

## MODELADO DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES EN LOS BOSQUES DE LOS ANDES MERIDIONALES

*Virginia Alberdi Nieves*<sup>1</sup>

Centro Universitario de Mérida. Universidad de Extremadura

### RESUMEN

La elevada biodiversidad junto con una gran variedad de ecosistemas convierten a la Cordillera de los Andes es una de las regiones de mayor diversidad ambiental del mundo, donde se encuentran los rangos más extremos de tipos de paisajes, clima y formaciones forestales de la Tierra, un área adecuada para estudiar los posibles efectos del cambio climático sobre la distribución espacial de las formaciones forestales.

Para ello resulta imprescindible entender los efectos de cambio climático en la zona, dónde las observaciones climáticas indican diferentes escenarios climáticos en el futuro, para un periodo de tiempo actual y para el periodo 2040-2069, con variaciones de las temperaturas y precipitaciones. Se analiza la distribución de los bosques a través de modelado predictivo con el método de máxima entropía de MaxEnt. Los resultados señalan que la mayoría de las formaciones forestales de los bosques andinos analizados tendrán previsiblemente problemas importantes en un futuro próximo, consecuencia de la pérdida de idoneidad climática en el área actual de distribución y del cambio geográfico de las áreas potencialmente adecuadas en el futuro como reflejan los resultados.

**Palabras clave:** biodiversidad, modelos de distribución de especies, cambio climático, bosques, máxima entropía.

### MODELING OF SPECIES DISTRIBUTION ON THE FOREST OF SOUTHERN ANDES

### ABSTRACT

The high biodiversity along with a great variety of ecosystems turn Andes Mountain one of the regions of greater environmental diversity of the world, where are the most extreme ranges of types of landscapes, climate and forest formations of the Earth, an area suitable for studying the possible effects of climate change on the spatial distribution of forest formations.

For this it is essential to understand the effects of climate change in the area, where climate observations indicate different climate scenarios in the future, for a current time period and for the period 2040-2069, with variations in temperatures and precipitation. The distribution of forests through predictive modelling is analyzed using MaxEnt's maximum entropy method. The results indicate that most of the forest formations in the Andean forests analysed are expected to face significant problems in the near future, as a result of the loss of climate suitability in the current area of distribution and the geographic change of potentially suitable areas in the future as reflected in the results.

**Keywords:** biodiversity, species distribution models, climate change, forests, maximum entropy.

---

<sup>1</sup> Departamento de Expresión Gráfica de la Universidad de Extremadura [virginiaan@unex.es](mailto:virginiaan@unex.es)

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una modificación del clima respecto a la historia reciente y hablamos de cambio climático global (ccg) cuando nos referimos a cambios en el clima del planeta en su conjunto. El clima en la tierra ha sido siempre variable según lo atestiguan numerosos registros por lo que podría hablarse de un cambio climático continuo. Sin embargo, la preocupación actual no es sólo por el cambio en sí mismo, sino por la velocidad a la que se produce

La zona meridional de la Cordillera Andina actúa como frontera natural entre Chile y Argentina, mientras que en la zona central se ensanchan dando lugar una meseta elevada conocida como altiplano; esta es compartida por Argentina, Bolivia, Chile y el Perú. Finalmente la cordillera se vuelve angosta nuevamente en el norte del Perú y Ecuador, y se ensancha de nuevo en Colombia donde también se divide en tres ramas para luego seguir a Venezuela, lugar en que la cordillera es escasa y se prolonga casi hasta llegar al mar Caribe. Esta cordillera se caracteriza por una gran diversidad topográfica y unas condiciones climáticas muy variadas, que otorga a estos países una enorme heterogeneidad de ecosistemas y una gran biodiversidad.

Los Andes Meridionales constituyen una de las regiones de mayor diversidad ambiental y geomorfológica en el mundo, y los rangos más extremos de tipos de paisajes, climas y comunidades vegetales de la Tierra (MUJICA BARREDA and HOLLE 1998). Las observaciones climáticas indican (BUYTAERT, CUESTA et al. 2011) que son muy diversos los escenarios climáticos que se van a producir en un futuro, manifestándose un incremento de temperaturas, que según Herzog et.al. (2012), se incrementará en un mínimo de 2°C, mientras que en el Altiplano boliviano se espera experimentar una disminución de las precipitaciones (-10%), y un aumento en Ecuador y Perú entre un 5% y 60% de las precipitaciones (BUYTAERT and BIEVRE 2012).

En este sentido Buytaert (2012) muestra como los efectos del cambio climático sobre los recursos naturales son evidentes, afectando a múltiples aspectos de la biodiversidad<sup>2</sup> en todo el planeta. La biodiversidad abarca una enorme variedad de formas mediante las que se organiza la vida (DORADO NÁJERA 2010), por lo que su mantenimiento y el conocimiento de la capacidad de los ecosistemas de reaccionar frente a las perturbaciones se pueden realizar a través de diferentes metodologías.

Parece necesario comprobar la influencia de tales alteraciones sobre la distribución espacial de especies, por su contribución al mantenimiento y reforzamiento del grado de biodiversidad de los ecosistemas. No en vano, la estrategia más conveniente para mantener y auspiciar la resiliencia y productividad de los sistemas ecológicos es precisamente garantizar la biodiversidad presente en los mismos (JENSEN, BOURGERON et al. 1994).

