

**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TÍTULO A OBTENER**

**INGENIERO AMBIENTAL**

Título del Proyecto de Investigación:

Distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King (Caoba) bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

**AUTOR(ES)**

**ROBINSON JASMANY HERRERA FEIJOO**

**GEOVANY JAIRO SHIGUANGO SHIGUANGO**

**DIRECTOR:**

Bolier Torres Navarrete, Ph.D. (c)

**PUYO-ECUADOR**

2019



## **DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHO**

Los criterios emitidos en el trabajo de investigación **DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Swietenia macrophylla* King (caoba) BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS ACTUALES Y FUTURAS**. Como también los contenidos, ideas, conclusiones y propuesta son de exclusiva responsabilidad de los, autores de este trabajo de grado.

---

Robinson Jasmany Herrera Feijoo  
0750648586

---

Geovany Jairo Shiguango Shiguango  
1500926439

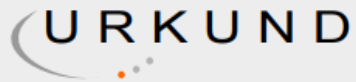
## **CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Por medio del presente, Yo, Bolier Torres Navarrete, con CI. 1711988855 certifico que los egresados Robinson Jasmany Herrera Feijoo CI. 0750648586 y Geovany Jairo Shiguango Shiguango CI. 1500926439 con el proyecto de investigación titulado: “Distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King (Caoba) bajo condiciones climáticas actuales y futuras”, previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental bajo mi supervisión

---

MSc. Bolier Torres Navarrete  
Director de Proyecto

# HERRAMIENTA DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** 2019\_01\_03 Tesis version para urkund.docx (D46361984)  
**Submitted:** 1/3/2019 12:17:00 AM  
**Submitted By:** btorres@uea.edu.ec  
**Significance:** 2 %

### Sources included in the report:

ANTEPROYECTO-CALAPILUIS.docx (D25383708)  
jounalIII.docx (D35659836)  
Evelyn Aldás.docx (D17373903)  
<http://168.234.196.99:82/Documentos/7.1-Estudio-de-caso-caoba-Guatemala.pdf>

### Instances where selected sources appear:

6

## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

El proyecto de investigación y desarrollo, titulado: “Distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King (Caoba) bajo condiciones climáticas actuales y futuras”, fue aprobado por los siguientes miembros del tribunal.

---

Dra. Ruth Arias PhD

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL

---

MS. Sc. María De Decker

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

---

Dr. Pablo Lozano PhD

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

## **DIDICATORIA**

### **Geovany**

A DIOS Porque, aunque yo no esté siempre para él, él está siempre para mí.

A MIS PADRES Carmen Bertila Y Juan Roberto por todo su amor, confianza y trabajo.

A MIS HERMANOS Angel, Cinthia y Karen por su apoyo y consejos brindados.

A MIS ABUELITOS Matías y Jacinta abuelitos materno, Pedro y Antonia abuelitos paternos por el amor y paciencia que me tuvo.

A MI FAMILIA Kelly Patricia y mi hija Annie Nayem por todo su amor.

A MIS AMIGOS Por los momentos compartidos durante mi estancia por la universidad, por su confianza y amistad.

### **Robinson**

A DIOS Por brindarme la sabiduría

A MIS PADRES Por su apoyo incondicional

A MIS AMIGOS Con los cuales compartí muchos momentos que me hicieron mejor persona: Henry Pasquel, Michael García, Jimena Revelo, Francis Rivera, Carlos Cruz, Geovany Shiguango

A MI TUTOR Bolier Torres, por su apoyo brindado a lo largo de esta investigación.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Geovany**

A DIOS

A LA UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

A MI MAMÁ            Gracias mamá por ayudarme a alcanzar este nuevo logro.

A MI TUTOR           Bolier Torres por el apoyo brindado.

A TODOS              Los que desinteresadamente contribuyeron a la realización de esta investigación.

### **Robinson**

A dios, por brindarme la sabiduría y la vida.

A mis padres, por el apoyo incondicional.

A mi tutor Bolier Torres por el apoyo brindado.

Al profesor Luis E. Escobar, por sus consejos académicos muy valiosos a lo largo de esta investigación.



# TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHO.....	III
CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ....	IV
HERRAMIENTA DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO.....	V
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	VI
DIDICATORIA .....	VII
AGRADECIMIENTOS .....	VIII
1. CAPÍTULO I.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.1. ANÁLISIS DE SITUACIÓN ACTUAL DE CAOBA EN ECUADOR ....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	5
1.4 HIPÓTESIS .....	5
1.5 OBJETIVOS .....	6
1.5.1 OBJETIVO GENERAL .....	6
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
2. CAPÍTULO II.....	7
2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
2.1.1. Bosques tropicales.....	7
2.1.2. Productos forestales maderables .....	7
2.1.3. Distribución potencial de especies .....	7
2.1.4. Modelo de distribución de especies .....	7
2.1.5. Nicho ecológico .....	8
2.1.6. Nicho de Hutchinson.....	8
2.1.7. Nicho Fundamental (NF).....	8
2.1.8. Nicho Realizado (NR).....	8
2.1.9 Geografía ocupada (GO) .....	8
2.1.10. Geografía invadible (GI) .....	8
2.1.11. Datos de presencia (Ocurencias).....	9
2.1.12. Variables climáticas .....	9
2.1.13. Cambio climático .....	9
2.1.14. Dualidad de Hutchinson .....	10
2.2. Diagrama BAM.....	11

3.	CAPITULO III .....	13
3.1.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	13
3.1.1.	Localización .....	13
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	14
3.2.1.	INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA .....	14
3.3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.3.1.	DATOS BIOLÓGICOS .....	14
3.4.	AREA DE ACCESIBILIDAD.....	15
3.4.1.	DATOS AMBIENTALES O CLIMATICOS.....	16
3.4.2.	PROCESAMIENTO DE DATOS AMBIENTALES ACTUALES Y FUTUROS.....	20
	MODELADO DE NICHOS ECOLÓGICOS.....	20
	EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....	22
	VALIDACIÓN DEL MODELO BAJO CONDICIONES ACTUALES.....	25
4.	CAPÍTULO IV .....	27
4.1.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
4.1.1.	MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL .....	27
4.1.2.	VALIDACIÓN DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS ACTUALES .....	28
4.1.3.	MODELOS DE TRANSFERENCIAS CLIMÁTICAS ACTUALES A ESCENARIOS FUTUROS .....	29
4.1.4.	SELECCIÓN DE MODELOS IDEALES A ESCALA NATIVA Y GLOBAL BAJO CONDICIONES FUTURAS.....	31
4.1.5.	ANÁLISIS BIOLÓGICO Y CLIMÁTICO .....	34
4.1.6.	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE NICHOS Y TRANSFERENCIAS.....	36
4.1.7.	MODELOS DE NICHOS .....	36
4.1.8.	TRANSFERENCIAS ESPACIO-TIEMPO .....	36
5.	CAPITULO V .....	39
5.1.	CONCLUSIONES .....	39
5.2.	RECOMENDACIONES .....	39
5.3.	BIBLIOGRAFÍA.....	40

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Variables ambientales utilizadas para la generación de los modelos de distribución potencial actual. ....	17
<b>Tabla 2</b> Modelos de circulación global utilizados en el modelo de nicho ecológico .....	19
<b>Tabla 3.</b> Matriz con cajas de peras con distribución uniforme sin restricciones. ....	21
<b>Tabla 4.</b> Matriz con cajas de peras con distribución uniforme con restricciones. ....	21
<b>Tabla 5.</b> Matriz de confusión .....	23

## INDICE DE GRAFICOS

**Gráfico 1.** Representación de las áreas de idoneidad climática predichas a escala nativa para la especie *Swietenia macrophylla* King bajo condiciones actuales y futuras. .... 32

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de <i>Swietenia macrophylla</i> King en el espacio ambiental.....	10
<b>Figura 2.</b> Representación geográfica de una capa raster climática.....	11
<b>Figura 3.</b> Diagrama BAM.....	12
<b>Figura 4.</b> Visualización de 2016 ocurrencias de <i>Swietenia macrophylla</i> King correspondientes a muestras de herbario (puntos rojos) en el espacio geográfico .....	13
<b>Figura 5.</b> Área de accesibilidad (M) en el espacio geográfico (color rojo) y los datos de ocurrencias o registros validos (color verde).....	15
<b>Figura 6.</b> Ilustración de tendencias seguidas por los modelos de nicho ecológico. ....	18
<b>Figura 7.</b> Diagrama de ROC-PARCIAL 1 .....	23
<b>Figura 8.</b> Curva ROC AUC completa.....	24
<b>Figura 9.</b> Diagrama ROC PARCIAL 2 .....	25
<b>Figura 10.</b> Distribución potencial actual de <i>Swietenia macrophylla</i> King.....	27
<b>Figura 11.</b> Visualización en el espacio geográfico de datos de muestras de herbario y observaciones humanas de <i>Swietenia macrophylla</i> King en su área potencial de distribución actual.....	28
<b>Figura 12.</b> Distribución potencial futura de <i>Swietenia macrophylla</i> King en base al modelo climático futuro ACCESS.....	29
<b>Figura 13.</b> Distribución potencial futura de <i>Swietenia macrophylla</i> King en base al modelo climático futuro HadGEM2-ES.....	30
<b>Figura 14.</b> Distribución potencial futura de <i>Swietenia macrophylla</i> King en base al modelo climático futuro MIROC-ES.....	30
<b>Figura 15.</b> Visualización de los nichos fundamentales .....	33

## Resumen

*Swietenia macrophylla* King (Caoba), es un árbol maderable cuya área de distribución geográfica nativa se encuentra nivel de los neotrópicos, la principal amenaza que influye en su conservación son los patrones de deforestación debido a su alto valor comercial en el mercado mundial. El objetivo principal de esta investigación fue determinar su distribución potencial actual y futura mediante el modelo de nicho ecológico. Se utilizaron 273 registros de caoba correspondientes a datos biológicos y 3 modelos climáticos correspondientes a datos ambientales. Los modelos de distribución potencial fueron generados mediante el software MaxEnt. Se consideró un área de accesibilidad de caoba desde Centroamérica al sur de Brasil. Los modelos de distribución potencial actual mostraron áreas de adecuación climática fragmentadas en Brasil y en la región amazónica ecuatoriana. Los modelos de distribución potencial futura mostraron una alta extrapolación, sin embargo, mostraron mucho realismo a nivel climático considerando los aumentos de temperatura global.

Palabras claves: Área de distribución, Deforestación, MaxEnt, Modelo de nicho ecológico, Neotrópicos.

## Abstract

*Swietenia macrophylla* King (Caoba) is a timber tree whose native geographic range is found at the Neotropic level. Deforestation patterns due to their high commercial value in the world market are the main threats that influence their conservation. The main objective of this research was to determine its current and future potential distribution through the ecological niche model. We used 273 mahogany records corresponding to biological data and 3 climatic models corresponding to environmental data. Potential distribution models were generated using the MaxEnt software. It was considered an area of accessibility of mahogany from Central America to southern Brazil. The current potential distribution models showed areas of fragmented climate adaptation in Brazil and the Ecuadorian Amazon region. Future potential distribution models showed a high extrapolation; however, they showed a lot of realism at the climatic level considering the global temperature increases.

**Keywords:** Deforestation, Distribution area, Ecological niche model, MaxEnt, Neotropics.

# 1. CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Los bosques húmedos tropicales contienen alrededor del 12% del total de las especies de plantas con flores en todo el mundo (Gentry, 1982), se estima que almacenan el 60% del carbono aéreo y el 30% del carbono edáfico (Anderson-Teixeira y Delucia, 2011., 1994). En base a este contexto, se cree que los bosques húmedos tropicales juegan un rol de vital importancia en la mitigación de los efectos del cambio climático global (Markham, 2013).

Se estima que el cambio climático provocará variaciones en los sistemas naturales y antrópicos de manera drástica y nunca antes evidenciada (Thornton *et al.*, 2014). Estas variaciones pueden provocar la migración e incluso la extinción de diversas especies, cambios en fisiología y estructura en comunidades vegetales.

Los ecosistemas que albergan los bosques húmedos tropicales pueden sufrir efectos como la migración y la extinción de especies, cambios en la biodiversidad, composición y fenología de las especies y, reducción de tasas de crecimiento (Bellard *et al.*, 2012; Clark y Clark, 2011). Estos ecosistemas tienden a ser vulnerables principalmente debido a la fragmentación de sus hábitats, pérdida de cobertura vegetal y variación en los gradientes altitudinales (Abades *et al.*, 2011; Glick *et al.*, 2011).

Por otra parte, la deforestación es una de las principales causas que amenaza a los bosques húmedos tropicales (Khaine y Woo, 2015) debido que provoca la reducción de los niveles de evapotranspiración, reducción de los niveles de pluviosidad a nivel local (Allen *et al.*, 2017; Duffy *et al.*, 2015), el aumento del riesgo potencial de incendios forestales que por consiguiente traerán consigo emisiones de gases de efecto invernadero (Huerta-Martínez y Ibarra-Montoya, 2014).

Tomando como referencia la década de 1990, la tasa de deforestación en estos bosques se estimó en aproximadamente  $5,8 \pm 1,4 \text{ M ha}^{-1}$ , siendo mayormente deforestadas las áreas que se encuentren en América Latina y el sudeste asiático (Lasco, 2008). Por otra parte, el análisis entre 1990–2000, estima alrededor de  $8,6 \text{ M ha}^{-1}$  mostrando una tendencia exponencial a futuro (Kanninen *et al.*, 2007).

Se asume que las principales causas de la deforestación en zonas húmedas tropicales son las expansiones de la frontera agrícola a pequeña y gran escala y la extracción de madera (Kyle y Duncan, 2012; Mejía *et al.*, 2015). La extracción de madera tiene una mayor influencia en



la deforestación debido a que se estima, es una de las principales actividades relacionadas al bosque y que aporta mayores ingresos económicos en los sectores rurales y en América Latina donde el aprovechamiento constituye un elemento importante dentro de sus estrategias de vida (Angelsen *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2018; Vasco *et al.*, 2017).

En la actualidad existe una creciente demanda de productos forestales maderables provenientes de los bosques húmedos tropicales, este es el caso de *Swietenia macrophylla* King (Caoba), es un árbol maderable cuya área de distribución geográfica nativa se encuentra nivel del neotrópico (Marmillod *et al.*, 2007; Synnott, 1979).

La caoba se caracteriza por tener una densidad entre media y alta 0,5 – 0,7 g/cm<sup>3</sup>, posee un color entre rojizo amarillento-oscuro, es fácil de trabajar y dar un acabado muy llamativo, es utilizada en la fabricación de muebles con acabados finos y alto prestigio (Shono y Snook, 2006), esto la hace unas de las maderas más valiosas en el mercado internacional (Brown *et al.*, 2003). Los precios pueden variar entre USD 1700 por m<sup>3</sup> para productores locales y en Estados Unidos un comerciante puede recibir por árbol de caoba hasta USD 11.000 (EIA, 2012).

