá en la distribución espacial de los ecosistemas y sus características y conllevará a la modificación de patrones existentes de convivencia entre el hombre y la naturaleza; en consecuencia afectará los sistemas socio-económicos y la calidad de vida de la población local (MAVDT, IDEAM y PNUD, 2008).

Es por esta razón que en la actualidad los modelos de distribución de especies asociados a variables climáticas explicativas, se constituye como una herramienta de vital importancia para determinar cual es la variable ambiental que está más correlacionada con la presencia de determinada especie y asimismo, permita predecir el comportamiento de la especie ante variaciones en dichas variables (Phillips *et al.*, 2006; De Pando y Peñas de Giles, 2007).

De igual manera, para los mismos autores, el desarrollo de aplicaciones con base en sensores remotos representa un gran aporte para el abordaje del cambio climático, su estudio y monitoreo, por lo que las actividades que se desarrollen usando estas tecnologías constituyen un gran aporte para la toma de decisiones y evaluar los efectos del cambio.

Son muchos los trabajos en los que se comparan múltiples algoritmos de modelización con el objetivo de determinar cuales son las técnicas más precisas. En general, aunque los resultados apuntan a los métodos de presencia-ausencia como los de mayor precisión, es habitual que en los muestreos de especies raras ó amenazadas no se registren las ausencias, por lo que es importante trabajar en el desarrollo de entornos

de modelización basados en algoritmos de solo presencia (Phillips *et al.*, 2006).

Los modelos de distribución basados en presencia-ausencia habitualmente se evalúan utilizando una muestra de evaluación independiente de la utilizada para entrenar los modelos, compuesta por registros de presencia-ausencia independientes de los utilizados para el entrenamiento de los algoritmos. A partir de esta muestra de evaluación se pueden calcular los errores de los casos que están correctamente clasificados, es decir aquellas presencias que son verdaderos positivos cuando el modelo predice presencia y ésta es confirmada por las presencias de la muestra de evaluación. Asimismo, se pueden calcular los verdaderos negativos cuando el modelo predice ausencia y ésta es confirmada por las ausencias de la muestra de evaluación. Por otro lado, se pueden calcular aquellos casos que son erróneamente clasificados, como las presencias que son falsos positivos cuando el modelo predice presencia y la muestra indica ausencia, en este caso se habla de errores de comisión. Se pueden calcular las ausencias que son falsos negativos cuando el modelo predice ausencia y la muestra indica presencia, en este caso se habla de errores de omisión. Estos datos se tabulan en una matriz de confusión a partir de la cual se pueden calcular distintos índices de evaluación (Phillips *et al.*, 2006; De Pando y Peñas de Giles, 2007).

El error de comisión y los falsos positivos no puede calcularse para modelos basados en presencia, excepto si se sustituyen los puntos de ausencia por puntos generados aleatoriamente, en lo que algunos autores denominan pseudo-ausencias. De este modo se obtiene una matriz de confusión modificada, a partir de la cual puede calcularse la capacidad del modelo para discriminar entre registros de presencia y puntos generados aleatoriamente (De Pando y Peñas de Giles, 2007).

Para comparar la capacidad de discriminación de los distintos modelos se emplea la técnica del área bajo la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), la cual es procedente del procesamiento de señales de radar y que ha sido aplicada en la evaluación de modelos de distribución basados en algoritmos de presencia-ausencia y en algoritmos de solo presencia (Phillips *et al.*, 2006).

La construcción de la curva ROC es un proceso iterativo aplicado a cada umbral de idoneidad del modelo, que consiste en un modelo de distribución que 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. Se obtiene una curva del intercambio entre las tasas de los falsos negativos y falsos positivos, para cada valor de corte. Sobre este modelo binario se superponen los puntos de presencia y los puntos aleatorios y se calculan los valores de la matriz de confusión. A partir de estos valores se calcula la fracción de verdaderos positivos y la fracción de aleatorios positivos.

El área bajo la curva ROC (AUC) 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. Es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación y cercanos a 0.5 cuando el ajuste no es mejor que el obtenido por azar (Phillips *et al.*, 2006).

Un modelo de idoneidad corresponde a un mapa donde cada punto del espacio tiene asignado un valor que muestra que tan adecuada o inadecuada puede ser dicha localización para un uso determinado y representa lo adecuado del territorio para que una especie ya sea de flora o fauna o una cobertura esté presente. La expresión de esta idoneidad del hábitat puede ser binaria, otorgando un valor de 1 a las áreas idóneas y 0 a las áreas no idóneas, o continua, según un rango de valores que clasifican el territorio de menor a mayor grado de idoneidad (Phillips *et al.*, 2006).