Algunos de los estudios que han analizado los impactos del cambio climático en la biodiversidad se centran en una revisión de trabajos sobre las respuestas observadas en las especies silvestres y los sistemas biológicos recientes ante el cambio climático (PARMESAN 2006), (ROOT, MACMYNOWSKI et al. 2005). Otros trabajos relacionan directamente el cambio climático con el incremento (Lopez Bermudez 2000) de la probabilidad de extinción de la población (THUILLER, ALBERT et al. 2008), (MENGES 2000). Mientras que los estudios de las áreas montañosas relacionan la vulnerabilidad de los biomas con el cambio climático (GARCÍA-ROMERO, MUÑOZ et al. 2009). Estos modelos están basados en algoritmos de máxima entropía, una herramienta para detectar las alteraciones espaciales de las especies afectadas por el cambio climático sobre diferentes escenarios (PHILLIPS, ANDERSON et al. 2006). MaxEnt (Maximum Entropy Modeling) utiliza la técnica de la máxima entropía, y genera internamente pseudo-ausencias, con la función es encontrar la distribución más uniforme posible (probabilidad de máxima entropía), para las especies estudiadas (PHILLIPS, ANDERSON et al.

---

<sup>2</sup> La definición de biodiversidad se adoptó en el seno del Convenio sobre Diversidad Biológica en 1992: "la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros sistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas".

2006) . Lo que trata de representar este modelo es la idoneidad de la especie para ser encontrada en un determinado pixel, mas no como la probabilidad absoluta de encontrarlo dentro del mismo. Esta es la aplicación escogida para la elaboración de este estudio ya que dentro del amplio abanico de algoritmos existentes en la actualidad –BioClim, Domain, GARP,..- desarrollados para modelizar la distribución de especies, MaxExt se encuentra entre los que proporciona unas predicciones más certeras o ajustadas a los resultados esperados a priori según Elith (2006) y Hernández (2006), otros autor como Felicísimo (FELICÍSIMO, CUARTERO et al. 2012) realizan un estudio comparativo sobre diferentes métodos de regresión.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO Y MATERIALES

### 2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La Cordillera de los Andes es un sistema montañoso de América del Sur comprendido entre los 11° latitud Norte a 23° latitud Sur, que atraviesa Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, hasta el límite con Argentina y Chile como podemos observar en la

FIGURA 1



Fuente: Elaboración propia.

Este relieve constituye una enorme masa montañosa que discurre en dirección norte-sur bordeando la costa del Océano Pacífico a lo largo de 4.000 km, cubriendo una extensión de 1.542.644 km<sup>2</sup>.

La zona meridional de la Cordillera Andina actúa como frontera natural entre Chile y Argentina, mientras que en la zona central se ensanchan dando lugar una meseta elevada conocida como altiplano; esta es compartida por Argentina, Bolivia, Chile y el Perú. Finalmente la cordillera se vuelve angosta nuevamente en el norte del Perú y Ecuador, y se ensancha de nuevo en Colombia donde también se divide en tres ramas para luego seguir a Venezuela, lugar en que la cordillera es escasa y se prolonga casi hasta llegar al mar Caribe. Esta cordillera se caracteriza por una gran diversidad topográfica y unas condiciones climáticas muy variadas, que otorga a estos países una enorme heterogeneidad de ecosistemas y una gran biodiversidad.

El paisaje de los Andes está caracterizado por empinadas, quebradas y profundas pendientes, y extensos valles con picos escarpados. Se trata de un relieve que unido a las variaciones climáticas, el gradiente de altitud y la ubicación geográfica ha generado una gran diversidad de ecosistemas. Los Andes albergan más de 100 variedades de comunidades vegetales, 45.000 especies de plantas vasculares, de las cuales 20.000 son endémicas y 3.400 especies de vertebrados, con 1.567 endemismos, en apenas el 1% de la masa continental (Myers, Mittermeier et al. 2000), es considerada como la región de mayor riqueza y diversidad biológica en la Tierra.

## 2.2. DATOS DE FORMACIONES FORESTALES Y DATOS CLIMÁTICOS.

Para este estudio se ha utilizado el “Mapa de Ecosistemas de los Andes”, elaborado según la clasificación temática de sistemas ecológicos de NatureServe (Josse, Cuesta et al. 2009) de la Comunidad Andina, a través de fuentes de información temática disponible de cada uno de los países como muestra el CUADRO

CUADRO 1.