Es importante destacar que la caoba fue incluida dentro de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestre en el apéndice II, debido a su alta explotación con fines comerciales en Sudamérica (CITES, 2005). La extracción masiva ha generado impactos significativamente negativos en el hábitat de esta especie haciéndola que se la catalogue como una de las especies forestales más amenazadas en el mundo (Grogan *et al.*, 2005). En la actualidad el uso sostenible de la madera es clave para la conservación de especies amenazadas a nivel mundial y la mitigación de los efectos del cambio climático mediante la captación de carbono (Matsumoto *et al.*, 2016).

De aquí la importancia de tratar de predecir mediante técnicas geográficas y computacionales, las áreas de distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King en base a condiciones climáticas en el presente y predecir qué sucederá con estas áreas predichas en un futuro incorporando en el análisis, modelos de circulación global de cambio climático (Hijmans *et al.*, 2005).

### 1.1.1. ANÁLISIS DE SITUACIÓN ACTUAL DE CAOBA EN ECUADOR

En Ecuador las poblaciones de caoba han disminuido drásticamente su área de ocupación en los últimos 30 años. Esta especie se distribuye naturalmente en la Amazonia, bajo los 700 msnm, en las provincias de Pastaza, Napo, Morona Santiago, Sucumbíos y Orellana.

En la región amazónica ecuatoriana (RAE), las especies maderables de mayor valor comercial son el bálsamo y la caoba del oriente, En las provincias de Napo, Orellana y Sucumbíos las poblaciones de caoba casi han desaparecido. En la actualidad la población más importante se encontraría en las provincias de Pastaza y Morona Santiago (Iglesias et al., 2018).

*Swietenia macrophylla* presentaba cinco poblaciones para Ecuador: dos en la Amazonia Noreste (alrededores del Ahuano, Joya de los Sacha y Coca); dos entre los ríos Arajuno y Pastaza; y la última, en la comunidad de Cusumas (Morona Santiago). Analizando los criterios de la UICN, la especie es considerada para Ecuador En Peligro Crítico (CR A2cd), porque hay una reducción mayor o igual al 80% de la extensión de Presencias (EOO) en los últimos 30 años (Iglesias et al., 2018).

Es una especie de Aprovechamiento condicionado y se encuentra incluida en el Apéndice II de la CITES. El 5 de octubre de 2017, se firma el Acuerdo Ministerial No. 090, para la Veda de la especie *Swietenia macrophylla* King por un periodo de 10 años, que prohíbe la corta de árboles y aprovechamiento de la referida especie, para las poblaciones que se encuentran en bosques natural, regeneración natural, arboles relictos y otras formaciones vegetales silvestres.

Desde el año 2013, la Autoridad Nacional ha realizado acciones para establecer la línea de base para el inventario de *S. macrophylla*, que permita realizar un diagnóstico de la situación actual de la especie, de acuerdo a estándares nacionales e internacionales de manejo de especies forestales, para iniciar la adquisición de la información para generar políticas públicas armonizadas con una adecuada administración del recurso en forma sustentables.

Ecuador exportó oficialmente entre los años 1997 y 2007 un total de 650 m<sup>3</sup> de madera aserrada de caoba (Palacios, 2011). Por otro lado, se conoce que la mayor población natural de caoba en Ecuador se reduce a una franja estrecha en la provincia de Pastaza (Melessa y Palacios, 2011; Palacios, 2011).

Durante la primera mitad del año 2011 la organización TRAFFIC contrata a Palacios para la búsqueda de muestras geo-referenciadas de las especies citadas. Aparte de las bajas cifras de la exportación histórica de madera de esta especie, el informe narra el poco éxito para encontrar ejemplares adultos de caoba y concluye que el volumen comercialmente aprovechable está casi agotado (Palacios, 2011). Esto no quiere decir que no se encuentran árboles grandes, pero son tan escasos y están tan dispersos que se los puede calificar como relictos.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La caoba es considerada la madera tropical más valiosa del mundo por su elevado valor económico, lo que la hizo una especie favorable para la extracción a gran escala. La caoba ha enfrentado a lo largo del tiempo una fuerte reducción de su área de distribución nativa debido a que los bosques donde habita han sido talados en más del 63% en Mesoamérica y el 26% en Sudamérica (Blundell, 2004).

En Perú su área de distribución nativa se estimó en 54.8 millones de hectáreas de las cuales aproximadamente el 4% han sido deforestadas. En Bolivia se distribuye 29.9 millones de hectáreas en los departamentos de Beni, Cochabamba, La Paz, Santa Cruz y Pando, de los cuales aproximadamente el 8% ha sido deforestado. En Brasil se distribuye en aproximadamente 153.6 millones de hectáreas, de las cuales aproximadamente el 24% ha sido deforestada (Kometter *et al.*, 2004).

La extracción selectiva de caoba es la principal causa de que se encuentre en peligro crítico a nivel de conservación, esto se debe a que los madereros talan individuos de caoba adultos, los cuales aportan con grandes cantidades de semillas, las cuales son de vital importancia en la regeneración natural de esta especie debido a que de estas semillas crecen nuevos brotes de caoba, sin embargo estos brotes no tienden a desarrollarse hasta su etapa adulta por motivos antrópicos y naturales (Acosta-López *et al.*, 2017).

La presente investigación se enfoca en predecir las áreas de mayor idoneidad climática de la caoba mediante técnicas de SIG y software que permite evaluar si bajo condiciones actuales y futuras esta especie tiende a aumentar o reducir su área de distribución nativa (Peterson *et al.*, 2011). Estas áreas predichas mediante estos métodos, serán una pieza clave en la conservación a futuro de la especie, debido a que los gobiernos podrán declarar esas áreas en estado de emergencia o veda de caoba.

Por otra parte, se podrá evaluar la posibilidad de establecer cultivos de caoba en áreas donde las condiciones climáticas sean favorables para la especie, alcanzando su conservación en su área nativa de distribución. Esto ayudará a que las personas de las zonas rurales que se dedican a la extracción de esta especie no se vean perjudicadas económicamente, logrando una sostenibilidad que toma en cuenta el componente económico (ingresos por extracción a pequeña escala), ambiental (conservación de la caoba a futuro) y social (conservación de caoba por parte de poblaciones locales).

### **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La tala selectiva es la principal problemática que afecta en la reducción poblacional de individuos de la especie *Swietenia macrophylla* King y reducción del área de distribución nativa y por cual se necesita el reconocimiento de áreas de idoneidad climática donde la especie pueda llegar a su etapa adulta y para que se puedan generar mecanismos de mitigación frente a la reducción poblacional de la especie.

Por lo expuesto anteriormente y ante la falta de conocimiento científico que ayude identificar áreas de alta idoneidad climática presentes en la geografía para esta especie, surge la urgente necesidad de evaluar mediante modelado de nicho ecológico, cuáles son las áreas bajo condiciones climáticas actuales y cuáles serán las áreas bajo condiciones climáticas futuras, para permitir establecer zonas donde se pueda controlar la supervivencia y propagación de la especie *Swietenia macrophylla* King a nivel del neotrópico del mundo.

### **1.4 HIPÓTESIS**

Las variaciones en los patrones de temperatura y precipitación futuros provocados por los efectos del cambio climático antropogénico, influirá en la reducción parcial de la distribución potencial de la especie *Swietenia macrophylla* King en su área nativa y mundial.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la distribución potencial actual y futura de la especie *Swietenia macrophylla* King mediante el modelo de nicho ecológico.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Modelar la distribución potencial actual para determinar el hábitat climático idóneo para la especie *Swietenia macrophylla* King a escala de su área nativa.
2. Modelar la distribución potencial futura para determinar el hábitat climático idóneo para la especie *Swietenia macrophylla* King a escala de su área nativa.
3. Generar mapas de distribución potencial actual y futura hasta el año 2050.
4. Seleccionar el modelo de distribución futura más con mejor idoneidad climática y biológica para la especie *Swietenia macrophylla* King a escala nativa.
5. Determinar el porcentaje de reducción de área de distribución para la especie *Swietenia macrophylla* King en base a los modelos de distribución futura más idóneos a escala nativa.

## 2. CAPÍTULO II

### 2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1.1. Bosques tropicales

Los bosques tropicales son aquellos bosques situados en la zona intertropical y que presentan consecuentemente clima tropical y su vegetación predominante es de hoja ancha (Yepes *et al.*, 2015). Los bosques tropicales son los ecosistemas terrestres con la mayor diversidad biológica y complejidad ecológica. Ocupan alrededor de 12 millones de km<sup>2</sup>, alberga el 70% de las especies de plantas vasculares, 40 % de la avifauna, 70% de los invertebrados y 65% de las especies de insectos; lo que equivale al 60% de la biodiversidad del planeta (FAO, 2013).

#### 2.1.2. Productos forestales maderables

Es el aprovechamiento forestal como la extracción de los recursos forestales del medio en que se encuentren, incluyendo los maderables y no maderables. Los recursos forestales maderables (RFM) están constituidos por la vegetación leñosa susceptible de aprovechamiento o uso (Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, 2003).

#### 2.1.3. Distribución potencial de especies

La distribución potencial como amplitud ecológica, es decir la capacidad de tolerancia que tiene cada especie a ciertos factores ambientales como altitud, topografía, temperatura, etc. En el caso específico de las plantas, su distribución se asocia principalmente a los actores climáticos y edáficos (Chapman, 1976). La distribución potencial de la especie se entiende como el espacio donde podría estar presente la especie objeto de estudio en función de sus características ambientales (Felicísimo *et al.*, 2005).

#### 2.1.4. Modelo de distribución de especies

Los modelos de distribución de especies son por tanto representaciones cartográficas de la idoneidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación (Mateo *et al.*, 2011). La idoneidad no es más que la relación matemática o estadística entre la distribución real conocida y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores. Estas variables suelen ser geológicas, topográficas o climáticas y se espera que, con algunas de ellas, individualmente o en combinación, se puedan definir los factores ambientales que delimiten las condiciones favorables para la presencia de la especie (Guisan & Zimmermann, 2000).

### **2.1.5. Nicho ecológico**

Esta teoría trata explícitamente sobre la manera en que los organismos se relacionan con su ambiente, pero generalmente simplifica o ignora cómo estas interacciones afectan el comportamiento de dichos organismos (Hutchinson, 1957).

### **2.1.6. Nicho de Hutchinson**

Según Vázquez (2015), Hutchinson comienza su discusión definiendo un conjunto de variables ambientales y los valores límite dentro de los cuales una especie focal puede sobrevivir. Estas variables y sus respectivos valores límite definen una región (un hipervolumen n-dimensional), cada punto de la cual corresponde a un posible estado del ambiente en el que la especie puede existir indefinidamente.

### **2.1.7. Nicho Fundamental (NF)**

Es aquel que representa una fracción del E- espacio, pero considerando las ocurrencias de las especies, en resumen, el NF está compuesto por todas las condiciones climáticas idóneas para que la especie puedan desarrollarse y tener un crecimiento población estable sin riesgo a la extinción (Ainsworth, 2010).

### **2.1.8. Nicho Realizado (NR)**

Es aquel que representa una fracción del E- espacio resultado de la interacción de la especie con diversos factores biológicos que influyen en su supervivencia, por otra parte, técnicamente se le considera la porción de ocurrencias (muestra con condiciones más idóneas) de la especie con las cuales se realiza el modelado de nicho ecológico (Levano, 2016).

### **2.1.9 Geografía ocupada (GO)**

La denominación de geografía ocupada (GO), o área ocupada es la intersección de favorabilidad biótica y abiótica, y de accesibilidad histórica. La especie puede ser observada/recolectada en esa región. Por definición, las variables ambientales en GO constituyen el nicho realizado (NR)

### **2.1.10. Geografía invadible (GI)**

La zona geografía invadible (GI) o área invadible es una región con condiciones favorables pero que se ha mantenido fuera de las capacidades de dispersión de la especie (Hortal, Lobo y Jiménez-Valverde 2012).

### **2.1.11. Datos de presencia (Ocurrencias)**

Son aquellos datos obtenidos mediante la observación o captura de un individuo en un espacio y tiempo determinados, dichos datos son representados en el espacio geográfico (E. G) mediante coordenadas geográficas longitud y latitud.

### **2.1.12. Variables climáticas**

Son aquellas condiciones medioambientales representadas principalmente por precipitación y temperatura que influyen directamente en la supervivencia de la especie (Téllez *et al.*, 2011).

### **2.1.13. Cambio climático**

Según Miller (2007) es un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables.

Una de las causas de la extinción masiva de especies en las últimas décadas es sin duda el cambio climático, por lo cual se le considera uno de los temas de mayor relevancia a nivel mundial (Yiming y Cohen, 2013). Se conoce que el clima influye directamente en la distribución potencial de las especies, modificando sus áreas de distribución en búsqueda de condiciones idóneas para su supervivencia (Gaston, 2003).

Las proyecciones climáticas futuras no son muy optimistas y plantean un aumento que oscilaría entre los 0,3 a 4,8 °C de la temperatura global media en la superficie terrestre para el próximo periodo entre 2081 -2100 (Stocker *et al.*, 2013). Por otra parte, también se pronostica que, en dichas fechas, los patrones de temperatura y precipitación serán extremas en la zona ecuatorial y regiones tropicales humedad (Edenhofer *et al.*, 2014).

Existe evidencia científica de los cambios globales provocados por los aumentos de la temperatura y precipitaciones (Church *et al.*, 2013), esto sumado a diversas actividades antropogénicas de gran impacto climático con las plantas nucleares que se ha incrementado en las últimas décadas (Flato *et al.*, 2013).

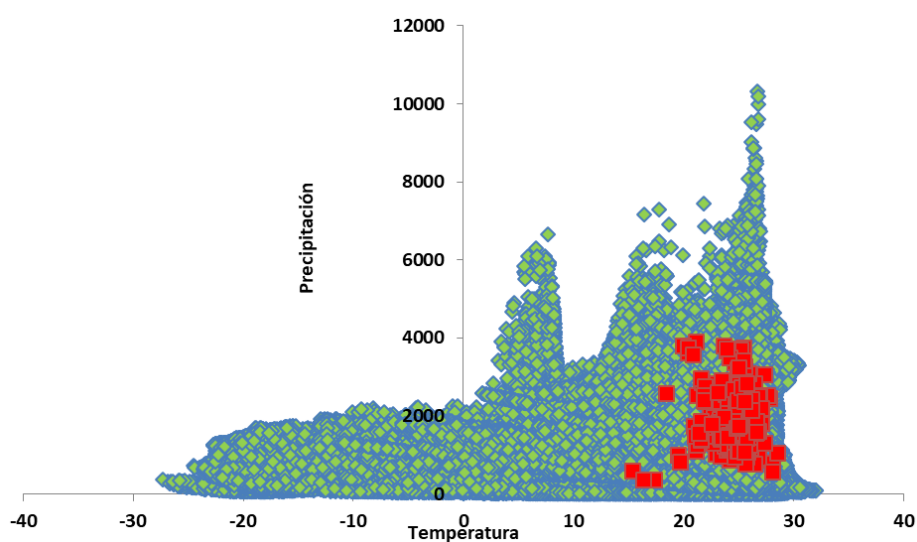
En base a lo establecido por Stocker *et al.* (2013) se proyecta escenarios en los cuales la temperatura media global en superficie para 2081-2100, en relación con 1986-2005, se pueda situar en rangos: 0,3 a 1,7 °C (RCP 2.6), de 1,1 a 2.6 °C (RCP 4,5), de 1,4 a 3,1 °C (RCP 6,0), y de 2.6 a 4,8°C (RCP 8.5). Un RCP (Trayectorias Representativas de Concentración), representa la trayectoria o tendencia que hipotéticamente mediante los análisis climáticos y



tendencias antropogénicas pueden seguir los gases de efecto invernadero y por lo tanto afectar los patrones de temperatura y precipitación.

