

DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ESPECIE ARBÓREA *Astronium graveolens* Jacq. Y SU IMPORTANCIA DE CONSERVACIÓN AMBIENTAL EN ANTIOQUIA

Stephania Carmona Balanta ¹, Jessica María García Polanco ²

Estudiantes Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática - Universidad de Antioquia

RESUMEN

Se elaboraron dos modelos para la determinación de la distribución espacial de la especie *Astronium graveolens* Jacq. (diomato) utilizando información climática, topográfica y edáfica junto con los datos de presencia de la especie. Uno de los métodos utilizados fue el modelo de máxima entropía (MaxEnt), seguido por el modelo multicriterio de escala jerárquica descrito por Saaty, ambos desarrollados con el mismo objetivo de conocer los sitios que aporten las mejores condiciones para el poblamiento de una especie en determinada región. Se realizó la modelación para todo Colombia mediante ambos métodos a fin de seleccionar aquel modelo que mejor representara la distribución actual de la especie, teniendo en cuenta las áreas de bosque seco tropical del país, y de esta manera, utilizar la información como base para la caracterización sobre la importancia de conservación de la especie en Antioquia, que es donde se presenta restricción de uso según la autoridad ambiental regional (CORANTIOQUIA). El modelo que mejor representó la distribución de la especie fue MaxEnt, dado que su resultado posee características propias del área representativa del bosque seco tropical propuesto por el Instituto Von Humboldt para Colombia; mientras que Saaty propone áreas en donde existe la disponibilidad de todos los recursos ecológicos teóricos para el crecimiento de la especie y adicionalmente no considera la importancia estadística de los puntos de presencia, por lo que se obtienen zonas aparentemente aptas en lugares donde no existe su comprobación física o que requieren de intervención humana para adaptar las condiciones ambientales faltantes.

Palabras clave: *Astronium graveolens*, Modelos de distribución de especies, MaxEnt, Saaty, Conservación Ambiental, Distribución Potencial.

DETERMINATION OF SPATIAL DISTRIBUTION FOR THE ARBOREAL SPECIES *Astronium graveolens* Jacq. AND ITS IMPORTANCE OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION IN ANTIOQUIA

ABSTRACT

Two models were developed for the determination of the spatial distribution of the *Astronium graveolens* Jacq. specie using climatic, topographic and edaphic information with presence data records of the specie. One of the methods was the Maximum Entropy model (MaxEnt), and the process hierarchical analysis described by Saaty, both developed with the same objective of knowing the sites that provide the best conditions for a given species in a particular region. The modeling was carried out for all of Colombia using both methods in order to select the best model for represent the current distribution of the specie, given the dry tropical forest areas of

the country, and thus, use the information for the characterization about the importance of species conservation in Antioquia, which has restriction of use according to the regional environmental authority (CORANTIOQUIA). The model with better representation of the specie distribution was MaxEnt, given that the result has typical characteristics of the representative area for the tropical dry forest proposed by the Von Humboldt Institute for Colombia; whereas, Saaty proposes areas where there is the availability of all the theoretical ecological resources for the species growth, additionally does not consider the statistical importance of the presence points so that apparently suitable areas are obtained in places where there is no physical verification or that require human intervention to adapt the missing environmental conditions.

Keywords: *Astronium graveolens*, *Species Distribution Models*, *MaxEnt*, *Saaty*, *Environmental Conservation*, *Potential Distribution*.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo, los bosques representan el soporte vital de la humanidad por lo que proporcionan múltiples bienes y servicios para el funcionamiento adecuado de los ecosistemas, sin embargo, con el avance del desarrollo de los países y la creciente demanda de los recursos naturales, se genera una constante presión sobre los bosques al punto de observar un crecimiento progresivo de la deforestación.

La alteración de los ecosistemas ya sea por factores naturales o antrópicos afecta la distribución de las especies por lo que, si estas especies no cuentan con capacidades de resistencia o desarrollo de mecanismos satisfactorios de dispersión, podemos encontrarnos ya sea con su presencia restringida a pocos ecosistemas o con su futura desaparición [1]. Dicho lo anterior, podemos definir que el área de distribución de una especie es aquel espacio geográfico en donde ésta interactúa permanentemente con el ecosistema [2].

Una forma de representar esta distribución, es por medio de modelos de distribución de especies (SDM) que se pueden definir como una representación de la presencia de las especies la cual se relaciona con información sobre las características ambientales y espaciales de los registros de presencia conocidos, dichos modelos pueden ser utilizados para predecir o entender la distribución de las especies en el paisaje [3]. Si existe una relación, esta se extrapola al resto del área de estudio obteniendo un valor en cada lugar que suele interpretarse como la probabilidad de presencia de la especie en ese punto [4].

Además, existen otras maneras de caracterizar una especie de forma espacial basándose en evaluaciones multicriterio [5]., esta técnica permite, por medio de la superposición de información geográfica, establecer criterios e indicadores que ayuden a la identificación de los espacios aptos según las variables incidentes; obteniendo como resultado su representación en sistemas de

información geográfica por medio de mapas zonales de adecuabilidad ambiental en donde la especie pueda desarrollarse [6].