CUADRO 1  
FUENTES DE INFORMACIÓN TEMÁTICA DEL MAPA DE ECOSISTEMAS DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES

	<b>Bolivia</b>	<b>Colombia</b>	<b>Ecuador</b>	<b>Perú</b>	<b>Venezuela</b>
<b>Fuentes temáticas</b>	Mapa de Vegetación de Bolivia (NAVARRO and FERREIRA 2007)	Mapa de ecosistemas de los Andes Colombianos (VH 2000)	Mapa de sistemas ecológicos del Ecuador continental (Peralvo, Sierra et al. 2007)	Mapa forestal de Perú (INRENA 2000)	Mapa de unidades ecológicas del Estado de Mérida (ATAROFF and SARMIENTO 2003)
	Imágenes Landsat ETM y mosaicos geocover	Base climática nacional (IDEAM 2000)	Mapa de uso y cobertura del suelo año 2000 (MAG-IICA-Clirsén 2002)	30 escenas Landsat TM años 1998-2000	10 escenas Landsat TM de los años 2000-2001
	Índices bioclimáticos (1 km)	Índices bioclimáticos (1 km)	Índices bioclimáticos (1 km)	Índices bioclimáticos (1 km)	Índices bioclimáticos (1 km)

Fuente: (CUESTA 2009)

En base a cada uno de los mapas existentes de cada país se realizó una clasificación obteniendo como resultado un mapa integrado que fue desarrollado a partir de la homologación de una propuesta de clasificación jerárquica de los ecosistemas andinos (Josse, Cuesta et al. 2009), dónde

se determinó el ecosistema como el primer nivel o nivel de mayor detalle que se representa en el mapa de los Andes; el segundo nivel sería definido como macrogrupo, que representa la agrupación de ecosistemas en base a dos criterios principales: el bioclima y la fitogeografía. Y, por último, los ecosistemas transicionales donde la composición de las comunidades vegetales es una combinación de especies de plantas de los dos sistemas vecinos, que progresivamente varían en su abundancia. Esto ocurre entre ecosistemas de los bordes o límites de la región andina, por ello no se aplicó en ellos la clasificación de macrogrupos y aparecen como clases genéricas (ej. Amazonía, Chiquitania, Orinoquia) en la leyenda del mapa de macrogrupos.

Los datos climáticos empleados en el proyecto se han obtenido del portal de WoldClim (<http://www.worldclim.org/download>). Este es un servidor de datos de clima global que pone a disposición un conjunto de capas de clima en formato ráster con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> elaboradas por Robert Hijmans (2005), donde se emplearon registros que se refieren al periodo 1950-2000 de diferentes fuentes según el CUADRO 2.

CUADRO 2  
FUENTES QUE SE UTILIZARON PARA IMPLEMENTAR LOS DATOS.

Organismos	Período	Datos	Web
Global Historical Climatology Network (GHCN)	1950-2000	Precip. (20.590 est.), TM (7.280 est.), TMx y TMn (4.966 est.)	<a href="http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-daily/">http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-daily/</a>
World Meteorological Organization (WMO)	1961-1990	TM (3.084 est.), TMx y TMn (2.504 est.), Precip. (4.261 est.)	<a href="http://www.wmo.int/pages/about/index_es.html">http://www.wmo.int/pages/about/index_es.html</a>
FAOCLIM 2.0 es una base de datos climática global	1960-1990	Precip. (27.372 est.) TM (20.825 est.) TMn y TMx (11.543 est.)	<a href="http://www.fao.org/nr/clipag/pub/EN1102_en.asp">http://www.fao.org/nr/clipag/pub/EN1102_en.asp</a>
International Center for Tropical Agriculture (CIAT)	1961-1990	Precip. (18.895 est.), TM (13.842 est.) TMx y TMn (5.321 est.)	<a href="http://ciat.cgiar.org/es/">http://ciat.cgiar.org/es/</a>
Otros: R-Hydronet, NORDKLIM, International Soil Reference and Information Centre (Oldeman 1988)		América latina y el Caribe, Europa, Nueva Zelanda y Madagascar	<a href="http://www.r-hydronet.sr.unh.edu/spanish/">http://www.r-hydronet.sr.unh.edu/spanish/</a> <a href="http://www.smhi.se/hfa_coord/nordklim/">http://www.smhi.se/hfa_coord/nordklim/</a> <a href="http://www.metservice.com/national/home">http://www.metservice.com/national/home</a>

Fuente: (HIJMANS, CAMERON et al. 2005)

Los elementos que se utilizaron en la metodología de este estudio se refieren a la precipitación mínima, máxima y media, la temperatura máxima, además de las variables independientes como la latitud, la longitud y la altitud, obteniendo las siguientes variables bioclimáticas a través de la interpolación:

La información relativa a estas variables bioclimáticas se corresponde con las variables del periodo actual, además de los equivalentes para los tres escenarios futuros. Como escenarios futuros se contemplaron algunos de los definidos por el IPCC y llamados Escenarios de Emisión, donde se contemplaron en proyecciones para el periodo 2040-2069 como hace referencia en el Informe Especial de IPCC (NAKICENOVIC, DAVISON et al. 2000). Estos escenarios constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influyen factores o fuerzas determinantes tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico en las emisiones futuras. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio

climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y las iniciativas de adaptación y de mitigación. Se basan en un conjunto de cuatro líneas evolutivas, proporcionando cuatro conjuntos de escenarios denominados familias: A1, A2, B1 y B2.