#### 2.1.14. Dualidad de Hutchinson

Es una hipótesis propuesta por Hutchinson (1957) sobre la correspondencia entre el espacio geográfico y el espacio de nicho, abstracto y multidimensional (Soberón, Osorio-Olvera, & Townsend, 2017) (**Figura 1**). Esta correspondencia se hace evidente y se puede operacionalizar (Hijmans *et al.*, 2015) cuando se impone una retícula de resolución dada, con una proyección específica, sobre la región de interés y se procede a obtener los valores de las variables usadas para el espacio de nicho mediante coberturas ambientales en formato Raster y registros de la especie objeto de estudio (**Figura 2**).

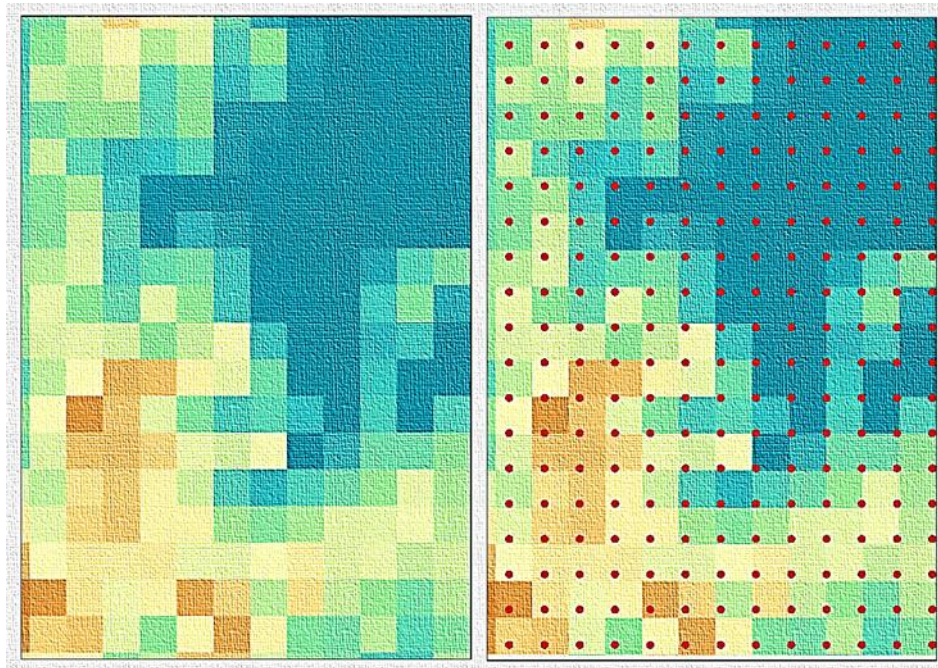


**Figura 1.** Distribución de *Swietenia macrophylla* King en el espacio ambiental.

**Elaboración:** Herrera y Shiguango, 2018

**Basado en:** Hutchinson, GE. 1957; R. Hijmans *et al.*, 2005; Soberón, Osorio-Olvera, & Townsend, 2017

En la Figura 1. Se puede observar que el espacio ambiental (puntos verdes-oscuros) se generó utilizando 10.000 puntos aleatorios globalmente para capturar los valores de temperatura (eje x) y precipitación (eje y), las ocurrencias (2016 coordenadas geográficas) de caoba correspondiente muestras de herbario (puntos rojos), fueron utilizados para extraer los valores de las capas raster y ser proyectados mediante valores de temperatura y precipitación.



**Figura 2.** Representación geográfica de una capa raster climática

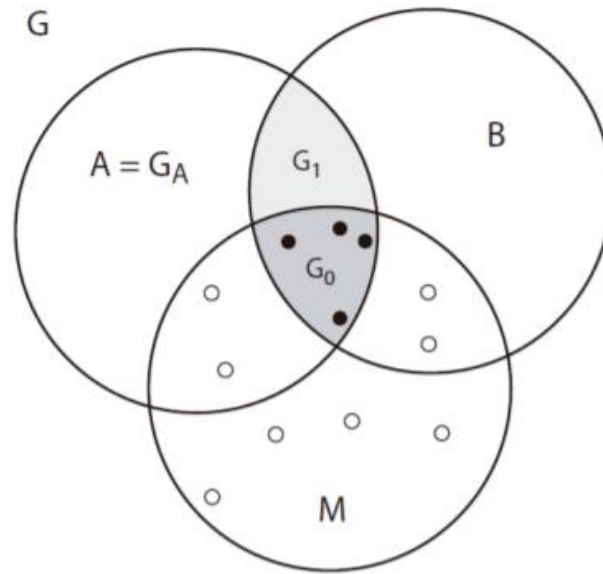
Tamaño de pixel de 2.5 minutos (20.5 km<sup>2</sup> aproximadamente por cada pixel), los puntos rojos representan un muestro estratificado que ayuda a extraer los valores correspondientes de cada pixel.

**Elaboración:** Herrera y Shiguango, 2018

## 2.2. Diagrama BAM

Peterson *et al.* (2011) mencionaron que la interpretación de los nichos ecológicos puede realizarse tanto en el espacio ambiental y el espacio geográfico. Para poder visualizar dicha interacción, dichos autores propusieron el diagrama de BAM (**Figura 3**).

Dicho diagrama, está compuesto por tres regiones o esferas, la región A representa las condiciones ambientales o climáticas que son favorables para que la especie pueda sobrevivir a largo plazo. La región B representa las interacciones bióticas por las cuales está expuesta la especie y finalmente la región M que representa las áreas accesibles para la especie (se toma en cuenta la movilidad de la especie en un periodo de tiempo determinado). En base a toda la contextualización del Diagrama de BAM, el nicho ecológico de la especie se representa en el espacio ambiental o climático y las áreas de distribución potencial en el espacio geográfico.



**Figura 3.** Diagrama BAM

**Tomado de:** Peterson *et al.* (2011).

En la Figura 3. se representa las condiciones climatológicas (A), áreas de accesibilidad o movilidad (M) y las interacciones bióticas (B), estas regiones son proyectadas mediante círculos o esferas. También se representan cuatro áreas de gran importancia: G, que representa el espacio geográfico que es el lugar donde se desarrolla el análisis del modelado de nicho;  $G_A$ , el área que posee las condiciones climatológicas adecuadas para las especies;  $G_0$ , el área que está siendo ocupada por la especie en la actualidad;  $G_I$ , el área que puede ser invadida por la especie a futuro. Finalmente, los círculos pequeños representan los datos de ocurrencias (coordenadas geográficas), los círculos negros muestran presencias y aquellos que están sin relleno ausencias.

### 3. CAPITULO III

#### 3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Localización

La presente investigación se enfocó en determinar las áreas potenciales de distribución de la especie *Swietenia macrophylla* King en su área nativa, la cual se extiende desde sur de México hasta el sur de Brasil. Esta área destaca por tener un clima muy variado, tal es el caso que su precipitación oscila entre 1000 a 4000 mm promedio anual, por otra parte, su temperatura oscila entre los 15 a 30 grados centígrados promedio anual. Para poder analizar las áreas de idoneidad climática a escala nativa, se utilizó como referencia todos los países de centro América y sur América. (Figura 4).



**Figura 4.** Visualización de 2016 ocurrencias de *Swietenia macrophylla* King correspondientes a muestras de herbario (puntos rojos) en el espacio geográfico

**Elaboración:** Herrera y Shiguango, 2018.

**Fuente de registros de la especie:** GBIF (Global Biodiversity Information Facility; <<http://www.gbif.org>>)

## **3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.2.1. INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA**

En la presente investigación se evaluaron las variables climáticas que más influyen en la distribución potencial de la especie *Swietenia macrophylla* King y a su vez, como dichas condiciones se relacionan con las condiciones climáticas futuras, para lograr predecir aumentos o reducciones en las áreas de distribución potencial de la especie a futuro.

## **3.3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.3.1. DATOS BIOLÓGICOS**

Los datos de ocurrencia (coordenadas geográficas) fueron obtenidos de la plataforma online Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <http://www.gbif.org>), se accedió a la información el 04/10/2018 (<https://www.gbif.org/occurrence/download/0000383-181003121212138>). Fueron descargados un total de 2016 registros de la especie *Swietenia macrophylla* King correspondiente a muestras de herbario a escala de su área nativa de distribución (Centro América hasta el Sur de Brasil).

Los registros fueron depurados de tal forma en que se pudiera lograr eliminar aquellos que su procedencia era en años anteriores a 1950, es decir se eliminaron los registros que no podían ser validados con certeza (aquellos que biológicamente no cumplían con las condiciones encontradas en la literatura sobre caoba).

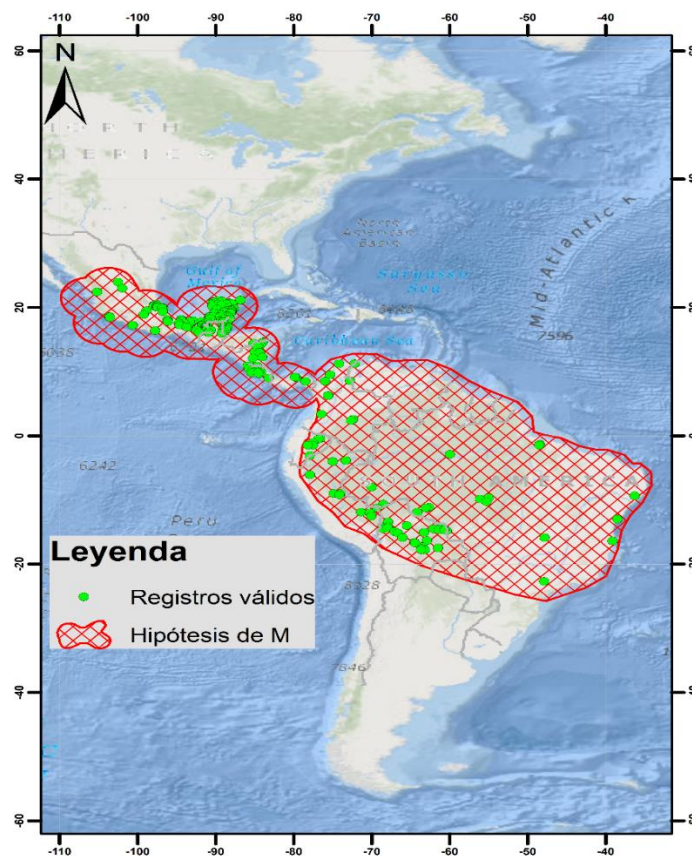
Posteriormente, la base de datos fue depurada para reducir el error que se encuentra asociado al sobre muestreo (demasiados puntos de ocurrencia en el mismo espacio geográfico o pixel de raster) en localidades con mayor accesibilidad por partes de los recolectores (centros poblados, carreteras). Esto es visible en el espacio geográfico mediante coordenadas geográficas que sigue un patrón lineal que se asemeja a carreteras o ríos accesibles. Para evitar estos errores se aplicó una metodología basada en el filtrado y limpieza de datos utilizando sistemas de información geográfica, Excel y el software computacional Rstudio (Cobos *et al.*, 2018).

Finalmente, luego del proceso de limpieza y filtrado de la base de datos de la especie *Swietenia macrophylla* King se logró reducir los registros a 273. Es importante considerar que un mayor número de registros no significa que se logre un mejor modelo de distribución potencial, por lo contrario, se puede utilizar un número de registros que contentan las condiciones ambientales más cercanas a lo conocido en la actualidad para especie y se obtiene más precisión en los modelos de distribución potencial actual.

Dichos registros fueron ordenados en una hoja Excel de en tres columnas (Specie, Lon, Lat) y posteriormente guardado en un formato CSV (Delimitado por comas), esto con la finalidad que el archivo con las ocurrencias pueda ser elige por el software de modelado de nicho empleado en esta investigación.

### 3.4. AREA DE ACCESIBILIDAD

En base al contexto propuesto por Peterson *et al.* (2011) en el diagrama BAM, fue necesario plantear una hipótesis de área de accesibilidad (M) de la especie *Swietenia macrophylla* King, considerando diversos factores: los modelos de nicho ecológico no abordan los aspectos históricos relacionados con la distribución de especies, por ende se dibujó una M (Ver figura 5.) utilizando como referencia las Provincias Biogeográficas de América del Sur (Morrone, 2002) y un límite de rango de altitud para calibrar y proyectar los modelos (Barve *et al.*, 2011; Rodda *et al.*, 2011). Se consideró como el límite de distribución las zonas más altas que representan aquellas zonas donde la especie no puede llegar considerando su capacidad de dispersión.



**Figura 5.** Área de accesibilidad (M) en el espacio geográfico (color rojo) y los datos de ocurrencias o registros válidos (color verde).

**Elaborado por:** Herrera y Shiguango, 2018

### 3.4.1. DATOS AMBIENTALES O CLIMATICOS

#### 3.4.1.1. CLIMA ACTUAL

Las variables climáticas fueron obtenidas de la base de datos climatológicos del WorldClim versión 1.4 a una resolución de 2.5 minutos (20.5 km<sup>2</sup>) (Hijmans *et al.*, 2005). Estos datos fueron generados mediante un proceso de interpolación en base a estaciones meteorológicas (1950 hasta 2000) utilizando técnicas de splining, lo cual permite obtener datos similares a los de las estaciones en área donde las estaciones meteorológicas son escasas o inexistentes. Estas bases de datos ayudan a generar bases de datos mensuales que fueron procesadas para producir 19 variables bioclimáticas o ambientales (**Tabla 1**), que en la actualidad son utilizadas a nivel mundial para predecir las áreas de distribución potencial actual de muchas especies que habitan en la superficie terrestre (Kreakie *et al.*, 2012; Marini *et al.*, 2010; O'Donnel y Ignizio, 2012).