MaxEnt es un programa que limita la distribución modelada para que se ajuste a ciertas variables ambientales de datos empíricos (de entrenamiento) y escoge la condición de probabilidad que satisface estas limitantes para que sean lo más uniforme posible. Básicamente, si un píxel en el estudio tiene una distribución similar a la de los datos de entrenamiento, entonces los valores más altos son asignados y los píxeles con diferente distribución se asignan los valores más bajos (Phillips *et al.*, 2006).

MaxEnt distingue la presencia del azar en lugar de la presencia de la ausencia. Para cada píxel en la zona de estudio define una instancia negativa (al azar), mientras que define una instancia positiva para los píxeles que contienen los datos de presencia, así el modelo hace predicciones sin mirar las instancias (positivas y negativas). Este programa ha demostrado tener un mejor desempeño con datos de presencias y muestras pequeñas, en comparación con otros programas como Domain, GARP, ENFA, Bioclim (De Pando y Peñas de Giles, 2007).

Para la evaluación de los modelos se requiere de dos grupos de datos conocidos como los datos de entrenamiento y los datos de prueba, en este caso se pueden usar las pruebas de *Jackknife* y *Bootstrap* como uno de los más precisos. Del 100% de los datos, se puede tomar el 75% como datos de entrenamiento y el 25% como datos de prueba (Phillips *et al.*, 2006; Negga, 2007; Phillips y Dudík, 2008).

La importancia de cada variable ambiental predictiva se ha utilizado la prueba *Jackknife* que opera excluyendo secuencialmente una variable ambiental del modelo y ejecuta el modelo con el resto de las variables. También corre un modelo usando sólo la variable excluida de forma aislada. Como resultado, se puede calcular la contribución de ganancia de cada variable al total de la ganancia del modelo (Phillips *et al.*, 2006; Negga, 2007; Phillips y Dudík, 2008).

Cuando se habla de un escenario de cambio climático, no se refiere a un pronóstico ni a una predicción climática, sino de una representación del clima afectada por una condición de gases de efecto invernadero. Es muy difícil conocer exactamente cómo las emisiones antropogénicas cambiarán en el futuro. *Los escenarios de emisión*, son representaciones de futuras de emisiones basado en factores externos como demografía, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico y sus clases de relaciones. Los escenarios SRES comprenden cuatro familias: A1, A2, B1 y B2 (Ruiz-Murcia, 2010).

Los escenarios A1, describen un mundo futuro en el que se da un rápido crecimiento económico, una población que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y que disminuye posteriormente, y una rápida introducción a nuevas y más eficientes tecnologías. En este escenario se utilizan combustibles de origen fósil (A1FI), fuentes de energía de origen distinto al fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B) entendiéndose por equilibrada la situación en que no dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.

La estimación de las concentraciones empleadas en los modelos es empleada para cuantificar las concentraciones desde escenarios de emisión, los cuales son usados como datos para calcular la proyección futura. Estas proyecciones se realizan en los llamados Modelo Climáticos Globales (GCM) que son una representación matemática del sistema climático basado sobre las propiedades físicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación (Ruiz-Murcia 2010). Asimismo, se han propuesto modelos regionales

(RCM) como una herramienta para adicionar detalles de información de pequeña escala del cambio climático futuro a las proyecciones de gran escala de los CGM.

2. Metodología

Para la elaboración del presente trabajo se contó con los insumos cartográficos y datos de presencia obtenidos a partir del mapa de Ecosistemas Continentales Costeros y Marinos de Colombia (IDEAM *et al.*, 2007), el cual fue construido bajo el procesamiento digital de imágenes satelitales *Landsat TM*. De este producto, se tomaron los polígonos correspondientes al Gran bioma del bosque húmedo tropical (Orobioma alto de los Andes), que corresponde a las coberturas de páramo y el Gran bioma del Bosque Seco Tropical.

Del shp de páramos y de bosque seco se generaron una serie de 1000 puntos aleatorios distribuidos sobre ese vector con ayuda del programa *ArcGIS 9.3.1.*, para obtener una lista de coordenadas de presencia que son insumo de presencias para el modelamiento en *MaxEnt*.

Para el modelamiento con variables ambientales, que son el segundo insumo para *MaxEnt*, se trabajó con datos de precipitación media anual, temperatura media anual y el modelo digital de elevación para Colombia, obtenidos gratuitamente de *Worldclim* (Hijmans *et al.*, 2005), los cuales son un conjunto de capas climáticas con una resolución de 1 Km².