### 3. METODOLOGÍA UTILIZADA

#### 3.1. MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL (MDP).

En este estudio se ha utilizado modelos de distribución potencial (MDP), estos modelos indican la idoneidad del hábitat para el desarrollo de poblaciones de una especie concreta o de una comunidad (FERRIER and GUIBAN 2006), calculada a partir de observaciones de campo y una serie de variables ambientales que actúan como predictoras (DE PANDO and GILES 2007), y son numerosos los estudios que constatan que diferentes algoritmos presentan distinta precisión a la hora de estimar la distribución del hábitat idóneo para una especie (MUÑOZ and FELICÍSIMO 2004). Con una mayor exactitud, los MDP son mapas donde cada punto tiene un valor en el rango 0-1. Un valor nulo significa que esa celda es incompatible para la especie analizada y un valor 1 que es idónea. La variable es continua con lo que los valores de idoneidad pueden adoptar valores intermedios en la escala mencionada.

El área geográfica donde una especie vegetal aparece, o área de distribución actual, puede conocerse a partir de mapas de vegetación que representan con cierta fidelidad la realidad ya que cubren la totalidad del territorio (FELICÍSIMO, GÓMEZ et al. 2005). También se puede conocer a partir de registros de observaciones puntuales, aunque en este caso hay que valorar hasta qué punto cubren bien la zona o son un muestreo más o menos limitado y sesgado de las presencias reales.

Lógicamente, el área de distribución actual es solo una fracción del área potencial allá donde haya habido intervención humana, esa reducción de área obedece a un conjunto complejo de causas, donde la deforestación es un factor muy relevante. En zonas como España, densamente pobladas desde hace milenios, el hombre ha intervenido intensamente en esa reducción y tanto las formaciones vegetales como las especies tratadas individualmente ocupan áreas muy limitadas respecto a su distribución potencial (FELICÍSIMO, MUÑOZ et al. 2011).

El área de distribución potencial es aquella donde existen condiciones ambientales adecuadas para que esa especie o formación vegetal prospere. Su extensión puede deberse a factores abióticos (topografía, geología, clima) como bióticos (competencia interespecífica, barreras, capacidad de dispersión...). Muchos de estos factores son desconocidos o difíciles de modelizar por lo que sólo se suele contar con una pequeña parte donde el clima y la topografía son las variables más frecuentes.

El procedimiento genérico para construir un MDP de la especie *i* se organiza en los siguientes pasos:

- 1) Se localiza geográficamente los registros de presencia de la especie *i*, y, si es posible, se establecen igualmente puntos de ausencia. La presencia/ausencia se constituye como variable dependiente (dicotómica). En el caso de bosques, se realiza un muestreo aleatorio sobre el tipo de bosque y las ausencias se extraen sobre otros bosques diferentes.
- 2) Se define un conjunto de variables descriptivas que se utilizarán como predictores para intentar definir en cada especie un nicho ambiental a partir de los datos de presencias y ausencias disponibles y de su localización.
- 3) Se extraen para cada punto de presencia o ausencia los valores de las variables independientes que le corresponden en esa localización geográfica. El conjunto de registros presencia/ausencia, coordenadas geográficas, valores de variables descriptivas forma lo que se llama, como en teledetección, muestra de entrenamiento.
- 4) Se establece una relación estadística entre las variables descriptivas y la dependiente (presencia/ausencia). Este proceso consiste esencialmente en generar un algoritmo que

relacione cada combinación de variables independientes con la frecuencia de presencia o ausencia de la especie analizada. A esta relación la denominaremos modelo estadístico:

El resultado es una función que genéricamente se expresa como  $P(i) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  donde  $P(i)$  es valor de probabilidad de presencia de la especie  $i$  y  $x_1 \dots x_n$  representan las variables independientes.

La función se interpreta como que la probabilidad de que una especie esté presente en un lugar depende de los valores de las variables descriptivas; por ejemplo, la presencia de un árbol puede reducirse según aumenten los valores de temperaturas estivales y disminuyan los de precipitaciones.

- 5) Se valora la bondad del modelo estadístico, es decir, hasta qué punto dicho modelo ha podido describir correctamente la relación entre los datos de presencia y ausencia que se le han suministrado y las variables ambientales. Hay que tener en cuenta que, en el mejor de los casos, éstas sólo podrán explicar una parte de los patrones de distribución de las presencias y ausencias. En algunos casos, la distribución actual no podrá ser explicada por las variables usadas, algo que es necesario valorar. Para medir la bondad del modelo estadístico es conveniente disponer de una muestra de contraste independiente sobre la cual aplicarlo pero esto no siempre es posible, ya que de muchas especies sólo existe un conjunto de observaciones muy reducido.
- 6) Se construye el mapa que representa el MDP a partir del modelo estadístico. Este procedimiento se realiza etiquetando cada punto del área de estudio con el valor  $P(i)$  que le corresponda en función de los valores de las variables independientes en ese punto. El MDP de una especie es un mapa que representa lo adecuado o inadecuado del territorio para la presencia de la especie en una escala continua que suele ajustarse al rango 0-1 (0: incompatible, 1: idóneo). Que un punto del terreno tenga un valor próximo a 1 significa que las variables descriptivas en ese punto son muy similares a las que existen en las zonas de presencia actual de la especie por lo que, consecuentemente y en ausencia de otros factores, ese lugar puede considerarse compatible para su existencia.