Se realizó un análisis exploratorio con las 19 variables ambientales del proyecto WorldClim, con la finalidad de evaluar cuales eran las variables que más aportaban en la construcción del modelo de nicho, esto se realizó de acuerdo a la prueba Jackknife realizada en MaxEnt (Elith *et al.*, 2011; Shcheglovitova y Anderson, 2013). En segunda instancia se generaron los modelos de distribución potencial con aquellas variables ambientales no correlacionadas ( $r < 0.85$ ), esto ayudó a reducir el sobre ajuste que se genera cuando se incorporan muchas variables al modelado de nicho (Rojas-Soto *et al.*, 2008; Jimenez-Valverde *et al.*, 2009). Es aconsejable utilizar variables que se sepa inciden en la ecología de las especies en cuestión. Por otra parte, si solo se utilizan dos variables como precipitación y temperatura anual, existe una mayor probabilidad de predecir mayores áreas (sobre predicción), debido a que es posible que el software encuentre con mayor facilidad dicha combinación de valores de precipitación y temperatura en los pixeles de la raster.

**Tabla 1. Variables ambientales utilizadas para la generación de los modelos de distribución potencial actual.**

<b>Código</b>	<b>Variable ambiental</b>	<b>Fuente</b>
<b>Variable ambiental 1</b>	Temperatura media anual	WorldClim
<b>Variable ambiental 2</b>	Rango de temperatura media mensual	WorldClim
<b>Variable ambiental 3</b>	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)	WorldClim
<b>Variable ambiental 4</b>	Temperatura estacional (Desviación estándar *100)	WorldClim
<b>Variable ambiental 5</b>	Temperatura máxima del mes más cálido	WorldClim
<b>Variable ambiental 6</b>	Temperatura mínima del mes más frío	WorldClim
<b>Variable ambiental 7</b>	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	WorldClim
<b>Variable ambiental 8</b>	Temperatura media del trimestre más húmedo	WorldClim
<b>Variable ambiental 9</b>	Temperatura media del trimestre más cálido	WorldClim
<b>Variable ambiental 10</b>	Temperatura media del trimestre más seco	WorldClim
<b>Variable ambiental 11</b>	Temperatura media del trimestre más frío	WorldClim
<b>Variable ambiental 12</b>	Precipitación anual	WorldClim
<b>Variable ambiental 13</b>	Precipitación del mes más húmedo	WorldClim
<b>Variable ambiental 14</b>	Precipitación del mes más seco	WorldClim
<b>Variable ambiental 15</b>	Precipitación estacional (coeficiente de variación)	WorldClim
<b>Variable ambiental 16</b>	Precipitación del trimestre más húmedo	WorldClim
<b>Variable ambiental 17</b>	Precipitación del trimestre más seco	WorldClim
<b>Variable ambiental 18</b>	Precipitación del trimestre más cálido	WorldClim
<b>Variable ambiental 19</b>	Precipitación del trimestre más frío	WorldClim

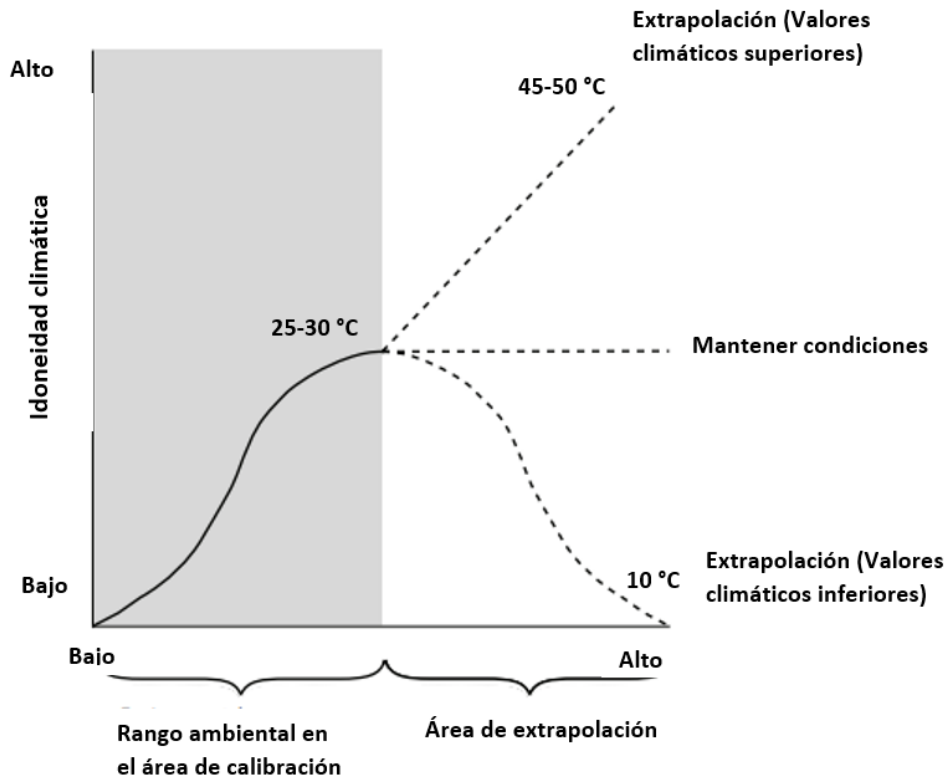
Fuente: (Hijmans *et al.*, 2005).

#### **3.4.1.2 CLIMA FUTURO**

La distribución potencial de *Swietenia macrophylla* King fue evaluada para dos tipos de Trayectorias Representativas de Concentración (RCP) (RCP 4.5/RCP 8.5). Estos RCP fueron desarrolladas por tres tipos de institutos climáticos hasta el 2050: HadGEM2-ES, MIROC-ESM, ACCESS1-0, dichos RCP fueron obtenidos de la base de datos del WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005) (**Ver tabla 2**). El escenario RCP 4.5 es un modelo climático que asume que la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) se mantiene estable hasta el 2100 y el RCP 8.5 asume un aumento continuo de la concentración de GEI hasta décadas posteriores al 2100 (IPCC, 2013).

En lo que concierne al modelo de nicho existen diversos tipos de proyecciones entre las cuales destacan la extrapolación y transferencia. La extrapolación hace referencia a que un modelo será proyectado a un clima no- análogo al que existe en el área donde fue calibrado el modelo bajo condiciones ambientales de clima actual (Figura. 6.). Por otra parte, las transferencias tienen como objetivo proyectar el modelo calibrado bajo condiciones ambientales actuales hacia condiciones que son análogas o similares (Peterson *et al.*, 2011).





**Figura 6.** Ilustración de tendencias seguidas por los modelos de nicho ecológico.

**Basado en:** Peterson *et al.* (2011).

Todas las proyecciones mencionadas tienen una utilidad muy eficaz dependiendo del tipo de investigación que se esté ejecutando y pero sin lugar a duda, depende si el investigador está buscando obtener con su modelo de nicho ajuste o predicción (Qiao *et al.*, 2018).

**Tabla 2. Modelos de circulación global utilizados en el modelo de nicho ecológico**

<b>Modelo climático global</b>	<b>Instituto</b>	<b>Componentes considerados en la elaboración del modelo climático global</b>	<b>Autor (es)</b>
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Troposfera</li> <li>▪ Superficie terrestre e hidrología,</li> <li>▪ Aerosoles</li> <li>▪ Océano y hielo marino, terrestre</li> <li>▪ Ciclo del carbono, Biogeoquímica oceánica,</li> <li>▪ Química</li> </ul>	(Bellouin <i>et al.</i> , 2011)
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama, Japan	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Química atmosférica</li> <li>▪ Nutriente-fitoplancton-zooplancton-detritus.</li> <li>▪ Ecosistema oceánico</li> <li>▪ Ecosistema terrestre (vegetación dinámica).</li> <li>▪ Efectos de los cambios de la vegetación en la emisión de polvo</li> <li>▪ Efectos de la deposición de carbono negro (BC) y el polvo en el albedo de la nieve</li> </ul>	(Watanabe <i>et al.</i> , 2011)
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Efectos radiactivos de los gases absorbentes H<sub>2</sub>O,</li> <li>▪ Se incluyen CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC11, CFC12 y O<sub>2</sub></li> <li>▪ Sulfato, el carbono orgánico, el polvo y la sal marina</li> <li>▪ El paso del tiempo de radiación solar.</li> <li>▪ Los turbulentos flujos de calor, humedad y horizontal.</li> </ul>	(Bi <i>et al.</i> , 2013)

### 3.4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS AMBIENTALES ACTUALES Y FUTUROS

Las capas climáticas actuales y futuras obtenidas de WorldClim fueron proyectadas a un sistema de coordenadas WGS 1984, posteriormente cortadas en base a la hipótesis del área de accesibilidad (M) propuesta para la especie *Swietenia macrophylla* King utilizando la extensión “SDMtoolbox” en el programa ArcGis 10.5 (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>).

Los cortes resultantes de las capas climáticas actuales y futuras fueron guardadas en un formato ASCII, dicho formato es leído por MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). Es importante tomar en cuenta que dichas variables deben de tener una dimensión geográfica similar, es decir, igual número de columnas y filas e igual número de celdas.

#### MODELADO DE NICHO ECOLOGICO

El software utilizado para generar los modelos de distribución potencial actual y futura fue MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). Se ha demostrado que este algoritmo genera modelos que se sobre ajustan a los datos de entrenamiento, lo cual permite predecir áreas de distribución más precisas (Pearson *et al.*, 2007; Ortega-Huerta y Peterson, 2008). Este algoritmo construye modelos en base a la distribución de la máxima entropía, por otra parte, permite conocer el valor de aportación de cada una de las variables con las que se está generando el modelo de distribución de las especies (Phillips *et al.*, 2006).

Del total de registros de presencia utilizados para la generación del modelo, se utilizó el 75% para calibración y el 25% restante para la validación del modelo.

El software fue programado para que ejecutara 10 réplicas en base a la modalidad “bootstrap”, 5000 interacciones, formato de salida logístico con un valor probabilístico de 0 a 1, se fijó un de valor mínimo de presencia de entrenamiento “minimum training presence”, para poder obtener un mapa binomial con valores de 0 a 1, donde 0 representa las áreas que no son adecuadas para la especie y el valor 1, áreas que son climáticamente idóneas para el desarrollo de la especie (Merow *et al.*, 2013).

#### ¿Cómo funciona MaxEnt?

El principio estadístico utilizado por MaxEnt, se enfoca en encontrar la distribución de probabilidad que maximice la entropía, es decir que sea la más cercana a la uniforme, pero considerando x-n de restricciones.

En base a este contexto, MaxEnt estima la distribución de los puntos de presencia de la especie que tiene un valor ambiental asociado de manera, que sea lo más uniforme posible en el área de estudio, que es representada por el corte del raster de las variables incluidas en el modelado de nicho.

### EJEMPLO DIDACTICO DEL PRINCIPIO DE MAXIMA ENTROPIA

Un investigador le plantean la siguiente pregunta:

¿Cuál es la manera más probable en que estén distribuidas las peras en tres cajas?

R= La distribución de máxima entropía es la más probable.

R= Según la fórmula de Shannon (1948) la entropía es  $S = -\sum_j n_j \ln(n_j)$  Donde  $n_j$  es igual al número de peras en las cajas. Por tanto, la distribución de máxima entropía es (3,3,3). (**Tabla 3**).

**Tabla 3. Matriz con cajas de peras con distribución uniforme sin restricciones.**

CAJA 1	CAJA 2	CAJA 3	ENTROPIA
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>-9.9</b>
1	5	3	-11.3
0	1	8	-16.6

Se evidenció que la mayor entropía está representada por las cajas que tiene el mismo número de peras (Distribución uniforme o más probable).

Sin embargo, se plantea más restricciones para organizar dichas peras.

Ahora se le plantea al investigador, otra pregunta adicional:

¿Cuál es la manera más probable en que estén distribuidas las peras en tres cajas, tomando como referencia que en la segunda caja el número de peras sea 5? (**Tabla 4**).

**Tabla 4. Matriz con cajas de peras con distribución uniforme con restricciones.**

CAJA 1	CAJA 2	CAJA 3	ENTROPIA
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>-10.8</b>
1	5	3	-11.3
4	5	0	-13.6

Se evidenció que la entropía se maximiza en la primera combinación de la fila 1 (2, 5, 2), la cual representa una distribución más uniforme y la más probable bajo la restricción impuesta.

Si se analiza desde una perspectiva que en lugar de cajas tenemos pixeles o celdas de la capa raster (en el área de accesibilidad de la caoba) y en lugar de peras tenemos puntos GPS (X, Y), y las restricciones representan las combinaciones de N- variables introducidas al modelo más restricciones estadísticas al fija umbrales estadísticos (porcentaje de puntos GPS utilizados para construir el modelo). En resumen, los pixeles en el área de calibración son espacio probabilidad (0-1), donde la entropía pueda maximizarse y ajustarse a las restricciones planteadas para el modelo.

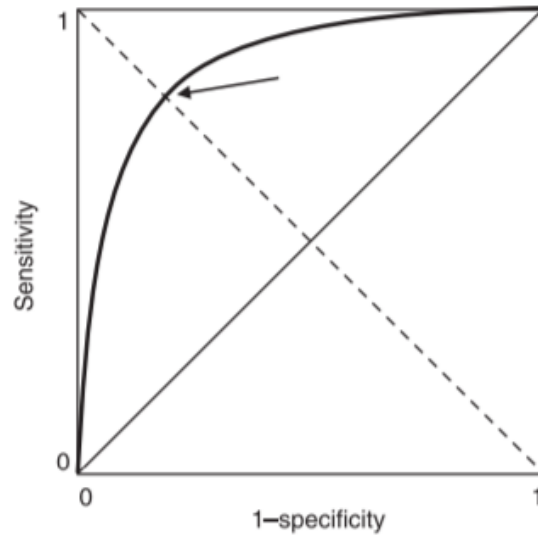
Al terminar todas las interacciones, MaxEnt asigna una probabilidad negativa a cada pixel, haciendo que al final la sumatoria de sea 1, por lo que se aplica un valor de corrección para hacerlos positivos y que sumen entre todos 100%.

## **EVALUACION Y VALIDACION DEL MODELO**

### **DESEMPEÑO PREDICTIVO O EVALUACIÓN**

Se evaluó el valor estadístico de predicción que tuvo cada uno de los modelos de distribución potencial actual y futura utilizando ROC-Parcial (receiver operating characteristic-partial) (Lobo *et al.*, 2007; Peterson *et al.*, 2008), con ayuda del software Tool for Partial-ROC (Barve, 2008). En este análisis estadístico se utilizó un remuestreo del 50% del total de puntos de prueba con 1000 iteraciones y un error de omisión del 5%.

ROC-Parcial es una estadística que considera aquellos modelos con mayor valor de AUC, por lo cual valores mayores a 1 representan modelos más robustos (Figura. 7.). Este estadístico permite asegurar que el modelo seleccionado está prediciendo mejor que al azar (Peterson *et al.*, 2008).