Las variables ambientales son importantes en estos modelos ya que a partir de ellos se puede generar una predicción espacial de la aptitud de la especie, Según Lahoz-Monfort [7], la información medioambiental usada en la caracterización de nichos a menudo debe incluir variables como clima, topografía y suelos. Aun así, los resultados podrían no asemejarse a los escenarios reales por las que atraviesa esa zona. [8], debido a que eventos como las barreras geográficas, los factores históricos y el equilibrio de las condiciones ambientales son circunstancias que los modelos no reflejan en sus predicciones [9]; además de existir factores limitantes en la exactitud cómo son los supuestos ecológicos [10].

La selección del modelo a usar dependerá en gran medida de la información disponible, de la escala de trabajo y de la finalidad con la que se desarrollen. Actualmente el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt está desarrollando una propuesta de biomodelos para identificar la distribución de las especies en Colombia [11].

Un referente para la toma de decisiones sobre las especies en el país, está regida por la categorización de especies en estado de amenaza está regidas según la resolución 1912 de 2017 del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [12].; para el caso de Antioquia, en la Resolución 10194 de 10 de abril de 2008 [13]., el artículo segundo establece la restricción en la jurisdicción de CORANTIOQUIA el uso y el aprovechamiento de 13 especies, en donde se encuentra el *Astronium graveolens* comúnmente llamado Diomato, especie objeto de este estudio.

Dada la importancia de la conservación de las especies pioneras del bosque seco tropical, este estudio pretende conocer la distribución potencial del *astronium graveolens* en el territorio nacional haciendo énfasis en el departamento de Antioquia

en donde se encuentra su restricción de uso y aprovechamiento, con el fin de analizar si esta condición se ve sustentada por limitaciones de presencia de la especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El estudio se ha realizado en todo el territorio colombiano, país situado en la esquina noroeste de América del Sur.

Colombia posee una topografía variada que permite alojar ecosistemas con gran cantidad de especies de flora, contando actualmente con 45.000 especies. Uno de los ecosistemas más desconocidos, frágiles y amenazados es el Bosque Seco Tropical (BST) donde existe una fuerte estacionalidad de lluvias marcada por una época seca (menos de 100 mm de lluvia) de 4 a 6 meses al año [14]. El *Astronium graveolens* Jacq. es una especie pionera de este ecosistema.

Caracterización de la especie

El *Astronium graveolens* Jacq. Comúnmente llamado diomate, tigrillo, ciruelo, santa cruz, gusanero, es un árbol que puede alcanzar hasta 40 m de altura y de 60 a 90 cm de diámetro; su madera es muy pesada, durable y resistente a la pudrición y presenta una facilidad de preservación y trabajo.

Es una especie heliófila que prefiere lugares abiertos y soleados con climas secos o húmedos. Suele crecer en terrenos planos, altos y bien drenados. Se le encuentra en mayor frecuencia en un rango altitudinal de 200 a 800 msnm.

Se encuentra mayormente en un rango de temperatura media anual de 18 a 22°, presente en suelos desde aluviales fértiles a rocosos y mal drenados y con texturas francas a franco arenosas, sus condiciones de pH son neutras y su estación seca puede variar de 3 a 6 meses [15]. Posee una floración anual y se presenta asociada al periodo más seco del año [16].

Recolección de los puntos de presencia

Se recolectaron puntos geográficos de presencia de la especie *Astronium graveolens* Jacq. con información disponible de las colecciones botánicas de los herbarios de la Universidad de Antioquia, la Universidad de Medellín, las bases de datos sobre

inventarios forestales de empresas privadas y del portal Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Se obtuvieron en total 1720 puntos; según dicha información la especie está presente en 51 municipios distribuidos en 14 departamentos.

Depuración de los datos

Para realizar la depuración se tuvieron algunos criterios a considerar como: que no estuvieran repetidos, que todos los puntos tuvieran coordenadas rastreables dentro del territorio nacional, que la ubicación presentará una relación con la base teórica sobre la distribución de la especie; esta última debido a la cantidad considerable de los puntos que dificultan la verificación taxonómica de cada espécimen, además de no hacer parte del alcance principal del presente estudio. Realizada la depuración, se obtuvo una cantidad de 767 puntos, para los cuales se llevó a cabo el último criterio necesario para realizar la modelación, que consistía en seleccionar un punto cada 1km², distancia que coincide con la resolución de las variables ambientales, de esta forma se evita el efecto de la autocorrelación espacial [7]; finalmente fueron seleccionados un total de 141 puntos de presencia de la especie (Figura 1).

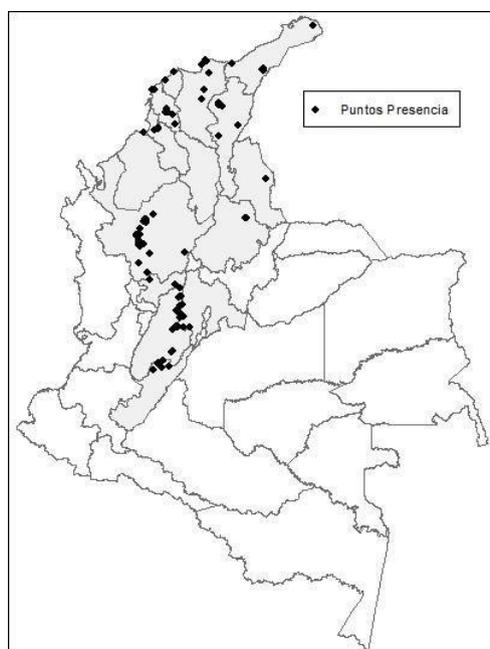


Figura 1. Distribución de puntos de presencia del *Astronium Graveolens* Jacq.