### 3.2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

El modelo estadístico puede construirse con una amplia variedad de métodos. Posiblemente el más utilizado inicialmente fue la regresión logística multivariable (RLM), aunque más recientemente los investigadores han comenzado a explorar otros métodos buscando especialmente superar las limitaciones inherentes a los métodos paramétricos. Los métodos más habituales en la bibliografía, aunque no los únicos, son los siguientes:

- Métodos de regresión: GLM (*generalized linear models*), LMR (*logistic multiple regression*).
- Redes neuronales: ANN (*artificial neuronal networks*), SVP (*support vector machines*)
- Algoritmos genéricos: GARP (*genetic algorithm for rule-set production*).
- Árboles de clasificación y regresión: CART (*classification and regression trees*), RTA (*regression tree analysis*).
- Modelos adaptativos: MARS (*multivariate adaptive regression splines*).
- Máxima entropía: MaxEnt (*maximum entropy modeling*).

Dentro del amplio abanico de algoritmos existentes en la actualidad, se ha utilizado el modelo CCMA con el programa MaxEnt para producir modelos de idoneidad, y calcular la distribución geográfica más probable de las especies forestales en la Cordillera Andina. El origen de esta técnica es de 1957 desarrollada por el físico Jaynes (1957) que construyó los principios lógicos para asignar distribuciones de probabilidad a priori con el principio de máxima entropía.

El motivo de la utilización del programa MaxEnt es que contiene cuatro propiedades que merecen una buena valoración: genera resultados coherentes espacialmente, siempre muestra

valores de ajuste situados entre los máximos del conjunto de métodos, se adapta bien a las muestras de tamaño reducido, puede ser automatizado para la producción de grandes cantidades de modelos y, finalmente, se trata de software gratuito.

Los valores que genera MaxEnt no tienen un significado estricto de probabilidad sino que deben interpretarse como valores de idoneidad relativa. Estos valores son normalmente transformados mediante una función logística que se ajusta a una escala más comprensible en el rango entre 0 (incompatible) y 1 (idóneo). Como este mapa presenta valores continuos entre 0 y 1 será útil estimar un valor de corte óptimo para separar dos clases únicas que muestran las estimaciones de presencia y de ausencia.

Los resultados de MaxEnt incluyen información sobre las dependencias entre variables y presencias en forma de gráficos y tablas, que permiten analizar a los especialistas las posibles relaciones funcionales que el modelo puede potencialmente revelar. Los más importantes son los siguientes:

- Curva ROC y estadístico AUC: utilizados para valorar la bondad del ajuste de los modelos a los datos de entrada.
- Importancia o contribución de las variables en la construcción del modelo.
- Curvas de respuesta que muestran cómo afecta cada variable ambiental a la predicción de MAXENTy que son útiles para analizar los posibles valores críticos para la presencia de la especie o formación.

### 3.3. CONSTRUCCIÓN DE MDP FUTUROS.

La posible influencia del cambio climático en la distribución de una especie se evalúa de acuerdo con los siguientes pasos:

- Construcción del MDP actual usando como variables descriptivas las variables climáticas medidas en el periodo estándar 2040-2069.
- Estimación de los valores de variables climáticas para un periodo futuro.
- Aplicación del modelo estadístico ya generado usando los nuevos valores de las variables climáticas.

## 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos implican a 62 tipos de formaciones forestales, algunos con presencia marginal o testimonial. Dada la dificultad de manejar semejante cantidad de información, se decidió, para dar una visión general de la evolución futura en la zona andina, seleccionar únicamente los más representativos y extensos. Esta selección conservó los 12 tipos de bosque mostrados en el CUADRO 3.

Las operaciones siguientes se realizaron ya únicamente con este subconjunto del total aunque la información básica mencionada hasta el momento está elaborada para todos los bosques. En la interpretación de los resultados debemos de tener en cuenta los métodos que nos han permitido llegar a ellos, donde la fiabilidad de los modelos generados depende de la calidad de los datos originales, tanto de presencia y ausencia como de las variables independientes. Como en todo análisis estadístico, las muestras deben ser representativas, suficientes y exactas (FELICÍSIMO, MUÑOZ et al. 2011). Hay que destacar algunas limitaciones derivadas de los tamaños de muestra en los datos de presencia de las especies, en este sentido el problema se presentaba al tener muestras demasiado amplias de presencia que no podría analizar el programa, para ello se realizó un muestreo con el 5% de los datos de presencia; esta reducción no tuvo efectos importantes sobre los modelos a tener en cuenta en la interpretación ya que se trataba de una muestra adecuada que podría mejorar el resultado en un pequeño tanto por ciento (HIRZEL and GUIBAN 2002),

evitándose que el muestreo estuviese mal diseñado o fuese inadecuado, generándose información insuficiente o irregular (VAUGHAN and ORMEROD 2003).