El manejo de las capas ambientales se realizó con el programa gratuito DIVA-GIS (Hijmans *et al.*, 2005), donde se promedió la precipitación y la temperatura y se añadió 3 y 5°C para modelar los escenarios futuros climáticos. Este escenario corresponde a la familia de los A, considerando el peor de los casos para los modelos predictivos. Según Ruiz-Murcia (2010), la temperatura media alcanzable es de 3 grados y la máxima es 5 grados, por eso se escogieron dichos valores.

Dentro del programa *MaxEnt*, los puntos de presencias o *samples* fueron los datos utilizados para la generación de los modelos actuales y futuros. Las variables climáticas o *Environmenal layers* fueron temperatura media anual, precipitación y altitud. Se seleccionó una carpeta de salida o *Output directory*, en la cual después del análisis se descargan los resultados y, por último, se escogió la carpeta donde se encuentra la capa de temperatura modificada. Las salidas gráficas obtenidas de *MaxEnt* fueron procesadas con *ArcGIS 9.3.1.*

3. Resultados y discusión

Este documento presenta un avance de las actividades realizadas para la red temática FORCLIM (Red Iberoamericana para el estudio de ecosistemas forestales ante el cambio climático global). El objetivo principal de la red proyecta estudiar y prever los efectos potenciales del cambio climático global mediante tres puntos claves: intercambio de conocimiento sobre técnicas que permitan un estudio integral del fenómeno, consolidación de medios y métodos para la identificación y caracterización de áreas de bosque actuales y futuras y difusión de la metodología idónea para el estudio de las distribuciones de bosque actuales y futuras mediante técnicas de modelado espacial. De acuerdo a este objetivo el grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas (PR y AG) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi ha adelantado actividades en cuanto a los tres puntos que plantea el objetivo.

Mediante las comunicaciones con la red y los diferentes encuentros anuales se ha facilitado el intercambio de conocimiento sobre técnicas que otros países como España ya han utilizado. Esto es un avance para estudiar la dinámica de distribución de los ecosistemas de bosque frente al cambio climático global en Colombia. Conforme a estas comunicaciones el grupo PR y AG se ha capacitado y está en el proceso de consolidación de la metodología para identificar y caracterizar áreas de bosques en escenarios climáticos actuales y futuros. Como consecuencia de esto, se han obtenido estos resultados.

Para los modelos de idoneidad, *MaxEnt* arroja una serie de resultados para la verificación del ajuste. En este caso se observa la tasa de omisión y el área de predicción en función del umbral acumulativo. La tasa de omisión se calcula tanto en los registros de entrenamiento de presencia y en los registros de prueba y debe estar cerca de la omisión predicha, según la definición del umbral acumulativo (Figura 1).

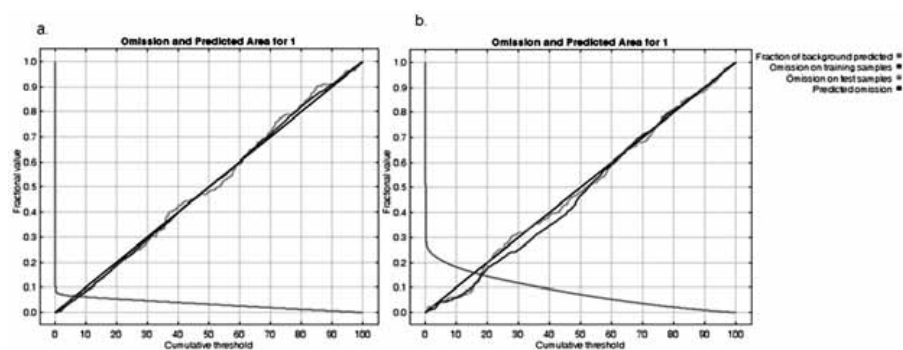


Figura 1. Área de omisión y predicción para a) páramo y b) bosque seco.

En general se presentó un buen ajuste al modelo actual con base en las curvas ROC y AUC arrojadas por *MaxEnt*, ya que presentaron valores significativos (Figura 2).