**Figura 7.** Diagrama de ROC-PARCIAL 1

**Basado en:** Lobo *et al.*, 2007

En la Figura 7. se representa el área donde los modelos comienzan a considerarse mejores que al azar, considerando el error de omisión que tengan los modelos.

Para comprender con mayor detalle, se realizó un análisis histórico desde la primera forma de evaluación de los modelos hasta el ROC-PARCIAL.

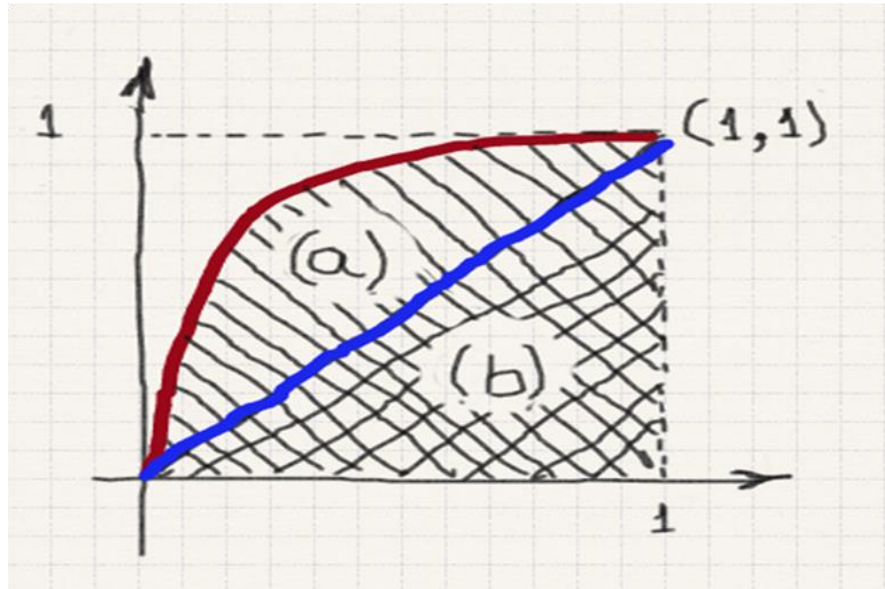
El primer método que se utilizó históricamente fue la matriz de confusión o error (Tabla 5.), la cual permitía estimar la tasa de omisión (proporción de presencias no predichas) y el error de comisión (proporción de ausencias no predichas). Ambos errores son necesarios para calcular la sensibilidad (1 - error de omisión) y la especificidad (1 - error de comisión) para construir la curva ROC (Peterson *et al.*, 2008).

**Tabla 5. Matriz de confusión**

	<b>Presencias reales</b>	<b>Ausencias reales</b>
<b>Presencias predichas</b>	Presencia verdadera	Error de comisión
<b>Ausencias predichas</b>	Error de omisión	Ausencia verdadera

El segundo método más utilizado en la literatura de modelos de nicho ecológico fue curva operada por el receptor (ROC, siglas en inglés), este método permite evaluar el desempeño del modelo de nicho, sin tener que estimar el valor de corte o umbral como se hacía en la matriz de confusión. La curva ROC analiza la especificidad que es igual a 1 - (tasa de error de comisión) y la sensibilidad que es igual a 1 - (tasa de error de omisión). Donde, la

especificidad representa una ausencia de error de comisión, y la sensibilidad representa la ausencia de error de omisión (**Figura 8**).

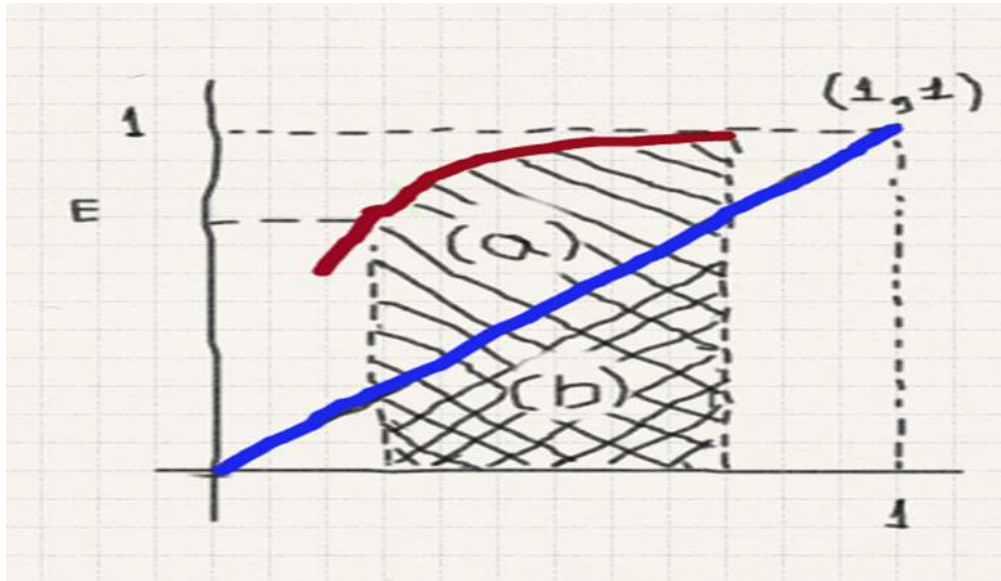


**Figura 8.** Curva ROC AUC completa

La tasa de errores de comisión representado en el eje  $x$  y la tasa predicción correcta de presencias en el eje de las  $y$ . El área total bajo la línea azul (b) es de 0.5.

Posteriormente, mediante este análisis se obtiene un gráfico de área bajo la curva (AUC, siglas en inglés), donde los valores van de 0 a 1. Un  $AUC = 0.5$  representa un desempeño estándar, sin embargo, puede ser considerado mala desde el punto de vista biológico. Los valores de AUC se clasifican en: (1) predicciones pobres (0.5 a 0.7); (2) predicciones razonables (0.7 a 0.9); y (3) muy buenas predicciones ( $> 0.9$ ), esto con el fin de interpretar la calidad del modelo con base en el valor de la AUC (Peterson et al., 2011).

La utilidad de la curva ROC ha sido sujeta a muchas observaciones debido a que es utilizada para evaluar el desempeño de algoritmos que solo utilizan datos de presencias de las especies y al mismo tiempo realiza un análisis con  $x$ -número de réplicas que son generadas por los modelares, por lo cual ponen en tela de duda su eficacia. Por estas razones, se utiliza en la actualidad ROC PARCIAL (**Figura 9**.)



**Figura 9.** Diagrama ROC PARCIAL 2

Se considera únicamente la sección de la curva comprendida entre el valor de la curva en el punto Especificidad. El valor  $1-E$  es la proporción de errores de omisión mínima tolerada (por ejemplo, 0.05).

### **VALIDACIÓN DEL MODELO BAJO CONDICIONES ACTUALES**

Como se explicó en el apartado de datos biológicos, los modelos de distribución potencial bajo condiciones actuales y futuras fueron construidos en base a datos de ocurrencias provenientes de muestras de herbario obtenidos mediante la plataforma de GBIF.

Sin embargo, dentro de la plataforma existieron datos procedentes de observaciones humanas (51 ocurrencias luego de un proceso de limpieza de duplicados), las cuales no fueron incluidos en la construcción, ni evaluación estadística del modelo, debido a que no se tenía certeza de que dichas observaciones, hayan sido identificadas de manera ideal a nivel taxonómico por las personas que hicieron la observación.

Sin embargo, se consideró tomar esas observaciones humanas para evaluar el poder predictivo del modelo de distribución potencial bajo condiciones actuales, bajo la idea hipotética de que estas observaciones humanas representan cultivos de caoba con fines de conservación o sistemas agroforestales de aprovechamiento local.

De tal forma, que estas observaciones pueden dar una idea clara de las condiciones potenciales en las cuales la especie puede mantener poblaciones estables y por ende poder asegurar su supervivencia a futuro.



En esta investigación se propone una nueva forma de validación de modelos de distribución potencial actuales para especies forestales, dicha validación sugiere determinar el porcentaje de observaciones humanas, que coinciden con el área predicha por el modelo de distribución potencial actual, por ende se estableció un rango: Si el porcentaje de observaciones que coinciden, dentro de los límites del área de distribución potencial predicha por el modelado bajo condiciones actuales, es superior a un 70% el modelo se considera que posee un alto valor de confiabilidad.

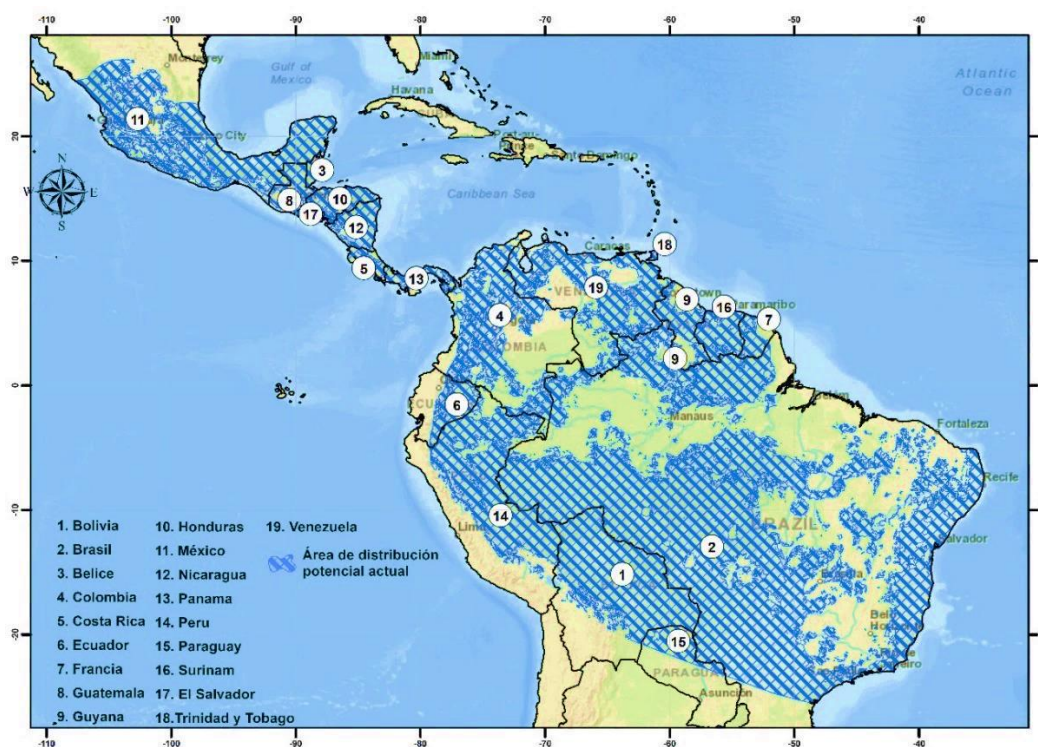
## 4. CAPÍTULO IV

### 4.1.RESULTADOS Y DISCUSION

#### 4.1.1. MODELOS DE DISTRIBUCION POTENCIAL ACTUAL

##### 4.1.1.1.ESCALA NATIVA

El modelo mostró una alta tasa de éxito para la prueba de AUC (0.98) y la proporción de ROC-PARCIAL (1.23;  $p < 0.001$ ), con una tasa de omisión de 0 %. El área de idoneidad ambiental predicha para *Swietenia macrophylla* King en la zona nativa bajo condiciones actuales de clima fue de ~ 8,3 millones de km<sup>2</sup> abarcando los siguientes países: Brasil (50.5%), México (9,5%), Bolivia (9%), Perú (7,9%), Colombia (6,1%), Venezuela (5,5%), Surinam (1,5%), Ecuador (1,4%), Paraguay (1,4%), Honduras (1,3%), Nicaragua (1,3%), Guyana (1,3%), Guatemala (1%), Guyana Francesa (0,7%), Panamá (0,6%), Costa Rica (0,5%), Belice (0,3%), El Salvador (0,2%), Trinidad y Tobago (0,1%) (**Figura 10.**)



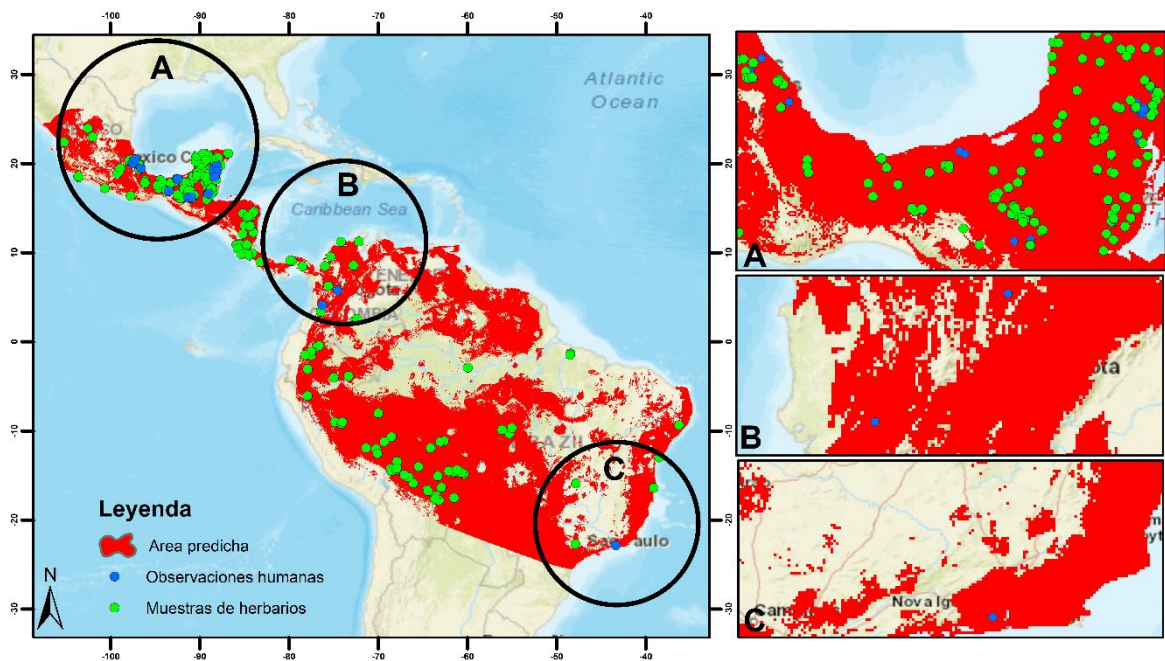
**Figura 10.** Distribución potencial actual de *Swietenia macrophylla* King.

El color azul debido por cuadrículas representa las áreas de idoneidad climática para la especie bajo condiciones de clima actual.

#### 4.1.2. VALIDACIÓN DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS ACTUALES

Para realizar esta validación se tomó en cuenta las observaciones humanas (51 ocurrencias) de la especie *Swietenia macrophylla* King y adicionalmente los datos de ocurrencias utilizados tanto en la construcción y evaluación (273 ocurrencias) del modelo de distribución potencial actual.