CUADRO 3  
SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE BOSQUES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES

Modelos	Código	Tipología de la formación	km <sup>2</sup>	%
2	408.570	Bosque del piedemonte del suroeste de la Amazonía	17.731	2,92
5	408.565	Bosque siempreverde subandino del oeste de la Amazonía	77.131	12,72
6	408.543	Bosque siempreverde subandino Suroeste de la Amazonía	77.282	12,75
24	409.043	Bosque altimontano pluvial de Yungas	8.622	1,42
29	409.105	Bosques altimontanos Norte-Andinos siempre verdes	12.845	2,12
4	409.921	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas	13.905	2,29
51	409.050	Bosque montano pluvial de Yungas	22.378	3,69
52	409.051	Bosque montano pluviestacional húmedo de Yungas	14.548	2,40
53	409.110	Bosque montano pluvial de los Andes del Norte	43.492	7,17
66	409.054	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de Yungas	10.827	1,79
67	409.048	Bosque y palmar basimontano pluvial de Yungas	46.281	7,63
69	409.112	Bosque montano bajo pluvial de los Andes del Norte	40.216	6,63

Fuente: Elaboración propia.

El ajuste del modelo nos lo proporcionan los valores AUC, esta es una medida de la eficacia del modelo estadístico para separar las presencias de las ausencias manejando los valores de las variables climáticas (FELICÍSIMO, MUÑOZ et al. 2011), los valores deben de estar habitualmente en el rango 0,5-1, donde hemos obtenido un valor medio de todos los modelos de AUC que es del 0,995, lo que indica un ajuste perfecto donde el modelo es capaz de ajustarse a los datos de entrada sin errores (FELICÍSIMO, MUÑOZ et al. 2011).

Para cada especie de bosque se obtuvieron cuatro modelos predictivos, un modelo que calcula la distribución potencial actual y tres modelos para cada uno de los escenarios contemplados en el periodo 2040-2069. Los datos básicos obtenidos de las diferentes formaciones forestales de la zona idónea se muestran en el CUADRO 4, donde se muestra claramente que el área potencial actual aumenta con respecto a la distribución actual.

En los resultados obtuvimos que la vulnerabilidad de las formaciones forestales presenta una reducción de su extensión, donde hay que destacar que el patrón de pérdida generalizada más intenso para el *Bosque de piedemonte del suroeste de la Amazonía* que en el escenario A2 disminuye su área potencial un 84,47% y en el escenario A1 un 80%, en cambio en el escenario B2 aumentaría un 125% su área de distribución potencial. En algunos estudios se prevé que estén más afectadas aquellas formaciones que tengan una extensión más reducida (TOVAR, ARNILLAS et al. 2013), en este caso este bosque cuenta con una superficie que supone el 2,92% del área de estudio; en cambio el *Bosque siempreverde subandino del suroeste de la Amazonía que disminuye* 83,77% en el escenario A2, este representa una de las mayores extensiones con el 12,75% del área de estudio, por lo tanto las consecuencias de esta disminución parecen deberse a las características de los diferentes escenarios de emisión y al peso de las variables bioclimáticas en cada modelo.

CUADRO 4  
DISTRIBUCIÓN DE CADA FORMACIÓN OBTENIDA DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN BAJO LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS A1, A2 y B2. LAS CIFRAS REPRESENTAN LA SUPERFICIE EN km<sup>2</sup>

Formación	D. Actual	D. Potencia I	Escenario A1B		Escenario A2A		Escenarios B2A	
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Bosque del piedemonte del SO de la Amazonía.	17.731	82.878	16.559	19,97	12.874	15,53	104.084	125,58
Bosque siempre verde subandino del O de la Amazonía.	77.131	175.153	71.516	40,83	76.941	43,92	77.003	43,96
Bosque siempre verde subandino del SO de la Amazonia.	77.283	152.310	48.848	32,07	24.733	16,23	73.405	48,19
Bosque altimontano Pluvial de Yungas.	8.622	35.802	34.111	95,27	37.345	104,30	31.234	87,24
Bosques altimontanos N-Andinos Siempre verdes.	12.845	87.792	67.268	76,62	68.138	77,61	74.151	84,46
Bosque montano pluvial subhúmedo de Yungas.	14.548	135.884	148.773	109,48	114.801	84,48	133.213	98,03
Bosque montano pluvial de Yungas.	22.378	105.476	69.844	66,21	47.275	44,82	81.224	77,00
Bosque montano pluvial húmedo de Yungas.	14.548	66.657	53.607	80,42	34.973	52,46	53.011	79,52
Bosque montano pluvial de los Andes del N.	43.492	154.19	103.24	66,95	111.55	72,34	123.436	80,05
Bosque basimontano pluvial húmedo de Yungas.	10.827	159.180	98.190	61,68	76.258	47,90	146.470	92,01
Bosque y palmar basimontano pluvial de Yungas.	46.281	105.810	36.811	34,78	29.587	27,96	62.004	58,59
Bosque montano bajo pluvial de los Andes del N.	40.217	209.710	101.75	48,52	110.47	52,67	136.326	65,00

Fuente: Elaboración propia.

En este caso para Bosque de piedemonte del suroeste de la Amazonía las variables ambientales que mayor peso han tenido en la elaboración del modelo se corresponden con la Bio18 y Bio14, y fueron la precipitación del trimestre más cálido en un 27% y la precipitación del mes más seco en un 26%, y en el Bosque siempre verde subandino del suroeste de la Amazonía se muestra como la temperatura media del mes más frío (Bio6 y la Bio7) contribuyó en un 24% el peso de esta variable para su elaboración. La distribución del Bosque siempre verde subandino del oeste de la Amazonía depende en gran medida de la precipitación estacional (Bio15) en un 60,8% para modelo climático actual y en un 62% la elaboración de los modelos climáticos futuros, ello verifica por tanto, que se trata de especies asociadas a ámbitos húmedos.