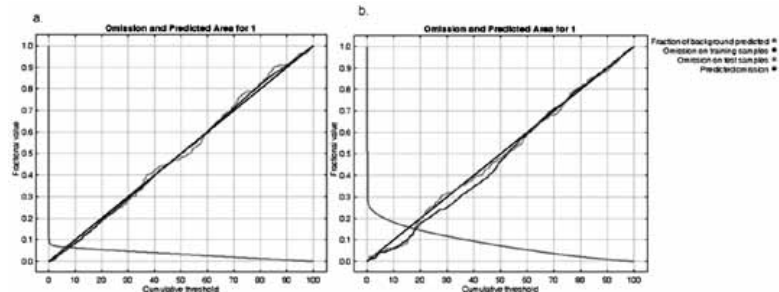


Figura 2. Representación de la sensibilidad contra la especificidad para a) páramo y b) bosque seco.

La figura 3 muestra los resultados de la prueba de *Jackknife* de importancia de la variable ambiental con ganancia más alta cuando se usa en aislamiento. Estas pruebas se realizan usando los datos de entrenamiento, los datos de prueba y los valores de AUC. Para los páramos, la variable que mayor porcentaje de contribución representa es la temperatura (82.9%), por lo que parece tener la información más útil por sí misma. La variable ambiental que disminuye la ganancia cuando se omite es la precipitación media anual (2.9%), por lo que parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables; la altura contribuyó con un 14.2%. Para los bosques secos, la mayor contribución la da la precipitación media anual (80.8%), la menor es la altura (3.2%) y la precipitación arrojó un valor de 15.9%.

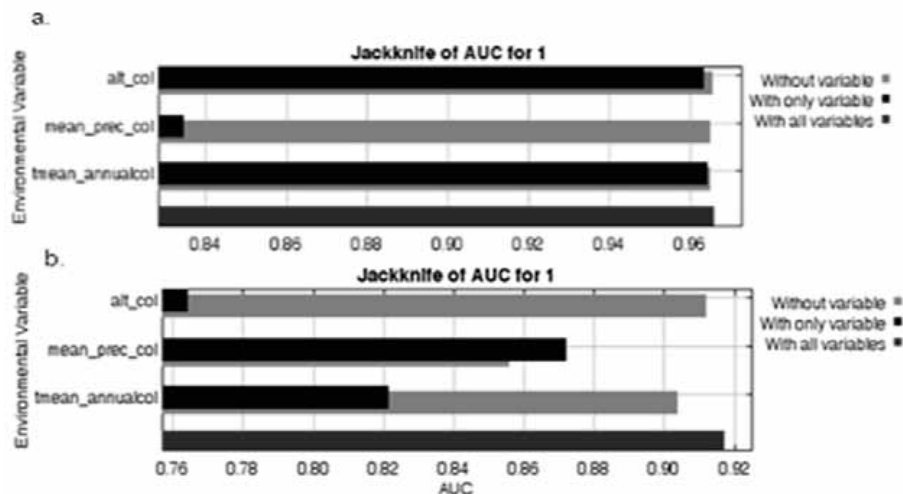


Figura 3. Prueba de *Jackknife* usando el AUC y los datos de prueba.

Según los umbrales de definición de las presencias o ausencias del modelo, se calculan los mapas de presencia-ausencia considerando un umbral basado en una prueba del 25% de los datos. Para estos datos se tomó el umbral logístico del *equal training sensitivity and specificity* para determinar como presencia en el modelo de idoneidad.

Adicionalmente, el modelo tiende a mostrar zonas potenciales en donde posiblemente existió este tipo de ecosistemas, pero que debido a dinámicas naturales y productivas, en la actualidad no esta este tipo de cobertura. Para los ecosistemas de páramo, en general la distribución actual no varía con la propuesta por el mapa de ecosistemas, aunque existen algunas zonas como en los páramos de El Parque Los Nevados, en los que actualmente no hay páramos pero si serían potenciales para su presencia (Figura 4).

En el caso de los bosques secos, ocurre lo contrario, ya que la zona actual es menor que la idónea, como en el caso más específico de las zonas de los Valles del Magdalena, esto debido posiblemente a la intervención antrópica que ha modificado los ecosistemas naturales para dar paso a cultivos misceláneos (Figura 5).

Por otro lado, el modelo muestra zonas de idoneidad para áreas muy específicas de Colombia, que son conocidas como bosques secos y que en el mapa de ecosistemas no aparecen como tal. Este es el caso del Cañón del Chicamocha y del río Patía, río Dagua y zonas secas cercanas a Santa Fe de Antioquia.



Figura 4. Modelo de idoneidad de páramos.



Figura 5. Modelo de idoneidad de bosque seco. 1. Ciénaga del Magdalena, 2. Santa Fe de Antioquia, 3. Cañón del Chicamocha, 4. Cañón del río Dagua, 5. Cañón río Patía.