Definición de las variables ambientales

La selección de las variables que podrían tener alguna influencia sobre el crecimiento de la especie

se determinó mediante la caracterización de la especie, como resultado se seleccionaron variables climáticas, topográficas y edáficas que representan las necesidades ecológicas de la especie. Los datos climáticos fueron obtenidos de la base de datos WorldClim, que contiene 19 factores bioclimáticos, que representan tendencias anuales, estacionalidad climática y factores ambientales limitantes [18]; dentro de las variables topográficas se tuvo en cuenta el modelo de elevación digital, el cual se descargó del sitio web de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [19], a partir del cual se generó la variable que representa la pendiente (%); por último, se obtuvieron 6 variables que representan características del suelo (% de Limo, % de Arcilla, % de Arena, Capacidad de intercambio catiónico, Ph y contenido de carbono orgánico), estas fueron obtenidas de la base de datos World Soil Information de ISRIC [20].

Las variables ambientales fueron transformadas a formato ASCII GRID (.asc) y recortadas al área de estudio, estas están referidas a un mismo sistema de referencia (Geográfico [Latitud-Longitud], Dátum WGS-84) y bajo una misma resolución espacial (1km²).

Análisis de variables ambientales

Debido a que parte de las variables ambientales generalmente se encuentran correlacionadas y esto puede afectar la calidad de los modelos, se realizó un análisis de correlación de variables utilizando R, con el fin de seleccionar las variables con niveles bajos de correlación, para esto se seleccionaron aquellas variables cuyos coeficientes de correlación cumplieran $|r| < 0.7$, para la selección de las variables se priorizaron aquellas que tuvieran mayor relación con la distribución de la especie conforme a la caracterización realizada. Posteriormente, se calculó el factor de inflación de la varianza (VIF), el cual proporciona una medida que permite estimar las variables menos colineales, dicho valor debe ser $VIF > 5$ [21].

La finalidad de estos análisis consiste en seleccionar las variables con mayor capacidad explicativa y, a la vez, menos correlacionadas entre sí.

Modelos de Distribución de Especies

Son muchos los factores que tienen influencia en la distribución de las especies, entre los que se reconoce de forma general la temperatura, topografía, tipos de suelo y la disponibilidad de

recursos hídricos como los más influyentes. La mayoría de esta información ha sido registrada con el paso del tiempo, lo que ha permitido desarrollar diversas capas denominadas bioclimáticas. Las capas bioclimáticas permiten analizar el espacio ecológico de las especies ya que sirven como insumo en algoritmos de modelación de especies, estos algoritmos permanecen en continuo desarrollo y según Martínez [22], permitirán resolver distintas preguntas biológicas y generar hipótesis de distribución de especies bajo distintos escenarios geográficos y temporales.

En la actualidad se ha desarrollado un gran número de algoritmos para modelar la distribución de especies, los cuales en su gran mayoría utilizan información de presencia o rangos de clima óptimos para el desarrollo de la especie junto con una serie de capas climáticas con los cuales se desarrolla un modelo de aptitud en determinada región de estudio [23]. Estos algoritmos tienen sus fortalezas y debilidades a la hora de predecir el área potencial que ocupa una especie, proporcionando mejores resultados en algunas especies más que en otras, por lo que Pando & Giles [24] afirman que, resulta conveniente aplicar varios métodos predictivos a la misma especie para seleccionar el modelo que mejor se ajuste a los datos de evaluación.

Modelo de Distribución de Máxima Entropía (MaxEnt)

La entropía es el grado de evolución (orden) existente en un sistema. El principio de la entropía máxima afirma que, para todo sistema cerrado, la entropía siempre tiende a aumentar, es decir que todo sistema cerrado siempre tiende al desorden o a la incertidumbre estadística. MaxEnt estima la probabilidad de distribución esperada, encontrando la probabilidad de distribución que es más uniforme (entropía máxima), dadas las restricciones de que el valor esperado de cada variable predictiva ambiental ajuste con su promedio empírico (valores para los datos de registros de presencia) [25].

La distribución de probabilidad desconocida (π), se calcula sobre un conjunto finito X , en el que sus elementos individuales son considerados como puntos. La aproximación de la distribución π asigna una probabilidad no negativa $\pi(x)$ para cada punto x , y estas probabilidades suman un total de 1. La entropía de π se define como:

$$H(\Omega) = -\sum_{\omega \in \Omega} p(\omega) \ln p(\omega) \quad (1)$$

El algoritmo comienza con una distribución de probabilidad e iterativamente altera un peso en cada momento para lograr alcanzar la distribución de probabilidad óptima que sea una combinación lineal de todas las variables y que varíe entre 0 y 1 [26], por lo que en el caso de que en una celda se tenga el valor máximo de probabilidad indica que en esta se presentan condiciones naturales óptimas para el establecimiento de la especie.

Configuración del modelo

Para la ejecución del modelo se dividieron los puntos de presencia de la especie en dos conjuntos de datos, un 70% para entrenamiento del modelo y un 30% para su validación [27], adicionalmente se generaron 10,000 puntos de trasfondo o pseudo-ausencia utilizados por MaxEnt para la representación de las características generales de las variables en la escala geográfica del estudio. Se utilizó la configuración predeterminada de los tipos de niveles de regularización y las características generales del modelo [28], se generaron 10 réplicas para el modelo seleccionando el formato de salida logístico, este proporciona un estimado entre cero y uno de probabilidad de presencia.