Posteriormente, estas ocurrencias fueron proyectadas en el espacio geográfico en conjunto con el área predicha por modelo de distribución potencial actual (**Figura 11.**).



**Figura 11.** Visualización en el espacio geográfico de datos de muestras de herbario y observaciones humanas de *Swietenia macrophylla* King en su área potencial de distribución actual.

En la Figura 11. Se visualiza los puntos verdes que representan los datos de ocurrencia obtenidos de muestras de herbario, los puntos azules los datos de ocurrencia obtenidos mediante observaciones humanas. Las áreas rojas representan las zonas predichas por el modelo de distribución potencial actual. Para poder enfocar con mayor precisión si los datos de observaciones humanas coincidían por las zonas predichas por el modelo de distribución potencial actual, se dividió en tres fracciones las observaciones humanas: A (Observaciones humanas centroamericanas), B (Observaciones humanas Nor-Sudamericanas) y C (Observaciones humanas Sur-Sudamericanas).

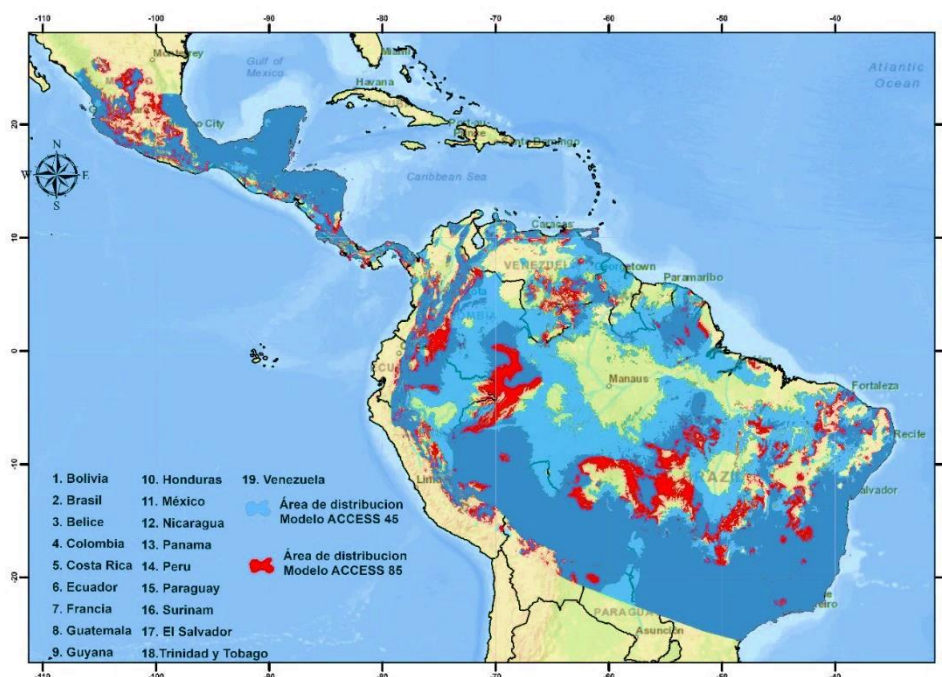
Posteriormente, se evaluó el porcentaje de observaciones humanas que coincidían dentro de las zonas predichas por el modelo de distribución potencial actual, este porcentaje representó el 100%, permitiendo establecer que el modelo antes mencionado posee un alto valor de confiabilidad.

### 4.1.3. MODELOS DE TRANSFERENCIAS CLIMATICA ACTUAL A ESCENARIOS FUTUROS

#### 4.1.3.1. ESCALA NATIVA

Los modelos de distribución potencial futura en base a escenarios de cambio climático global presentaron valores altos de tasa de éxito en la prueba AUC y ROC-PARCIAL: Modelo ACCESS 45 (0.97, 1.32), Modelo ACCESS 85 (0.94, 1.41), Modelo HadGEM2-ES 45(0.97, 1.25), Modelo HadGEM2-ES 85 (0.98, 1.36), Modelo MIROC-ESM 45 (0.97,1.30), Modelo MIROC-ESM 85 (0.97,1.39), todos tuvieron un valor de significancia  $p < 0.001$ .

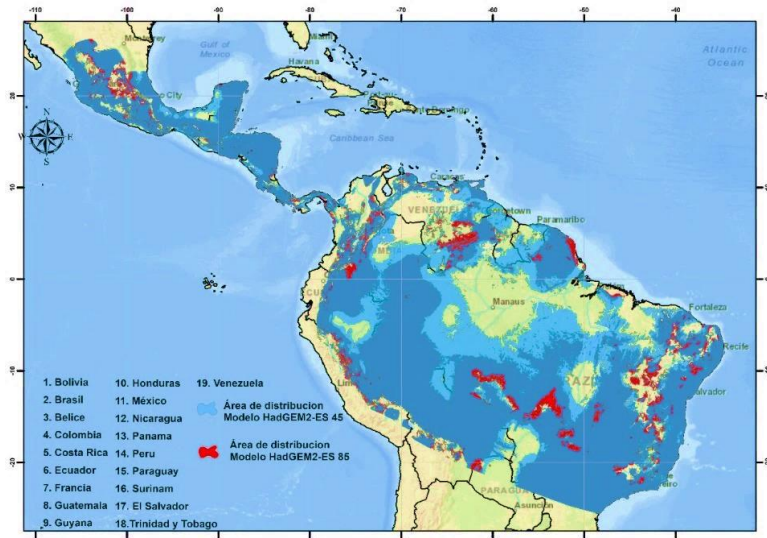
Las áreas predichas en el modelo ACCESS, presentaron aumento del 9,5% para el RCP 45 y una reducción parcial del 24% para el RCP 85 (**Figura 12**).



**Figura 12.** Distribución potencial futura de *Swietenia macrophylla* King en base al modelo climático futuro ACCESS.

En la Figura 12. Se realizó un traslape de áreas de distribución con un 30% de transparencia (el área predicha por el RCP 45 por encima del área predicha por el RCP 85), de tal forma que se pueda visualizar la reducción parcial de dichas áreas. El color azul claro representa las áreas predichas por el RCP 45, el rojo las áreas predichas por el RCP 85, finalmente el color azul oscuro representa las áreas que coinciden entre los dos RCP.

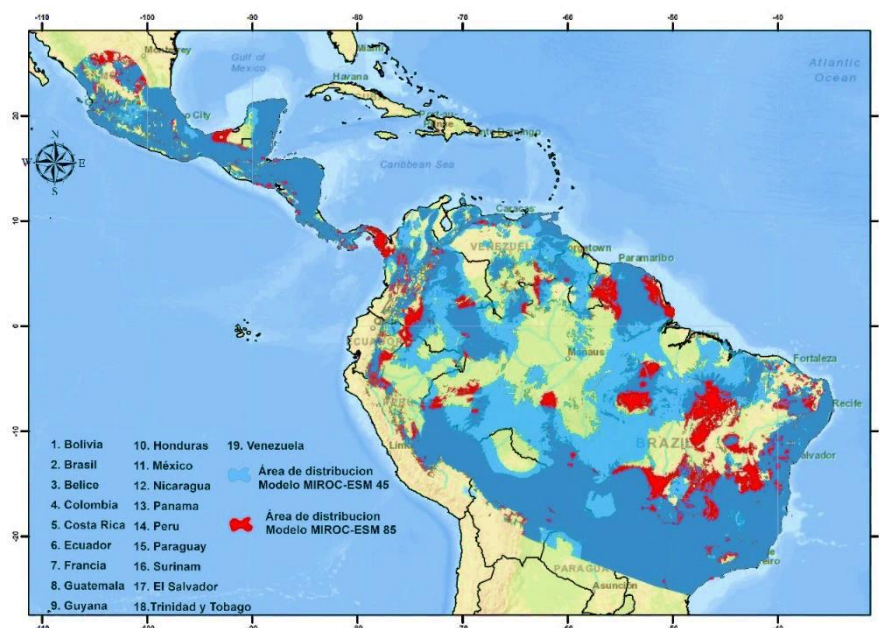
Por otra parte, para el modelo HadGEM2-ES, presentaron un aumento el presentaron un aumento el 18,2% para el RCP 45 y una reducción parcial del 21,9% para el RCP 85



**Figura 13.** Distribución potencial futura de *Swietenia macrophylla* King en base al modelo climático futuro HadGEM2-ES.

En la **Figura 13.** Se realizó un traslape de áreas de distribución con un 30% de transparencia (El área predicha por el RCP 45 por encima del área predicha por el RCP 85), de tal forma que se pueda visualizar la reducción parcial de dichas áreas. El color azul claro representa las áreas predichas por el RCP 45, el rojo las áreas predichas por el RCP 85, finalmente el color azul oscuro representa las áreas que coinciden entre los dos RCP.

Finalmente, para el modelo MIROC-ESM, presentaron un aumento el 2% para el RCP 45 y una reducción parcial del 21,6% para el RCP 85 (**Figura 14**).



**Figura 14.** Distribución potencial futura de *Swietenia macrophylla* King en base al modelo climático futuro MIROC-ES.

En la Figura 14. Se realizó un traslape de áreas de distribución con un 30% de transparencia (El área predicha por el RCP 45 por encima del área predicha por el RCP 85), de tal forma que se pueda visualizar la reducción parcial de dichas áreas. El color azul claro representa las áreas predichas por el RCP 45, el rojo las áreas predichas por el RCP 85, finalmente el color azul oscuro representa las áreas que coinciden entre los dos RCP.

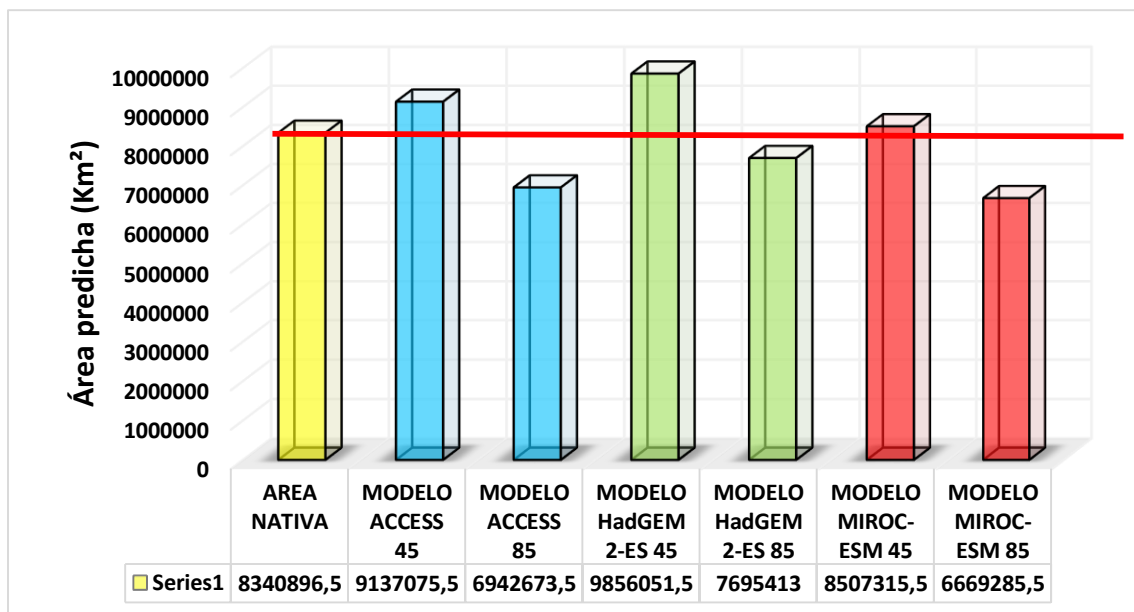
#### **4.1.4. SELECCIÓN DE MODELOS IDEALES A ESCALA NATIVA BAJO CONDICIONES FUTURAS**

Para la selección del modelo climático futuro más idóneo en base a su interpretación en el espacio geográfico y ambiental, se tomó en consideración aquel modelo que geográficamente las áreas predichas con mayor idoneidad climática en el RCP 45 sean similares a las condiciones climáticas actuales presentes en el área accesibilidad (M) y finalmente, que desde el espacio ambiental o climático las áreas predichas en ambos RCP 45-85 tenga una buena interpolación espacial en el interior del nicho fundamental y escasa extrapolación espacial.

Para la visualización e interpretación de los modelos de distribución potencial futuros (**Figura 15**), generados desde el espacio ambiental o climatológico que fue elaborado en una proyección conformada por tres componentes: En el eje X: Bio5 (Temperatura máxima del mes más cálido), eje Y: Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), eje Z: Bio12 (Precipitación anual). Esta proyección climática muestra un elipsoide (nicho fundamental) elaborado en base a los puntos de ocurrencias de la especie *Swietenia macrophylla* King que contenían los valores extraídos para cada uno los componentes analizados.