En los tres escenarios las diferencias de las predicciones son notables. Donde hay que destacar que todas las formaciones han sufrido una menor reducción de su área de distribución potencial en el escenario B2, donde ocho de doce de las formaciones están situadas en valores menores al 30% de pérdida, lo que viene a indicar que este escenario que describe un mundo en el que predomina la sostenibilidad económica, social y ambiental con una población que aumenta moderadamente y un desarrollo económico intermedio (NAKICENOVIC, DAVISON et al. 2000) es el más adecuado para la permanencia de la mayor parte de las formaciones forestales. En cambio en el escenario A2 existe un claro patrón de disminución del área de las diferentes formaciones, se trata del escenario donde se ha producido una mayor reducción, donde seis formaciones han desaparecido más del 50% de su distribución actual. Y en el escenario A1 cinco de las doce formaciones han disminuido por debajo del 50%.

Por otro lado hay que destacar que tres formaciones forestales han aumentado su área de distribución potencial en los tres escenarios. En el escenario A1 el *Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas* aumentó su distribución en 109,48%; y en el escenario A2 el *Bosque altimontano pluvial de Yungas* aumentaría su área de distribución en un 104,3%, ambas formaciones se distribuyen en las laderas montañosas medias y altas a una altitud entre los 2.000 y 4.000 metros de altitud. En cambio el *Bosques de piedemonte del suroeste de la Amazonía* aumentaría en un 125,58% su área de distribución en el escenario B2, desarrollado sobre llanuras aluviales con suaves pendientes.

En este sentido los datos resultantes de los modelos predictivo representan el grado de idoneidad de la presencia de una especie según el rango preestablecido que va de 0 (incompatible) a 1 (idóneo). En un sentido estricto, el modelo señala solamente qué zonas del territorio son similares climáticamente a las ocupadas por la formación forestal analizada obviando muchos otros factores. Por ello, es necesario aclarar que no es acertado establecer una correspondencia exacta entre la extensión idónea resultante de los modelos con la extensión real futura ya que existen factores de otro tipo (biótico o influencia humana) que en la práctica harán imposible que un bosque se establezca en la realidad (FELICÍSIMO, MUÑOZ et al. 2011).

Esta circunstancia condiciona decisivamente los procesos de expansión de las masas forestales, que a su vez están regidos por una serie de elementos, mecanismos y procesos ecológicos como competencia, fragmentación, estabilidad, perturbación, forma de los fragmentos y conectividad (GREEN and OSTLING 2003; STORCH, KEIL et al. 2012) estos factores no están incluidos en nuestros modelos predictivos.

Con el fin de aumentar la posibilidad de predecir y prevenir los efectos del cambio climático sobre la biosfera a corto o largo plazo, será necesario continuar realizando estudios que permitan conocer cada vez más y mejor lo que está sucediendo en realidad.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio hemos mostrado que es posible modelizar la distribución de las especies forestales que conforman la Cordillera Andina cuando se dispone de información amplia y precisa de los indicadores de presencias y las variables bioclimáticas. Podemos finalmente concluir que:

- La distribución general de las formaciones forestales pueden describirse eficazmente mediante los valores de las variables climáticas.

- De forma general, los cambios previstos para un futuro a medio plazo son la reducción del área potencial de los bosques con la excepción del Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas, del Bosque Altimontano Pluvial de Yungas y los Bosques de piedemonte del suroeste de la Amazonía.
- La reducción de área es generalmente importante, de más del 50%, aunque el área potencial remanente es frecuentemente superior al área actual real.
- Este estudio analiza cuatro escenarios para un periodo de tiempo actual y para el periodo 2040-2069.
- La base de datos climática utilizada ha sido obtenida de Worldclim, junto con los datos de las formaciones forestales usados proceden de NatureServe.
- Es muy recomendable que en estudio puedan ampliarse el análisis del resto de las formaciones forestales en el futuro comentando aquellas que aun teniendo los resultados no han podido ser analizadas por cuestión de tiempo.