Validación del modelo

Con el fin de evaluar la calidad del modelo, su desempeño y consistencia, se realizaron tres medidas estadísticas: 1) Validación cruzada (*crossvalidation*), para el que se utilizaron puntos de presencia que no fueron considerados en la modelación (puntos de prueba), 2) Estadístico AUC (*Area Under Curve*) el cual mide la capacidad predictiva del modelo para clasificar correctamente las presencias y ausencias, valores del AUC cercanos a 1 indican modelos con buen desempeño y por el contrario AUC cercanos a 0 indican malos modelos [29], 3) Índice Kappa (*Kappa de Cohen*), es una medida que indica la concordancia del modelo entre lo observado y lo predicho [30].

Todo el proceso de configuración y de validación del modelo MaxEnt fue automatizado mediante lenguaje R, utilizando el paquete generado por Hijmans en 2017 [31].

Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

Fue desarrollado a finales de los 60 por Thomas Saaty, quien formuló una herramienta sencilla para

ayudar a las personas responsables de la toma de decisiones. El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos según su nivel de relevancia (2). Su base fundamental es la realización de comparaciones pareadas, la cual utiliza una escala con valores de 1 a 9 (1,3,5,7,9) para calificar las preferencias relativas de las variables utilizadas como se explica en la investigación de Cruz, 2017. [32].

Para la realización de este método matemático se utilizó la herramienta macro Saaty (desarrollada por el profesor Julián Giraldo) para ponerla a disposición de 6 profesionales que realizarían la jerarquización de las variables. El grupo fue integrado por 4 biólogos, 1 ecólogo y 1 ingeniero ambiental, todos con experiencia en inventarios forestales a nivel nacional, estos proporcionaron evaluaciones subjetivas relacionando de mayor a menor la importancia de cada variable. Finalizada la macro, está arroja los porcentajes de los pesos ponderados para cada variable a los que se les determina el promedio para obtener la jerarquización.

Por otro lado, dado que las variables ambientales tienen diferentes escalas de medición, es necesario realizar una estandarización a fin de establecer escalas cualitativas comunes, para este punto, la caracterización de la especie y los puntos de presencia son relevantes dado que de esta forma se determinan los rangos de las condiciones necesarias para que la especie pueda prosperar bajo condiciones naturales. Las variables se estandarizaron de acuerdo a la escala de 1 a 9 utilizando la herramienta Reclassify de ArcGIS.

Con los pesos ponderados y las variables reclasificadas se genera el mapa de adecuabilidad (A) mediante una combinación lineal de cada variable con su respectivo peso con la ecuación (2).

$$A = P_1 * V_1 + P_2 * V_2 + P_3 * V_3 \dots + P_n * V_n \quad (2)$$

Donde P son los pesos y V cada una de las variables.

3. RESULTADOS

Definición de variables ambientales

Una vez realizado el análisis de correlación de las 28 variables ambientales, se encontró que existían variables altamente correlacionadas, entre ellas las variables bioclimáticas derivadas de la temperatura, así mismo las variables bioclimáticas derivadas de la precipitación, por otra parte, la elevación tuvo una correlación inversa muy alta con la temperatura; algunas variables mostraron una correlación muy baja. De este análisis se seleccionaron las variables con un coeficiente de correlación menor a 0.7, dando prioridad a las variables que más tienen influencia en la presencia de la especie, conforme a la caracterización realizada, como resultado (ANEXO 1) se obtuvo un total de 12 variables

Con las 12 variables resultantes, se realizó una primera ejecución del modelo MaxEnt como parte de análisis exploratorio de las mismas, para evaluar su contribución, de este análisis se determinó que las variables de Arena, Limo y Capacidad de intercambio catiónico no aportan información relevante para la distribución de la especie con aportes menores al 1.5%, por tal razón dichas variables fueron eliminadas del análisis.

Se realizó la validación del factor de inflación de la varianza (VIF) para las 9 variables resultantes (Tabla 2), en donde se demuestra que no existe colinealidad entre ellas, dado que para todas el VIF es menor a 5.

Tabla 2. Variables resultantes

VARIABLES
BIO12
pH
BIO7
BIO1
CCO
BIO4
CMS
PENDIENTE
% DE ARCILLA

BIO1: T° promedio anual; BIO4: Estacionalidad de la temperatura; BIO7: Rango anual de T°; BIO12: Precipitación anual (mm); CCO: Contenido de carbono orgánico del suelo; CMS: Constantes de meses secos

Modelo de distribución MaxEnt

El resultado para este modelo (Figura 3), muestra que la distribución potencial de la especie se encuentra hacia zonas con promedios de altitud por departamento que varían entre 100 y 1200 msnm, las zonas con mayor porcentaje de aptitud o

probabilidad de presencia tienen una alta correspondencia con las áreas del bosque seco tropical (BST) definidas por el Instituto Alexander von Humbolt (Figura 2). El departamento con mayor área apta es el Tolima, seguido por los departamentos de Cesar, La Guajira, Bolívar, Córdoba y Antioquia.