##### **4.1.4.1. ESCALA NATIVA**

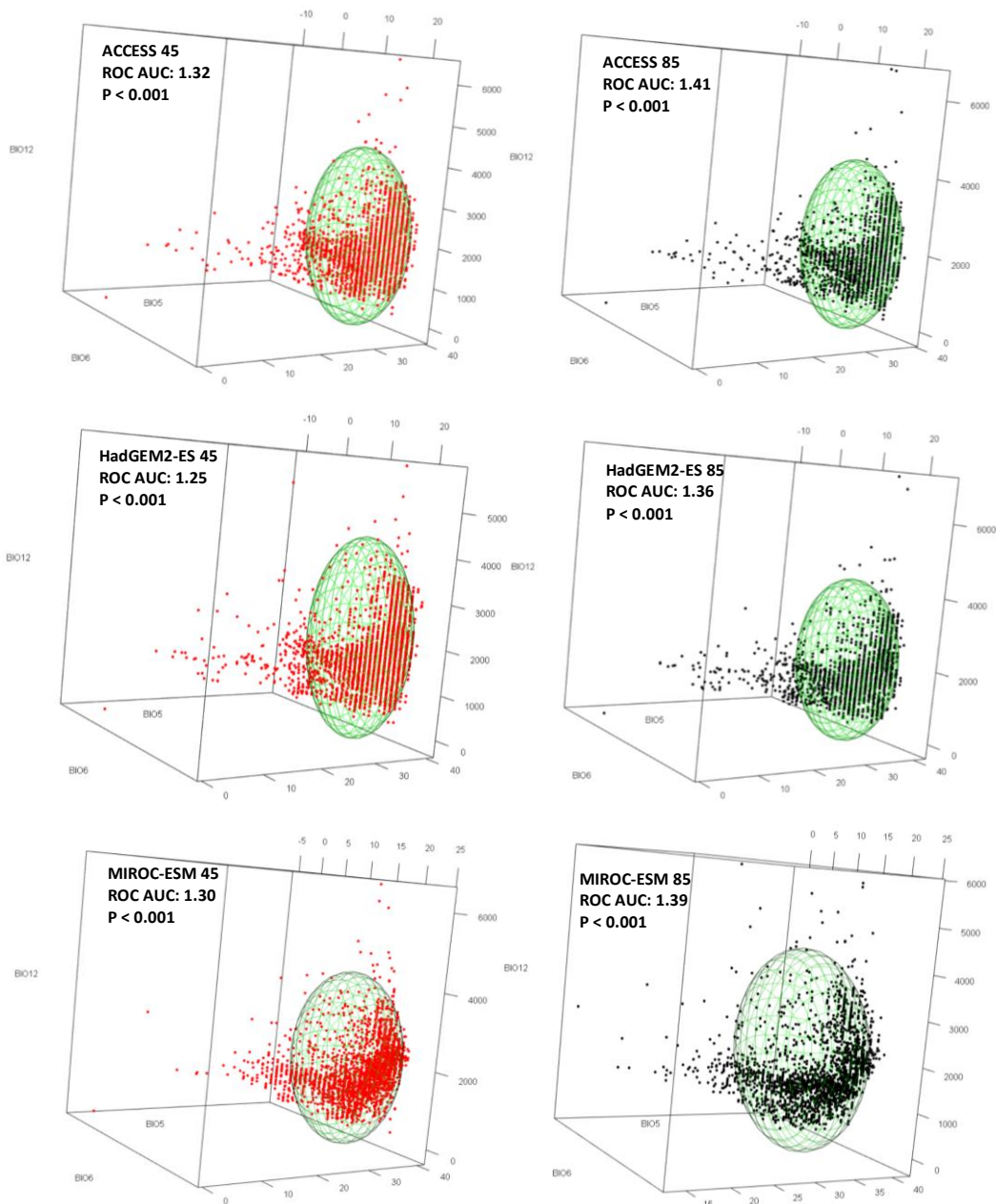
El modelo climático futuro que cumplió con los requisitos mencionados, fue el modelo MIROC-ESM (**Grafico 1**), el cual sus condiciones ambientales en el RCP 45 son muy similares a las presentes en el área de calibración (M).



**Gráfico 1.** Representación de las áreas de idoneidad climática predichas a escala nativa para la especie *Swietenia macrophylla* King bajo condiciones actuales y futuras.

El modelo MIROC-ESM para el RCP 85, presenta una reducción notable de áreas de distribución en países tales como: Ecuador (65%), Guyana (64,9%), Perú (51,2%), Paraguay (51%), Venezuela (46,4%), Bolivia (24,2%), Surinam (18,9%), Colombia (18,1%), Brasil (13,7%), Guatemala (13,1%), México (9%), Honduras (0,9%), El Salvador (0,8%), Costa Rica (0,5%), Trinidad y Tobago (0%) esto puede estar influenciado por la sobresaturación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el RCP 85. Reducciones similares han sido registradas bajo condiciones actuales, esto fue constatado por Kometter et al. (2004) que encontraron que el área de distribución original de la caoba en Perú y Bolivia disminuyó un 4 y un 8%, ocasionando una reducción del 50% y 97% de los árboles comerciales, respectivamente. Grogan y Loveless (2013) estiman que, de los 278 millones de hectáreas originales con caoba entre Venezuela y Bolivia, para el 2001, se habían perdido 58 millones de hectáreas.

Por otra parte, también existieron aumentos en el área de distribución predichos por el modelo MIROC-ESM para el RCP 85 en países tales como: Guayana francesa (41,5%), Panamá (10,3%), Nicaragua (3,3%), Belice (0,4%).



**Figura 15.** Visualización de los nichos fundamentales

En la Figura 15. Se logra visualizar los nichos fundamentales con sus respectivas predicciones en base a los RCP 45 y 85 de los modelos globales de circulación ACCESS, HadGEM2-ES, MIROC-ESM en el espacio ambiental. Los puntos rojos representan las condiciones ambientales presentes en las áreas predichas para los RCP 45. Los puntos negros representan las condiciones ambientales presentes en las áreas predichas para los RCP 85.



Todos los puntos que se encuentran en el interior del nicho fundamental representan interpolación espacial y los que están fuera extrapolación espacial.

#### **4.1.5. ANÁLISIS BIOLÓGICO Y CLIMÁTICO**

La vulnerabilidad de una especie esta expresada como la relación entre la escala en la que se realiza análisis y que tan susceptibles son organismos ante dicha modificación (Moritz y Agudo, 2013; Yang y Rudolf, 2010).

Se conoce que las especies consideradas generalistas caso de la caoba (de amplia distribución), tienen una tendencia a soportar mayores rangos de tolerancia a las variaciones de clima, en relación a las especies conocidas como especialistas (de distribución restringida) (Brown et al., 1995). En base a este contexto, se asume que el grado de afectación influenciado por el cambio climático, dependerá en proporción al área de distribución actual de las especies analizadas (Johnson, 1998; Thomas *et al.*, 2004).

Esto concuerda con lo establecido por Broennimann *et al.* (2012), que mencionan que las especies que serán menos afectadas por el cambio climático serán aquellas que poseen en la actualidad una gran amplitud de su nicho ecológico (áreas de distribución visto desde una percepción del espacio geográfico). Sin embargo, existe evidencia empírica por parte de otras investigaciones que establecen que no existe una relación entre el grado de afectación climático y el área de distribución actual (nicho ecológico) (Zank *et al.*, 2014).

Las predicciones generadas en base a modelos de cambio climático disponibles en internet, se evidencia una inestabilidad en el sistema de áreas protegidas a futuro (Ortega-Andrade *et al.*, 2015), esto debido a la reducción poblacional de las especies y al mismo tiempo, de su nicho ecológico (Hannah *et al.*, 2007) En base a este contexto, los modelos de nicho ecológico tomando en consideración su eficacia podrían cumplir un rol de gran importancia en lo que concierne tratar de predecir estos cambios futuros en las poblaciones y nichos ecológicos de las especies (Peterson *et al.*, 2011).

Se conoce que aquellas especies que poseen una vida extensa con mayor a 100 años (Caoba), pueden mantenerse a pesar de que las condiciones climatológicas no son las adecuadas para su supervivencia. Sin embargo, el hecho de no presentar un hábitat idóneo influye directamente en la reducción del crecimiento poblacional, por lo que se asume que la tasa de crecimiento será negativa, por ende, existirá una reducción de su área de distribución y número de individuos de la especie a futuro. Desde la parte biológica, esto concuerda con lo

establecido por diversos autores, los cuales coinciden que el clima podría influenciar en la distribución de las especies y desaparición de sus poblaciones (Parmesan, 2006; Root *et al.*, 2005).

Existe evidencia de que el aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, induce en el crecimiento de las poblaciones de especies forestales en las regiones tropicales, sin embargo, este crecimiento declina con el tiempo cuando se alcanza un nivel de saturación y dichas especies dejan de captar el mismo nivel de CO<sub>2</sub>, lo cual provoca que existe una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y por consiguiente aumento de la temperatura y precipitaciones (Bazzaz, 1990; Hättenschwiler y Körner, 2000). Por otra parte, Phillips y Gentry (1994), establecen que las especies forestales que poseen un crecimiento rápido como las plantas trepadoras (aquellas que fijan menor cantidad de carbono/m<sup>2</sup>), serán favorecidas por los incrementos de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Esto coincide con lo mencionado en investigaciones anteriores donde se menciona que los cambios globales del clima serán menos visibles en la región tropical (IPCC, 2013). Esto se corrobora en base a lo mencionado por diversos autores, los cuales estiman que la mayor parte de las especies tropicales presentaran una reducción notable en su área de distribución en cualquier de los escenarios climáticos futuros generados para finales del siglo (Hof *et al.*, 2011; Zank *et al.*, 2014). Sin embargo, se sabe que los organismos poseen una tolerancia térmica que se ve expuesta ante la magnitud que estén experimentando (Addo-Bediako *et al.*, 2000).

Es conocido que las especies forestales han sido expuestas a varias modificaciones de clima en toda su historia evolutiva, sin embargo, el ritmo de variabilidad climática actual supera por mucho el pasado (Thuiller *et al.*, 2011). Por ende, la supervivencia estas especies dependerá directamente de su rápida capacidad de adaptarse y migración rápida a zonas donde las condiciones ambientales sean las idóneas (Gray, 2005). Sin embargo, existen factores adicionales a considerar, tales como el estado de conservación de la vegetación (se asume que los cambios de su distribución son procesos lentos) y los patrones de deforestación (McKenney *et al.*, 2007).

La extracción selectiva (deforestación) de la especie *Swietenia macrophylla* King en su área nativa, es la principal causa de la pérdida de su hábitat debido a que posee un crecimiento lento (Granados y Corner, 2004). En base a este contexto, Smith *et al.* (2011) plantean se implemente una gestión forestal sostenible de la caoba en su área nativa, la cual se

fundamenta biológicamente en promover cosechas sostenibles que no comprometan a la recuperación poblacional de la especie y crecimiento de los individuos no incluido en las cosechas.

#### **4.1.6. EVALUACION DE LOS MODELOS DE NICHOS Y TRANSFERENCIAS**

#### **4.1.7. MODELOS DE NICHOS**

Los resultados obtenidos por los modelos a escala nativa coinciden con lo establecido por Pennington *et al.* (1981), los cuales mencionan *S. macrophylla* presenta un amplio rango de distribución que va desde el norte Veracruz a Yucatán en México y a lo largo de la costa Atlántica hasta Brasil y Bolivia. Por otra parte, Lemes *et al.* (2010) fundamentan que una posible causa de la amplia distribución de la caoba en Mesoamérica y la diferenciación entre las poblaciones de Centro y Sudamérica es la frecuente ocurrencia de huracanes en Centroamérica; así como la diferencia en la historia de los periodos glaciales y la duración e intensidad de los disturbios antropogénicos en el Holoceno.

Por otra parte, los resultados obtenidos por los modelos futuros coinciden con lo establecido por Kometter *et al.* (2004), los cuales encontraron que el área de distribución original de la caoba en Perú y Bolivia disminuyó un 4 y un 8%, ocasionando una reducción del 50% y 97% de los árboles comerciales, respectivamente. Grogan y Loveless (2013) estiman que, de los 278 millones de hectáreas originales con caoba entre Venezuela y Bolivia, para el 2001, se habían perdido 58 millones de hectáreas. Finalmente, Leguía *et al.* (2009) evidenciaron reducciones similares de áreas de distribución en comparación a los resultados obtenidos en esta investigación en países como Panamá y Nicaragua.

#### **4.1.8. TRANSFERENCIAS ESPACIO-TIEMPO**

La transferencia de modelos de nicho ecológico, implica dos procesos claramente identificados que se desarrollan en el espacio ambiental: interpolación y extrapolación (Heikkinen *et al.*, 2012). La interpolación hace referencia a la continuidad de las condiciones ambientales con las cuales fue calibrado el modelo en su área de accesibilidad (M), mientras que la extrapolación muestra condiciones ambientales fuera del rango climático presente en el área de calibración (M) (Owens *et al.*, 2013; Zurell *et al.*, 2012).

Elith y Leathwick (2009), sugieren que la extrapolación puede ser más importante en los estudios que se esfuerzan por hacer predicciones de cambios en la distribución ante el cambio global. Sin embargo, varios autores concuerdan que la extrapolación encontrada en transferencias a climas futuros es estadísticamente desafiante, debido a que obliga a los

algoritmos a realizar predicciones bajo condiciones climáticas novedosas (Fitzpatrick *et al.*, 2018; Owens *et al.*, 2013).

Finalmente, Qiao *et al.* (2018) establecen que la extrapolación excesiva generada por algunos algoritmos, debe de ser interpretada por la comunidad científica como mucha escéptica, sobre todo cuando dichas predicciones presentan cambios drásticos en la biología de las especies, pero sobre todo cuando los resultados de estos modelos de nicho solo representados en el espacio geográfico y no realizan su visualización e interpretación científica en el espacio ambientales.

Los modelos generados en la presente investigación poseen una alta extrapolación por esta razón deben ser interpretados con mucha cautela, estos son resultados de un análisis hecho en base a condiciones ambientales presentes en el área de calibración, pero pueden ser diferentes (climas análogos) en los escenarios climáticos futuros utilizados para realizar las transferencias espaciales (Anderson y Raza, 2010).

La extrapolación puede ser biológicamente irrealista; en esta investigación en particular los modelos climáticos futuros muestran idoneidad climática en rangos de 0 a 10 grados ° C, lo que es inverosímil para la caoba. Por otra parte, el sobre ajuste o poca interpolación en el nicho fundamental de la especie puede interpretarse como una reducción de las condiciones ambientales y biológicamente como reducción poblacional drástica de la especie (Owens *et al.*, 2013).

En base a esta contextualización, varios autores sugieren buscar métodos aplicados a modelos de nicho ecológico que generen alta interpolación en el nicho de las especies o al menos lo necesario que puede ser interpretado como una estabilización del crecimiento poblacional de las especies (Escobar *et al.*, 2018; Qiao *et al.*, 2017).

En la actualidad, la evaluación de los modelos de nicho ecológico es limitado y restringido a la sola interpretación en el espacio geográfico, sin embargo, estos fenómenos se dan en el espacio ambiental o climático (Muscarella *et al.*, 2014).

Investigaciones realizadas en los últimos años, mencionan que la gran diversificación de metodologías usadas para la generación de modelos de nicho ecológico puede influir directamente en su desempeño ideal (Qiao *et al.*, 2015). Esto sugiere que probablemente no existe un modelo de nicho ecológico “MEJOR-IDEAL-PERFECTO”, lo que indica la

urgente necesidad de realizar un análisis crítico por parte de los modeladores sobre las técnicas y softwares utilizados en sus investigaciones (Bhatt *et al.*, 2013).

Se ha experimentado con diferentes configuraciones del programa de modelado MaxEnt (diferentes tipos de umbrales, formatos de salida de modelos, reducción de sobre ajuste y sobre predicción) (Radosavljevic y Anderson, 2014), llegando a establecer que esto puede ayudar a predecir con mayor certeza las áreas de distribución de las especies (Nenzén y Araújo, 2011). Sin embargo, hasta la actualidad no existe un software de modelado de nicho que permita predecir dichas áreas con tal eficacia al primer intento (Qiao *et al.*, 2015), esto permite comprender que se deben de utilizar diversos softwares y analizar cuál de ellos, es aquel que permite generar un modelo de nicho que cumpla con mayor certeza la pregunta biológica que se planteó en la investigación.

Adicionalmente, en un futuro cercano es necesario realizar modelos de nicho ecológico más robustos, es decir, que puedan adicionarse capas raster que pueda contener de alguna manera los patrones de dispersión de semillas, competencias entre individuos, necesidades edafológicas (Hannah, 2011; Thomas, 2013). Esto enmarcado en el contexto de que la pérdida de especies forestales que presentan una macro distribución, desde una percepción de escala en el espacio geográfico, no es exclusivamente está influenciado por el cambio climático, sino también está asociado a interacciones tales como: cambio de uso de suelo, especies invasoras, patologías forestales.