Sin embargo, en las zonas húmedas de la ciénaga del Magdalena, el modelo tiende a interpolar como zonas de alta idoneidad para la presencia de bosque seco. Esta diferencia, entre lo modelado y lo actual, en parte puede darse porque estas zonas presentan una alta complejidad que se detecta a una resolución espacial más fina, que la resolución del modelo climático y de la escala de trabajo no se alcanzaría a discriminar.

Para ambos tipos de ecosistemas, los modelos de idoneidad futuros con el incremento en la temperatura representan una variación en las coberturas que va a depender de las características de cada uno. En el caso de los ecosistemas de páramo, los modelos de incremento de temperatura presentan una tendencia a la disminución sustancial de este tipo de cobertura. Hacia las zonas de la cordillera Occidental, donde se presentan algunos pequeños parches de páramos, la presencia tiende a desaparecer; en las zonas de la cordillera oriental y central, la continuidad entre estos se ve abruptamente interrumpida y disminuida, manteniéndose zonas de gran tamaño únicamente para el páramo de Sumapaz, Cocuy y Los Nevados (Figura 6).

En el caso de los bosques secos, al contrario del páramo este tiende a aumentar su tamaño en las zonas de las cordilleras y disminuir su

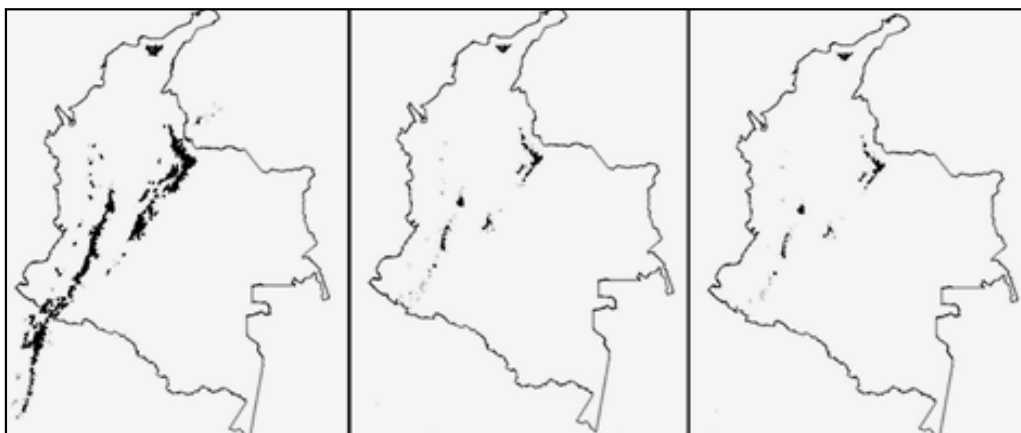


Figura 6. Prospectiva de la dinámica de los ecosistemas de páramo.

idoneidad hacia las zonas aledañas a la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 7). Por otro lado, se puede afirmar que el incremento en la presencia de bosques secos también puede dar paso a un avance en las zonas desérticas y más secas, por lo cual representaría una amenaza para el futuro de la biodiversidad.

Especialmente se ve afectada la conectividad entre las zonas, lo cual pone en peligro la sobrevivencia de las especies de flora y fauna que habitan, por la desaparición de su hábitat. De igual manera, las zonas de páramo son de elevada prioridad de conservación en el entorno nacional por los servicios ecosistémicos que en ellas se presentan, especialmente para las existencias del recurso hídrico del país, lo que pondría en amenaza adicionalmente a las poblaciones humanas que dependen del agua para vivir.

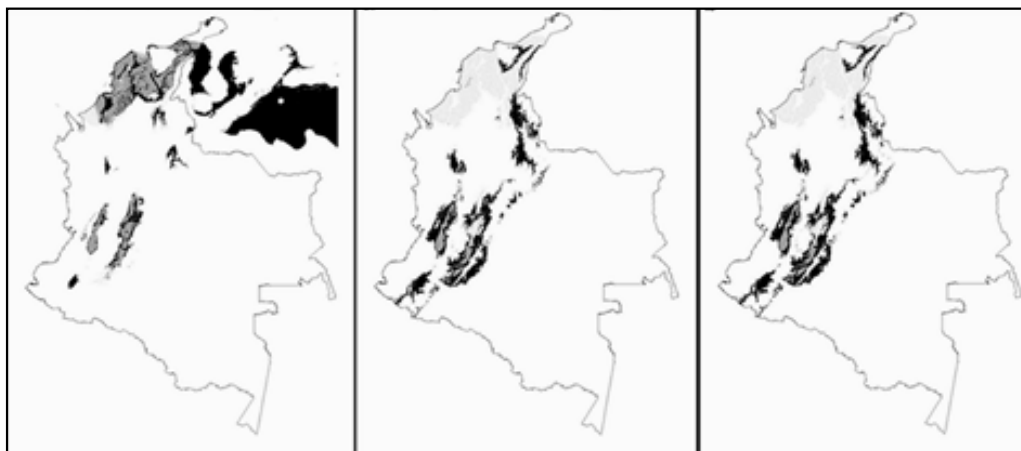


Figura 7. Prospectiva de la dinámica de los ecosistemas de bosque seco.