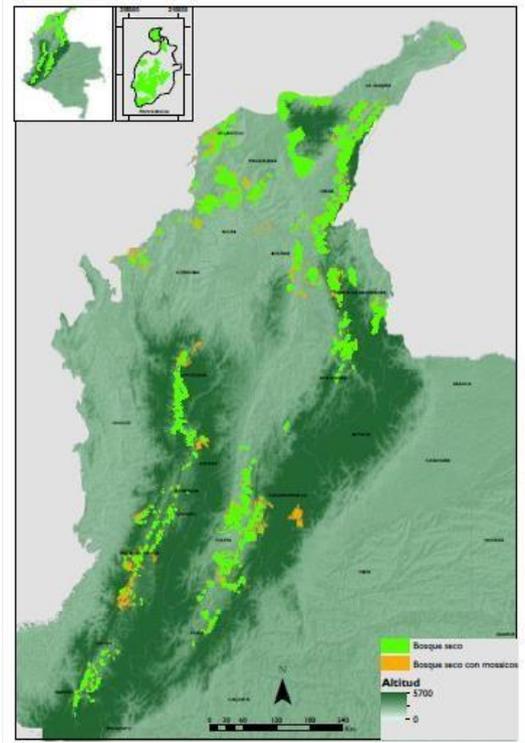


Figura 2. Distribución de coberturas del Bosque Seco Tropical en Colombia.

El análisis de la importancia y/o contribución de las variables ambientales en la respuesta del modelo, se observó mediante los resultados de la prueba de Jackknife, con el cual se pudo determinar que la variable ambiental con mayor aporte al modelo cuando se usa de forma aislada es PH, que por lo tanto parece tener la información más útil por sí misma; por otro lado, la variable ambiental que mayor afecta el desempeño del modelo cuando se omite es la temperatura promedio anual (BIO1), que por lo tanto parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables.

Con respecto al desempeño del modelo, de las 10 iteraciones realizadas se obtuvo para los datos de entrenamiento valores del AUC entre 0.9717, máximo 0.9771 con un promedio de 0.9734; para el

caso de los datos de prueba el AUC varió entre 0.9810 y 0.9848 con un promedio de 0.9835, con lo cual se puede considerar que el modelo presenta una buena capacidad predictiva. El cálculo del índice Kappa arrojó un valor de 0.92 lo que indica una alta concordancia del modelo.

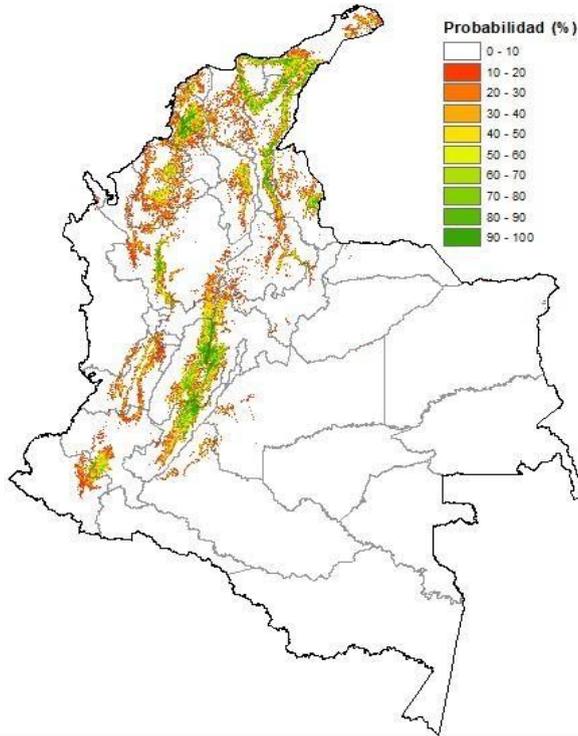


Figura 3. Modelo de distribución MaxEnt para el *Astronium Graveolens Jacq.*

Análisis Jerárquico (AHP)

El resultado de la ponderación de las variables mediante el método de Saaty, arrojó que la variable con mayor peso son la Bio12 y el pH seguida de BIO7 y BIO1.

Tabla 3. Pesos de las variables

VARIABLE	PESO
BIO12	0,151
pH	0,151
BIO7	0,123
BIO1	0,12
CCO	0,106
BIO4	0,102
CMS	0,092
PENDIENTE	0,081
% DE ARCILLA	0,071

Con la definición de los pesos y las variables reclasificadas se generó el mapa de adecuabilidad el cual arrojó valores de importancia entre 4 y 9.

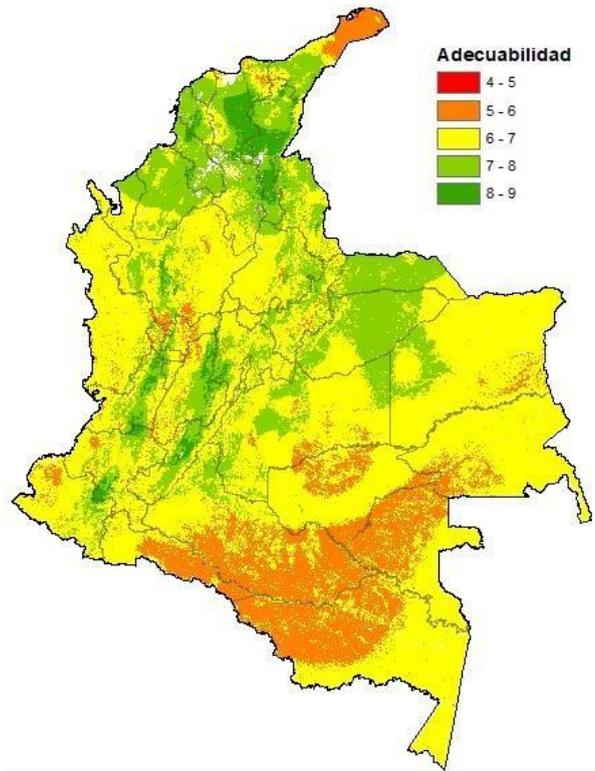


Figura 4. Modelo de distribución AHP (Saaty) para el *Astronium Graveolens Jacq.*