A pesar de las incertidumbres y limitaciones de los modelos, los resultados obtenidos pueden, sin duda, proporcionar información muy valiosa y útil, que pueden servir de orientación tanto a los especialistas en vegetación como a los responsables de políticas para la definición de las acciones de cara a la conservación de la biodiversidad en la Cordillera Andina y a la adaptación al cambio climático. En definitiva, los modelos de idoneidad constituyen en el siglo XXI, ante las previsiones de alteraciones de las condiciones climáticas, una herramienta fundamental para abordar los trabajos de conservación de los bosques, que implica en gran medida el mantenimiento de la integridad ecológica.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ATAROFF, M. and L. SARMIENTO (2003) Diversidad en los Andes de Venezuela. I Mapa de unidades ecológicas del Estado de Mérida. **CD-ROM**,
- BUYTAERT, W. and B. BIEVRE (2012). "Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes." Water Resources Research **48**.
- BUYTAERT, W., F. CUESTA, et al. (2011). "Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions." Global Ecology and Biogeography **20**: 19-33.
- CUESTA, F. (2009). Atlas de los Andes del Norte y Centro. J. S. Martínez, M. T. Becerra, F. Cuesta and L. Quiñonez. Perú, Secretaría General de la Comunidad Andina.
- DE PANDO, B. B. and J. P. GILES (2007). "Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica." Geofocus(7): 100-119.
- DORADO NÁJERA, A. (2010). ¿Que es la biodiversidad? Una publicación para entender su importancia, su valor y los beneficios que nos aporta. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- ELITH, J., C. H. GRAHAM, et al. (2006). "Novel methods improve prediction of species distribution from occurrence data." Ecography **29**: 129-151.
- FELICÍSIMO, A., A. CUARTERO, et al. (2012). "Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study." Springer **10**(2): 175-189.
- FELICÍSIMO, A., A. GÓMEZ, et al. (2005). Potencial distribution of forest species in dehesas of Extremadura (Spain). Advances in GeoEcology. S. Schnabel and A. Ferreira. Reiskirchen, Catena Verlag. **37**: 231-246.
- FELICÍSIMO, A., J. MUÑOZ, et al. (2011). Bosques y cambio global. España - México. Madrid, CYTED.
- FERRIER, S. and A. GUISAN (2006). "Spatial modelling of biodiversity at the community level." Journal of Applied Ecology **43**(3): 393-404.

- GARCÍA-ROMERO, A., J. MUÑOZ, et al. (2009). "Relationship between climate change and vegetation distribution in the Mediterranean mountains: Manzanares Head valley, Sierra De Guadarrama (Central Spain)." Springer Science **100** (3-4): 645-666.
- GREEN, J. L. and A. OSTLING (2003). "Endemics-area relationships: The influence of species dominance and spatial aggregation." Ecology **84**(11): 3090-3097.
- HERNÁNDEZ, P. A., C. H. GRAHAM, et al. (2006). "The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods." Ecography **29**: 773-785.
- HIJMANS, R. J., S. E. CAMERON, et al. (2005). "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas." International Journal of Climatology **25**: 1965-1978.
- HIRZEL, A. and A. GUISAN (2002). "Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling." Ecological Modelling **157**(2-3): 331-341.
- JAYNES, E. T. (1957). "Information Theory and Statistical Mechanics." Physical Review **106**(4): 620-630.
- JENSEN, M., P. BOURGERON, et al. (1994). Scientific information required to prescribe for sustainable ecosystems. Portland, US Dept. of Agriculture, Forest Service.
- LOPEZ BERMÚDEZ, F. (2000). "Impactos regionales del Cambio Climático. Valoración de la vulnerabilidad." Papeles de Geografía **32**: 77-95.
- MENGES, E. S. (2000). "Population viability analyses in plants: challenges and opportunities." Trends Ecol **15**: 51-55.
- MUJICA BARREDA, E. and M. HOLLE (1998). Los Andes y la transformación cultural del paisaje. Paisajes Culturales en los Andes, Peru, UNESCO.
- MUÑOZ, J. and A. FELICÍSIMO (2004). "Comparison of statistical methods commonly used in predictive modelling." Journal of Vegetation Science **15**(2): 285-292.
- NAKICENOVIC, N., O. DAVISON, et al. (2000). Escenarios de emisiones. Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC. G. I. s. e. c. climático, Intergovernmental Panel on Climate Change
- NAVARRO, G. and W. FERREIRA (2007) Mapa de vegetación de Bolivia a escala 1:250.000. The Nature Conservancy
- OLDEMAN, I. R. (1988). An Agroclimatic Characterization of Madagascar, International Soil Reference and Information Centre.
- PARMESAN, C. (2006). "Ecological and evolutionary responses to recent climate change." The Annual Review of Ecology **37**: 637-669.
- PERALVO, M., R. SIERRA, et al. (2007). "Identification of biodiversity conservation priorities using predictive modelling: An application for the equatorial Pacific region of South America." Biodiversity and Conservation **16**(9): 2649-2675.
- PHILLIPS, S. J., R. P. ANDERSON, et al. (2006). "A maximum entropy modelling of species geographic distributions." Ecological Modelling **190**: 231-259.
- ROOT, T. L., D. P. MACMYNOWSKI, et al. (2005). "Human-modified temperatures induce species changes: Joint attribution." Proceeding of the National Academy of Sciences (PNAS) **102**: 7465-7469.
- STORCH, D., P. KEIL, et al. (2012). "Universal species-area and endemics-area relationships at continental scales." Nature **488**(7409): 78-83.
- THUILLER, W., C. ALBERT, et al. (2008). "Predicting global change impacts on plant species distributions: Future challenges." Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics **9**(137-152).
- TOVAR, C., C. A. ARNILLAS, et al. (2013). "Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Climate Conditions." Plos One **8**(5): 1-11.
- VAUGHAN, I. P. and S. J. ORMEROD (2003). "Improving the quality of distribution models for conservation by addressing shortcomings in the field collection of training data." Conservation Biology **17**(6): 1601-1611.