Entre muchos otros aspectos, la desaparición de cualquier tipo de ecosistema puede acarrear un desbalance en los procesos y dinámicas que se dan al interior de ellos, que ponen en peligro el bienestar de la sociedad y de las comunidades bióticas.

De acuerdo con Pabón (2009), la proyección del clima es una estimación de una situación futura mediante el estudio de la condición actual o a través de una extrapolación (estadística, numérica o dinámica) del curso de los procesos (por ejemplo: extrapolación de tendencias). Sin embargo, en el caso de las proyecciones estadísticas, es difícil que se mantengan constantes a través del tiempo, ya que siempre hay una variabilidad dinámica que puede alterar los valores estadísticos y que puede llegar a ser difícil de cuantificar por su estocasticidad.

Estos modelos son muy robustos en cuanto a las predicciones que arroja, sin embargo, las predicciones de idoneidad para *MaxEnt* han demostrado presentar una elevada confiabilidad para determinar escenarios de idoneidad y relación entre variables, conociendo cual de ellas aporta más al modelo. Si embargo, es importante considerar que el modelo fue diseñado para determinar nicho fundamental de las especies, por lo que hay que tener en cuidado con los resultados que arroja para cobertura. En este caso, se quiso conocer como es el comportamiento ante el incremento de una variable, partiendo del supuesto que las especies que se modelaron no sobrepasan los límites de los ecosistemas modelados, por lo cual se puede obtener una aproximación al comportamiento de la vegetación en general.

Para Colombia, se han empleado diferentes modelos regionales como el PRECIS y el GSM-MRI que han modelado el comportamiento de la temperatura, la precipitación y humedad relativa para varios escenarios hasta el 2100. En ellos es posible visualizar zonas con incrementos en cada una de las variables y que zonas en particular presentan dicha modificación.

En todos los casos, la relación entre la población y las muestras está sujeto a incertidumbre, por ejemplo en el caso del uso de las variables climáticas de la red WorldClim, los datos son obtenidos de interpolaciones de los datos de estaciones, lo cual introduce un nivel de error, igualmente debido a la aleatoriedad ambiental algunas variables son difíciles de cuantificar precisamente. La incertidumbre del modelo es la mayor fuente de error y puede ser ampliamente usada para originar el entendimiento del sistema que se está modelando, los supuestos y simplificaciones incorporadas en el modelo. Los supuestos y simplificaciones determinan la estructura del modelo, la resolución y el límite. Cada modelo tiene un límite determinado en términos de espacio y

tiempo y es una forma de simplificación pero puede también ser una fuente de incertidumbre (Negga, 2007).

En el caso de estos modelos, la percepción remota es una herramienta fundamental para el desarrollo de los análisis y generación de información, al ser la base de las variables ambientales y de presencias empleadas. El procesamiento digital de las imágenes permite desarrollar trabajos a escalas finas y gruesas, según el producto escogido, que obtiene una diversidad de insumos que pueden ser empleados como variables ambientales y como registros de las presencias. Con las imágenes y sus productos, se obtiene una visión mucho más amplia del terreno y análisis que con otras técnicas es difícil cuantificar. Asimismo, dependiendo del sensor, es posible tener datos climáticos y otros atributos que facilitan aún más el desarrollo de modelos del clima y de coberturas.

La intención de este trabajo, más que mostrar una tendencia en los escenarios de cambio climático, es difundir la existencia de herramientas y metodologías de análisis espacial. Sirve como insumo para conocer las herramientas de software gratuito y de análisis que se pueden utilizar a partir del uso de los productos obtenidos a partir de sensores remotos y las metodologías de modelamiento con base en estadística espacial. En este caso, el mapa de ecosistemas de Colombia del IDEAM – IGAC (2007), fue obtenido a partir del procesamiento digital de imágenes *Landsat* junto con otros insumos geográficos, que fueron la base del presente trabajo.