Definición de umbrales

En vista que los modelos generados presentan diferente escala de predicción, para realizar la comparación de estos se definieron umbrales por medio de los cuales se generaron mapas binarios de presencia/ausencia, entendiendo la presencia como las zonas con alta probabilidad para la distribución de la especie (MaxEnt) o como las zonas en donde se cumplen la mayoría de las condiciones disponibles para la especie (AHP).

Para el caso de Maxent se seleccionó el umbral 10 *percentile training presence logistic threshold* proporcionado por el modelo, el cual indica la probabilidad a la cual el 10% de los puntos de presencia pueden caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial, método que es comúnmente usado en modelos de distribución de especies [33], el promedio de este umbral para las réplicas del modelo arrojó un valor de 0.2 es decir que la probabilidad de presencia del especies se encuentra por encima del 20%.



Figura 5. Zonas de presencia de la especie con el modelo MaxEnt.

Para el caso de AHP, se definió conforme a los rangos de importancia (1, 3, 5, 7, 9), que el último rango (7-9) representa el cumplimiento de la mayoría de los requerimientos ambientales de la especie, conforme a las variables evaluadas.



Figura 6. Zonas de presencia de la especie con el modelo AHP.

Selección del mejor modelo

Es evidente que el método de AHP predice más cantidad de área apta para la especie que el modelo de MaxEnt, sin embargo al analizar las principales diferencias se pudo determinar que en la región de la Orinoquia aunque el método de AHP refleje amplias zonas aptas para la especie, se debe considerar que no todas las variables ofrecen las mejores condiciones, esto quiere decir que si bien la especie se puede desarrollar en esas zonas, se hace necesaria la intervención humana a fin de complementar las variables que no alcanzaron el mejor de los rangos, por ejemplo el Ph o el contenido de arena en el suelo. Diversos estudios se enfocan en la necesidad de mejorar las condiciones de los suelos de la Orinoquia dado que entre las características comunes de sus suelos se encuentra una acidez marcada y una deficiencia de minerales y nutrientes [34]; [35].

Por lo anterior, el modelo AHP no garantiza el desarrollo de la especie con las condiciones naturales del medio ambiente, por el contrario, MaxEnt arroja un área más ajustada conforme a la distribución realizada de la especie, proporciona

medidas estadísticas de alta confiabilidad y al analizar las variables ambientales en las zonas con presencia de la especie, se puede establecer que contienen las mejores condiciones para el desarrollo de la misma.

Resultado y análisis de la presencia de la especie (Colombia y Antioquia)

El *Astronium graveolens* Jacq presenta una distribución potencial a lo largo del país, en donde su probabilidad de ocurrencia establece que puede abarcar claramente dos de las cinco regiones naturales: la Andina y la Caribe. Sin embargo, su presencia en Antioquia supone un área menor en comparación con los demás departamentos.

Teniendo en cuenta que, según MaxEnt, el área de distribución de la especie para antioquia es de 6238 Km² correspondiente al 7,35% del área total y que la especie *Astronium graveolens* es pionera de un ecosistema tan vulnerable como el bosque seco tropical, se considera que es importante que existan normas que restrinjan su uso y aprovechamiento, no porque su presencia como especie sea de poca frecuencia sino porque su entorno está limitado a unas pequeñas zonas del país que son las que poseen la disponibilidad de recursos para que la especie persista.

4. DISCUSIÓN (O ANÁLISIS DE RESULTADOS)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP en sus siglas por Analytic Hierarchy Process) es un método matemático creado para evaluar opciones cuando se tienen en consideración varios criterios [36]. Es un modelo ampliamente adoptado por compañías para el soporte de procesos de toma de decisiones; si bien se ha utilizado en múltiples aplicaciones, la mayoría son basados en áreas pequeñas, no como el caso presente en el que intentamos predecir la probabilidad de distribución de una especie para un territorio nacional que comprende factores mucho más cualitativos como variables bióticas de las cuales no se obtiene información precisa disponible en capas ráster, pero que sí son la base para comprender que el ejercicio a realizar va más allá de superponer subjetivamente según un criterio humano una jerarquización de variables cuando en realidad, todas hacen parte de un elemento holístico.

El resultado de los pesos ponderados obtenidos en saaty, refleja una subjetividad y dependencia de la

información, que anteriormente se ha mencionado que juegan un papel fundamental en este método [37]. La escogencia de las jerarquías de las variables, a pesar de haber sido realizado por personal idóneo con conocimientos forestales y áreas de acción en inventarios nacionales, no pudieron ser teóricamente sustentadas y posteriormente comparadas a los resultados obtenidos en MaxEnt.

Un mapa de adecuabilidad de zonas presuntamente aptas explica la riqueza y diversidad de recursos disponibles para la especie pero no necesariamente la sumatoria adecuada para que el *Astronium graveolens* realmente pueda prosperar en todas las zonas propuestas por el mapa, estableciendo así que la determinación de la contribución de las variables sesga el resultado al tomarla como una síntesis de prioridades o un tema aislado y no como un conjunto de requerimientos ambientales mínimos y no absolutos.

Los modelos de distribución potencial de especies basados en técnicas estadísticas como MaxEnt son capaces de determinar de una forma ajustada la distribución realizada de la especie al hacer uso de registros de presencia de la especie, sin embargo estos modelos dependen de la representatividad de los puntos de presencia así como de la exactitud de las variables ambientales que utilizan, adicional no consideran todos los aspectos que inciden en la distribución de las especies como la interacción natural de las especies, las barreras ecológicas y biogeográficas [29], sin embargo estos productos se convierten en un insumo valioso para establecer estrategias de conservación y restauración al proporcionar información precisa sobre las condiciones ambientales que determinan la capacidad de los territorios para el desarrollo de las especies.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se considera la distribución potencial de la especie *Astronium graveolens* por factores naturales, sin embargo es probable encontrar su presencia en zonas del país que no estén consideradas dentro de los mapas producto de los modelos (ni dentro de las zonas del bosque seco tropical), debido a que el diomato es una especie cuyos rangos de resistencia son amplios y que es de interés maderable a nivel nacional por lo que puede ser cultivada con fines comerciales y podrían

replicarse sus requerimientos ambientales para que la especie pueda crecer, ya sea aportando agua por sistema de riego o agregando sustratos ricos en nutrientes sin que exista la necesidad de encontrarse en suelos comúnmente aptos para su desarrollo.

En términos generales la metodología de análisis jerárquico (AHP) predice mayor cantidad de área apta que el modelo MaxEnt, este resultado es útil en el caso que se quiera encontrar zonas en las cuales se pueda producir bajo determinadas condiciones climáticas, así en el momento no se encuentre establecido; sin embargo, para el análisis de la distribución de la especie de una manera más precisa, se establece que MaxEnt representa mejor estas zonas, además es un método más robusto en cuanto a análisis de presencia y validación del modelo final, partiendo de datos reales de observación de la especie.

Teniendo en cuenta los resultados de distribución potencial propuesto por MaxEnt, es importante reconocer las acciones encaminadas a la preservación ecológica de la especie a nivel departamental, más aún cuando en el departamento existe la jurisdicción ambiental de 3 corporaciones en donde el *Astronium graveolens* se encuentra restringido solo por CORANTIOQUIA.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Biodiversidad Mexicana, C. N. (2012). Distribución de las especies. Obtenido de Biodiversidad Mexicana, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribe_sp.html
- [2] Zunino, M., & Zullini, A. (2003). Biogeografía, la dimensión espacial de la evolución. México. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/264435473>
- [3] Elith, J. & Leathwick, J.R. (2009) Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40, 677–697.
- [4] Felicísimo, Ángel M; Mateo, Rubén G; Muñoz, Jesús; Felipe, Beatriz; Sánchez, Javier; Salvatierra, H Cristina; Herrera M Magdalena (2011) FORCLIM, Bosques y cambio global. 1. Modelos de distribución de especies. Fundamentos de las IDE. Argentina. Programa CYTED, Madrid, 111 p.
- [5] Cruz-Paz, G., Castillo, M. M., Espinoza, A., Bravo, L. C., Valencia, E. M.-J., & Azahara, M. (2018). Áreas prioritarias de conservación en la cuenca Usumacinta. La aplicación de un enfoque multicriterio. *Investigaciones geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM.
- [6] Leal-Nares, Ó., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D., Geneletti, D., López-Granados, E., & Carranza, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(4).
- [7] Lahoz-Monfort JJ, Guillera-Aroita G, Milner-Gulland EJ, Young RP, Nicolson E (2010) Satellite imagery as a single source of predictor variables for habitat suitability modelling: how Landsat can inform the conservation of a critically endangered lemur. *J Appl Ecol* 47: 1094–1102.
- [8] Vera, D. I. (2016). Patrones de distribución espacial y representatividad de las especies arbóreas presentes en los territorios de Chile y Argentina. Universidad de Chile. Santiago-Chile.
- [9] Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Recursos educativos (Reduca)*.
- [10] Ibarra M. et al. 2010. Uso del modelado de nicho ecológico como una herramienta para predecir la distribución potencial de *Microcystis* sp (cianobacteria) en la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa, Nayarit, México. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.607>)
- [11] Portocarrero-Aya, M., González, M., Aguilar, J., & Corzo, G. (2 de Agosto de 2017). Métodos para la priorización de especies de plantas de interés para la conservación. (I. d. Instituto Colombiano de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Ed.) IX Congreso Colombiano de Botánica.
- [12] MADT. (2017). Listado de especies amenazadas de la diversidad biológica Colombiana continental y marino costera que se encuentran en el territorio Nacional, y se dictan otras disposiciones. En Resolución 1912.