Por otro lado, se contó con diferentes insumos de libre uso como los programas DIVA-GIS (DIVA-GIS, s.f.) y *MaxEnt* (Phillips, Anderson y Schapire, 2006), el polígono del límite político de Colombia descargado del IGAC SIG-OT (IGAC, s.f.) y las capas ambientales de temperatura, precipitación y altura de *WorldClim* (WorldClim, s.f.). Este acceso invita a los interesados a incrementar el uso de estas herramientas para el modelamiento de la distribución de especies. La presente metodología es fuente para la realización de estudios similares que incluyan más variables para cambio climático u otros insumos de presencias para modelar las distribuciones potenciales de flora y fauna.

4. Conclusiones

4.1 Páramo

- El modelo de idoneidad actual muestra un ajuste significativo con la distribución actual del ecosistema de páramo (Ecosistemas Colombia), sin embargo presenta zonas en la que potencialmente

existe páramo pero por intervención antrópica no están presentes actualmente.

- El modelos de idoneidad futuro, escenario climático +3°C, presenta una disminución en la distribución general del ecosistema, representado especialmente en una pérdida de conectividad, que sobresale hacia el complejo de áreas protegidas Sumapaz, Chingaza y Cocuy y de igual forma para el complejo Puracé, Huila y los Nevados; en la cordillera occidental desaparecen los relictos o islas de ecosistema páramo.
- La tendencia de disminución del área del ecosistema se mantiene para el escenario climático +5°C.
- Observando el análisis de contribución de variables ambientales arrojado por *MaxEnt*, la elevación es el atributo ambiental que afecta mayormente el modelo.

4.2 Bosque seco tropical

- El modelo de idoneidad actual no se ajusta con la distribución actual del ecosistema de bosque seco tropical (mapa de ecosistemas Colombia), aun cuando el ajuste del modelo es significativo; este modelo presenta zonas de idoneidad en las cuales no hay presencia de bosque seco tropical, según el mapa de Ecosistemas de Colombia, como es el caso del enclave seco del Cañón del Chicamocha y Cañón del río Patía, Río Dagua y Santa Fé de Antioquia. Sin embargo, para las zonas de la ciénaga de Santa Marta el modelo interpoló zonas húmedas como bosque seco.
- El modelo de idoneidad futuro, escenario climático +3°C, presentó un aumento en la distribución general del ecosistema, que puede deberse a la alta intervención antrópica ocurrida en estos ecosistemas.
- La tendencia de aumento del área del ecosistema se mantiene para el escenario climático +5°C.
- Observando el análisis de contribución de variables ambientales arrojado por *MaxEnt*, la precipitación es el atributo ambiental que afecta mayormente el modelo.
- Para el desarrollo de estos modelos, el procesamiento digital de imágenes es la herramienta fundamental y de base como insumo para la generación de modelos de idoneidad de especies. Este trabajo presenta un aporte metodológico a los diferentes usos que se le puede brindar a los insumos obtenidos a partir de sensores

remotos, como aporte a la red temática de difusión de conocimientos en tecnologías geoespaciales de red temática FORCLIM.