- [13] CORANTIOQUIA. (2014). Guía de flora de decomiso silvestre. En C. I. Antioquia. Medellín. Obtenido de Comité Interinstitucional de Flora y Fauna de Antioquia: http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/FLORA/AIRN_R_CN_9911_2013.pdf
- [14] Pizano, C y H. Garcia (Editores).2014. El Bosque Seco Tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., Colombia
- [15] OFI-CATIE, 2003. Árboles de Centroamérica, Anacardiaceae, *Astronium graveolens*, pág 375-378.
- [16] Corantioquia, Medellín, 2005. Guía para el manejo de las semillas y la propagación de diez especies forestales del bosque seco tropical
- [17] Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 78, 88–126. doi: <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2395>
- [18] Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra J. L.; Jones, P. G. & Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2005, vol. 25, p. 1965–1978.
- [19] Reuter H.I, A. Nelson, A. Jarvis, 2007, An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, International Journal of Geographic Information Science, 21:9, 983-1008 (PDF).
- [20] Hengl T, de Jesus JM, MacMillan RA, Batjes NH, Heuvelink GBM, et al. (2014) SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. PLoS ONE 9(8): e105992. doi:10.1371/journal.pone.0105992
- [21] Ferran, I.V. Modelización del hábitat potencial actual y futuro del datilero del desierto (*Balanites aegyptiaca* (L.) Delile) en África. [Tesis Maestría] Universidad de Madrid, 2017.
- [22] Martínez, N. (2010). Apuntes sobre Modelación de Nichos Ecológicos. Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental, Instituto de Ecología (UNAM), 66 pags.
- [23] Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., y otros. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*(29), 129-151.
- [24] Pando, B. D., & Giles, P. D. (2005). Modelos predictivos aplicados a la conservación de flora amenazada: Invernaderos Vs. *Linaria nigricans* en el Sureste Árido Ibérico. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, 33-47.
- [25] Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 231-259 pags.
- [26] Läderach, P., Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J., Guevara, E. (2008). Predictions of lands use changes under progressive climate change in coffee growing regions of the adapCC project. Reporte Final de Nicaragua.
- [27] Naoki, Kazuya, Gómez, M. Isabel, López, Ramiro P., Meneses, Rosa I., & Vargas, Julieta. (2006). Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41(1), 65-78. Recuperado en 07 de junio de 2019, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006000700005&lng=es&tlng=es.
- [28] Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 161-175.
- [29] Mateo, G. R., Felicísimo, A. M. & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de las especies: una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
- [30] Allouche, O., Tsoar, A. & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *J. Appl. Ecol.* 43, 1223– 1232.
- [31] Robert J. Hijmans, Steven Phillips, John Leathwick and Jane Elith. Package 'dismo'. *Species Distribution Modeling*. 2017.
- [32] Cruz, H. (2017). Análisis Espacial Multicriterio para el estudio de la distribución y conectividad estructural de aves del Bosque Seco Tropical (BST) del Tolima. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

[33] Kumar, S.; Stohlgren, T.J. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, v.1, n.4, p.94-98

[34] Riveros 1983: https://www.sogeocol.edu.co/documentos/la_orinoquia_col.pdf

[35] Benavides, Juan (2010). EL desarrollo económico de la Orinoquia. Bogotá: Fedesarrollo

[36] Sanabria, 2006. Toma de Decisiones con Criterios Múltiples: un resumen conceptual. Marco Antonia Sanabria Aguilar. Universidad estatal a distancia

[37] (Osorio & Orjuela, 2006). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica* Año XIV, No 39, Septiembre de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 Juan Carlos Osorio Gómez, Juan Pablo Orjuela Cabrera

ANEXO 1 Correlación de variables

Capa	BIO1	BIO4	BIO7	BIO12	CIC	Arcilla	CCO	Ph	Limo	Arena	Pend	CMS
BIO1	1,0	0,5	0,2	0,2	-0,6	0,4	-0,4	-0,2	-0,4	0,0	-0,6	0,0
BIO 4	0,5	1,0	0,5	-0,2	-0,6	-0,1	-0,4	-0,2	-0,3	0,3	-0,4	0,3
BIO 7	0,2	0,5	1,0	-0,4	-0,2	0,1	-0,5	0,2	0,0	-0,1	-0,1	0,5
BIO 12	0,2	-0,2	-0,4	1,0	-0,2	0,1	0,3	-0,4	-0,3	0,1	-0,2	-0,6
CIC	-0,6	-0,6	-0,2	-0,2	1,0	-0,1	0,4	0,6	0,6	-0,3	0,6	0,2
Arcilla	0,4	-0,1	0,1	0,1	-0,1	1,0	-0,3	0,1	-0,2	-0,6	-0,1	0,0
CCO	-0,4	-0,4	-0,5	0,3	0,4	-0,3	1,0	0,0	0,2	0,1	0,2	-0,3
Ph	-0,2	-0,2	0,2	-0,4	0,6	0,1	0,0	1,0	0,6	-0,5	0,2	0,7
Limo	-0,4	-0,3	0,0	-0,3	0,6	-0,2	0,2	0,6	1,0	-0,6	0,4	0,4
Arena	0,0	0,3	-0,1	0,1	-0,3	-0,6	0,1	-0,5	-0,6	1,0	-0,2	-0,3
Pend	-0,6	-0,4	-0,1	-0,2	0,6	-0,1	0,2	0,2	0,4	-0,2	1,0	0,0
CMS	0,0	0,3	0,5	-0,6	0,2	0,0	-0,3	0,7	0,4	-0,3	0,0	1,0

BIO1: T° promedio anual; BIO4: Estacionalidad de la temperatura; BIO7: Rango anual de T°; BIO12: Precipitación anual (mm); CIC: Capacidad de intercambio catiónico; CCO: Contenido de carbono orgánico del suelo; Pend: Pendiente; CMS: Constantes de meses secos