Bibliografía

- DE PANDO, Blas Benito y PEÑAS DE GILES, Julio (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. En: GeoFocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, No 7, p. 100-119. Madrid (España): Asociación de Geógrafos de España. ISSN: 1578-5157.
- DIVA-GIS (s.f.). DIVA-GIS [en línea]. s.l.: DIVA-GIS <<http://www.diva-gis.org/>> [consulta: 28/08/2010]
- FERRIER, S. and GUIBAN, A. (2006). Spatial modelling of biodiversity at the community level. En: Journal of Applied Ecology No. 43, p. 393-404. London (UK): British Ecological Society. ISSN 0021-8901
- HIJMANS, Robert; CAMERON, Susan; PARRA, Luis; JONES, Peter and JARVIS, Andrew (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology No 25, p. 1965-1978. Malden (MA, USA): John Wiley & Sons Inc. ISSN: 0899-8418.
- IDEAM (2010). Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático [en línea]. Bogotá (Colombia): IDEAM – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <<http://www.cambioclimatico.gov.co/nota-30.html>> y <<http://www.cambioclimatico.gov.co/documentos/2ª%20Comunicación.pdf>> [consulta: 26/08/2010]
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM); INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC); INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT (IAVH); INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS JOSÉ BENITO VIVES DE ANDRÉIS (INVEMAR), INSTITUTO AMAZÓNICO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (SINCHI) E INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES DEL PACÍFICO JHON VON NEUMANN (IIAP). (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Bogotá (Colombia). 276 p. + 37 hojas cartográficas.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC (s.f.). SIG-OT, Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el ordenamiento Territorial: SIG Nacional. [en línea]. Bogotá (Colombia): IGAC. <<http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/default.aspx>> [consulta: 30/08/2010]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. (2010). Manual de Procedimientos Investigación, Desarrollo e Innovación. Grupo Interno de Trabajo Gestión del Conocimiento en Tecnologías Geoespaciales. 23 p.
- LAWLER, Joshua; WHITE, Denis; NEILSON, Ronald and BLAUSTEIN, Andrew R. (2006). Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. En: Global Change Biology No 12, p. 1568-1584. Hoboken (NJ, USA): John Wiley & Sons, Inc ISSN: 1354-1013.
- LÓPEZ ARÉVALO, Hugo Fernando. (2010). Efecto de la pérdida de conectividad del Bosque mesófilo de montaña en la diversidad de mamíferos medianos en la cuenca alta del río La Antigua, Veracruz. [en línea]. Tesis de Doctorado (Doctor en Ciencias). Xalapa (Veracruz, México): Instituto de Ecología, A.C. 111 p. <<http://www1.inecol.edu.mx/posgrado/Documentos/tesis/2010/Tesis%20Doctorado%20Hugo%20Fernando%20Lopez%20Arevalo.pdf>> [consulta: 30/08/2010].
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT), INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD) (2008). Resumen técnico del módulo uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y la silvicultura del inventario nacional de GEI años 2000 y 2004. [en línea]. Bogotá (Colombia): Bogotá (Colombia): Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <<http://www.cambioclimatico.gov.co/documentos/lulucf.pdf>>. 11 p. [Consulta 30/08/2010].

- NEGGA, Henok Eyob. (2007). Predictive Modelling of Amphibian Distribution Using Ecological Survey Data: A case study of Central Portugal [en línea]. Thesis Master of Science (MSc. in Geo-information Science and Earth Observation. Environmental Modelling and Management). Enschede (Netherlands): International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. 88 pp. <<http://www.gem-msc.org/Academic%20Output/Henok%20Neggal.pdf>> [consulta: 20/08/2010]
- PABÓN, J. Daniel (2009). El cambio climático en Colombia. [en línea]. En: IV Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional (7-10/10/2009), Bogotá (Colombia): Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Universidad Nacional de Colombia. <http://www.cisdaiv.unal.edu.co/ponencias/E2_Cambio_clima/E2_daniel_pabon.pdf>. [Consulta 20/08/2010].
- PHILLIPS, Steven (s.f.) Una breve guía didáctica sobre MaxEnt (en línea). Princeton (NJ, USA): Princeton University, Department of Computer. <<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>>. [consulta: 28/08/2010]
- PHILLIPS, Steven J. and DUDÍK, Miroslav (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. En: *Ecography* No. 31, p. 161-175. Malden (MA, USA): John Wiley & Sons Inc. ISSN 0906-7590.
- PHILLIPS, Steven; ANDERSON, Robert P. and SCHAPIRE, Robert E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. En: *Ecological Modelling* No.190 p. 231–259. Maryland Heights (MO, USA): Elsevier B.V. ISSN 0304-3800.
- RUÍZ MURCIA, José. Franklin. (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). [En línea] Nota Técnica IDEAM-METEO/005-2010 (may, 2010). Bogotá (Colombia): IDEAM - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <http://www.cambioclimatico.gov.co/documentos/ESCENARIOS_CAMBIO_CLIMATICO.pdf>. 91 p. [Consulta 25/08/2010].
- URBINA-CARDONA, José Nicolás and FLORES-VILLELA, Óscar (2010). Ecological-Niche Modeling and Prioritization of Conservation-Area Networks for Mexican Herpetofauna. En: *Conservation Biology* No. 24, vol. 4, p. 1031-1041. Malden (MA, USA): John Wiley & Sons Inc. ISSN 0888-8892.
- URBINA-CARDONA, José Nicolás and LOYOLA. R. D. (2008). Applying niche-based models to predict endangered-hylid potential distributions: are neotropical protected areas effective enough?. En: *Tropical Conservation Science* Vol. 1, No. 4, p. 417-445. San Francisco (CA, USA). Mongabay. ISSN 1940-0829
- WORLDCLIM (s.f.). WorldClim – Global Climate Data [en línea]. s.l.: WorldClim <<http://www.worldclim.org/>> [consulta en 28/08/2010]