## 5. CAPITULO V

### 5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Se generaron 4 mapas que representan las áreas de idoneidad climática *Swietenia macrophylla* King, 1 mapas representan el área predichas bajo condiciones actuales a escala nativa, 3 mapas representan las áreas predichas bajo condiciones futuras presentes en los modelos climáticos ACCESS-HadGEM2-ES-MIROC-ESM a escala nativa.
- ✓ El modelo que cumplió con el requerimiento de idoneidad climática y biológica para la especie *Swietenia macrophylla* King fue MIROC-ESM a escala nativa.
- ✓ Se evidenciaron perdidas parciales (21,6%) de áreas predichas como idóneas en el área nativa tomando como referencia el RCP 85 del modelo idóneo MIROC-ESM, pero a su vez también existieron aumentos de hasta un 2% en el RCP 45, lo cual permite discernir que las variaciones en los rangos climáticos futuros, pueden influenciar directamente en ecología, fisiología, desarrollo y comportamiento de las poblaciones de la especie *Swietenia macrophylla* King.

### 5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Desarrollar análisis filogenéticos para comprender con mayor certeza el origen evolutivo de la caoba y poder determinar con eficacia las variaciones en sus áreas de distribución desde una cosmovisión espacio-temporal.
- ✓ En base a la tendencia de extracción selectiva de caoba y reducción poblacional de los individuos en áreas nativas en bosques húmedos tropicales, es necesario que los gobiernos de los países en donde se encuentra distribuida, empiecen a adoptar medidas inmediatas de conservación que permitan asegurar su supervivencia, esto se podrá lograr mediante su monitoreo, control de tala selectiva y determinación de áreas idóneas climáticamente para el desarrollo de la especie.
- ✓ Es necesario evaluar la posibilidad de establecer cultivos de caoba en áreas donde las condiciones climáticas sean favorables para la especie, alcanzando su conservación en su área nativa de distribución.

### 5.3. BIBLIOGRAFIA

1. Abades, S., Armesto, J., Barria, S. I., Arroyo, M. T., Cavieres, L., Gajardo, R., . . . Prado, C. 2011. Estudio de vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático.
2. Acosta López, F. D., Orantes García, C., & Garrido Ramírez, E. R. 2017. Germinación y crecimiento de plántulas de caoba (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae) en condiciones de vivero. *Lacandonia* (1), 13-20% V 15.
3. Addo-Bediako, A., Chown, S. L., & Gaston, K. J. 2000. Thermal tolerance, climatic variability and latitude. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 267(1445), 739-745.
4. Ainsworth, N. M. (2010). Naturaleza. Obtenido de <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/ecologia/nicho-ecologico.htm>
5. Allen, K., Dupuy, J. M., Gei, M. G., Hulshof, C., Medvigy, D., Pizano, C., . . . Van Bloem, S. J. 2017. Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? *Environmental Research Letters*, 12(2), 023001.
6. Anderson, R. P., & Raza, A. 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of biogeography*, 37(7), 1378-1393.
7. Anderson-Teixeira, K. J., & Delucia, E. H. 2011. The greenhouse gas value of ecosystems. *Global Change Biology*, 17(1), 425-438. doi: doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02220.x
8. Angelsen, A., Jagger, P., Babigumira, R., Belcher, B., Hogarth, N. J., Bauch, S., . . . Wunder, S. 2014. Environmental Income and Rural Livelihoods: A Global-

Comparative Analysis. *World Development*, 64, S12-S28. doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.03.006>

9. ArcMap 10.3. (2016). arcgis. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
10. Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., . . . Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819. doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
11. Bazzaz, F. A. 1990. The response of natural ecosystems to the rising global CO<sub>2</sub> levels. *Annual review of ecology and systematics*, 21(1), 167-196.
12. Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365-377. doi: [doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x)
13. Bellouin, N., Collins, W., Culverwell, I., Halloran, P., Hardiman, S., Hinton, T., . . . O'Connor, F. 2011. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723-757.
14. Bhatt, S., Gething, P. W., Brady, O. J., Messina, J. P., Farlow, A. W., Moyes, C. L., . . . Sankoh, O. 2013. The global distribution and burden of dengue. *Nature*, 496(7446), 504.
15. Bi, D., Dix, M., Marsland, S. J., O'Farrell, S., Rashid, H., Uotila, P., . . . Sullivan, A. 2013. The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Aust. Meteorol. Oceanogr. J.*, 63(1), 41-64.
16. Blundell, A. G. 2004. A review of the CITES listing of big-leaf mahogany. *Oryx*, 38(1), 84-90.



17. Broennimann, O., Fitzpatrick, M. C., Pearman, P. B., Petitpierre, B., Pellissier, L., Yoccoz, N. G., . . . Zimmermann, N. E. 2012. Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial environmental data. *Global ecology and biogeography*, 21(4), 481-497.
18. Brown, J. H., Mehlman, D. W., & Stevens, G. C. 1995. Spatial variation in abundance. *Ecology*, 76(7), 2028-2043.
19. Chapman S. B. (1976) *Methods in plant ecology*. Blackwell Scientific, Osney Mead, Oxford. 5800 p.
20. Church, J. A., White, N., & Arblaster, J. 2013. Coauthors, 2013: Sea level change (pp. 1137-1216): Cambridge University Press.
21. CITES. 2005. Convention on International Trade Endangered Species of Wild Fauna and Flora. Official Documents. Consultado en octubre 2013. Disponible en <http://www.cites.org/esp/app/appendices.php>.
22. Clark, D. A., & Clark, D. B. 2011. Assessing Tropical Forests' Climatic Sensitivities with Long-term Data. *Biotropica*, 43(1), 31-40. doi: doi:10.1111/j.1744-7429.2010.00654.x
23. Cobos, M. E., Jiménez, L., Nuñez-Penichet, C., Romero-Alvarez, D., & Simoes, M. 2018. Sample data and training modules for cleaning biodiversity information. *Biodiversity Informatics*, 13, 49-50.
24. Duffy, P. B., Brando, P., Asner, G. P., & Field, C. B. 2015. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), 13172-13177. doi: 10.1073/pnas.1421010112
25. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., & Minx, J. C. 2014. Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

26. EIA. 2012. La Máquina Lavadora: Cómo el fraude y la corrupción en el sistema de concesiones están destruyendo el futuro de los bosques del Perú. EIA Global Org. Perú. 72 p.
27. 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.
28. Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
29. Escobar, L. E., Qiao, H., Cabello, J., & Peterson, A. T. 2018. Ecological niche modeling re-examined: A case study with the Darwin's fox. *Ecology and evolution*, 8(10), 4757-4770.
30. Felicísimo A. M., A. Gómez y J. Muñoz (2005) Potencial distribution of forest species in dehesas of Extremadura (Spain). *Advances in GeoEcology*. 37:231-246.
31. Fitzpatrick, M. C., Blois, J. L., Williams, J. W., Nieto-Lugilde, D., Maguire, K. C., & Lorenz, D. J. 2018. How will climate novelty influence ecological forecasts? Using the Quaternary to assess future reliability. *Global Change Biology*.
32. Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., . . . Eyring, V. 2013. *Evaluation of climate models*: Cambridge University Press.
33. Gaston, K. J. 2003. *The structure and dynamics of geographic ranges*: Oxford University Press on Demand.

34. Gentry, A. H. 1982. Patterns of Neotropical Plant Species Diversity. In M. K. Hecht, B. Wallace & G. T. Prance (Eds.), *Evolutionary Biology: Volume 15* (pp. 1-84). Boston, MA: Springer US.
35. Glick, P., Stein, B. A., & Edelson, N. A. 2011. *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment*. Washington, DC: National Wildlife Federation. 168 p.
36. Granados, J., & Corner, C. 2004. Respuesta de las selvas tropicales al incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 63-70.
37. Gray, P. A. 2005. Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples. *The Forestry Chronicle*, 81(5), 655-661.
38. Grogan, J., & Loveless, M. D. 2013. Flowering phenology and its implications for management of big-leaf mahogany *Swietenia macrophylla* in Brazilian Amazonia. *American journal of botany*, 100(11), 2293-2305.
39. Grogan, J., Landis, R. M., Ashton, M. S., & Galvão, J. 2005. Growth response by big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) advance seedling regeneration to overhead canopy release in southeast Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 204(2-3), 399-412.
40. Guisan A. URSIN A & NE Zimmermann N. E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
41. Hannah, L. 2011. Climate change, connectivity, and conservation success. *Conservation Biology*, 25(6), 1139-1142.
42. Hannah, L., Midgley, G., Andelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., . . . Williams, P. 2007. Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(3), 131-138.

43. Hättenschwiler, S. e., & Körner, C. r. 2000. Tree seedling responses to in situ CO<sub>2</sub>-enrichment differ among species and depend on understorey light availability. *Global Change Biology*, 6(2), 213-226.
44. Heikkinen, R. K., Marmion, M., & Luoto, M. 2012. Does the interpolation accuracy of species distribution models come at the expense of transferability? *Ecography*, 35(3), 276-288.
45. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. 2005. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. doi: doi:10.1002/joc.1276
46. Hijmans, R. J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J. y Hijmans, M. R. J. (2015). Package 'dismo'. *Circles*, 9, 1.
47. Hof, C., Araújo, M. B., Jetz, W., & Rahbek, C. 2011. Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature*, 480(7378), 516.
48. Hortal, J., Lobo, J. M. y Jiménez-Valverde, A. (2012). Basic questions in biogeography and the (lack of) simplicity of species distributions: putting species distribution models in the right place. *Natureza & Conservacao*, 10, 108-118.
49. Huerta-Martínez, F. M., & Ibarra-Montoya, J. L. 2014. Incendios en el bosque la primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. *CienciaUAT*, 9, 23-32.
50. Hutchinson, GE. 1957. Concluding remarks. *Cold Springs Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22:415-427.
51. Iglesias, J., Muñoz, L., Santiana, J., Chinchero, M., Jiménez, D., Palacios, W., . . . Jadán, A. (2018). Estudio Poblacional de *Swietenia macrophylla* King (Caoba/Ahuano) en la Provincia de Pastaza, Ecuador. XII Congreso Latinoamericano de Botánica, 1.

52. IPCC (2013): Resumen para responsables de políticas. En: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.), Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. pp.1- 27. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
53. Jiménez-Valverde, A., J. M. Lobo and J. Hortal. 2008. Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 14:885-890.
54. Kanninen, M., Murdiyarso, D., Seymour, F., Angelsen, A., Wunder, S., & German, L. 2007. Do trees grow on money: the implications of deforestation research for policies to promote REDD. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
55. Khaine, I., & Woo, S. Y. 2015. An overview of interrelationship between climate change and forests. *Forest Science and Technology*, 11(1), 11-18. doi: 10.1080/21580103.2014.932718
56. Kometter, R. F., Martinez, M., Blundell, A. G., Gullison, R. E., Steininger, M. K., & Rice, R. E. 2004. Impacts of unsustainable mahogany logging in Bolivia and Peru. *Ecology and Society*, 9(1).
57. Kometter, R. F., Martinez, M., Blundell, A. G., Gullison, R. E., Steininger, M. K., & Rice, R. E. 2004. Impacts of unsustainable mahogany logging in Bolivia and Peru. *Ecology and Society*, 9(1).
58. Kreakie, B. J., Fan, Y., & Keitt, T. H. 2012. Enhanced Migratory Waterfowl Distribution Modeling by Inclusion of Depth to Water Table Data. *PLOS ONE*, 7(1).

59. Kyle, G., & Duncan, D. H. 2012. Arresting the rate of land clearing: Change in woody native vegetation cover in a changing agricultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 106(2), 165-173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.03.004>
60. Lasco, R. D. 2008. Tropical forests and climate change mitigation: the global potential and cases from the Philippines. *Asian Journal of Agriculture and Development*, 5(1), 82.
61. Leguía, E. J., Locatelli, B., & Imbach, P. 2009. Impacto del cambio climático en plantaciones forestales en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* (56-57).
62. Lemes, M. R., Dick, C. W., Navarro, C., Lowe, A. J., Cavers, S., & Gribel, R. 2010. Chloroplast DNA microsatellites reveal contrasting phylogeographic structure in mahogany (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae) from Amazonia and Central America. *Tropical Plant Biology*, 3(1), 40-49.
63. Levano, A. (2016). Naturaleza. Obtenido de <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/ecologia/nicho-ecologico.htm>
64. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. (25 de 02 de 2003). conacyt. Obtenido de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/normatividad/vigente/SEMARNAT/LGDFS.pdf>
65. Lobo, J. M., A. Jiménez-Valverde and R. Real. 2007. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 17:145-151.
66. Marini, M. Â., Barbet-Massin, M., Lopes, L. E., & Jiguet, F. 2010. Predicting the occurrence of rare Brazilian birds with species distribution models. *Journal of Ornithology*, 151(4), 857-866.

67. Markham, A. 2013. Potential Impacts of Climate Change on Tropical Forest Ecosystems: Springer Netherlands.
68. Marmillod, D., De La Rosa, T., Panduro, M., Cornejo, A., & Correa, D. 2007. Diagnóstico para evaluar estrategias de manejo para la caoba. Documento técnico, 18.
69. Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., ATEO, R. G., FELICÍSIMO, Á. M., & MuñozUÑOZ, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84, 217-240.
70. Matsumoto, M., Oka, H., Mitsuda, Y., Hashimoto, S., Kayo, C., Tsunetsugu, Y., & Tonosaki, M. 2016. Potential contributions of forestry and wood use to climate change mitigation in Japan. *Journal of forest research*, 21(5), 211-222.
71. McKenney, D. W., Pedlar, J. H., Lawrence, K., Campbell, K., & Hutchinson, M. F. 2007. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *AIBS Bulletin*, 57(11), 939-948.
72. Mejía, E., Pacheco, P., Muzo, A., & Torres, B. 2015. Smallholders and timber extraction in the Ecuadorian Amazon: amidst market opportunities and regulatory constraints. *International Forestry Review*, 17(1), 38-50.
73. Melessa, U., & Palacios, W. 2011. Huella isotópica: ¿puede el análisis forense mejorar el control forestal? *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales* (10), 21-32.
74. Merow, C., M. J. Smith y J. A. Silander. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36: 1058-1069.
75. Miller, G., 2007, *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.

76. Moritz, C., & Agudo, R. 2013. The future of species under climate change: resilience or decline? *Science*, 341(6145), 504-508.
77. Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., & Anderson, R. P. 2014. ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198-1205.
78. Nenzén, H. K., & Araújo, M. 2011. Choice of threshold alters projections of species range shifts under climate change. *Ecological Modelling*, 222(18), 3346-3354.
79. O'Donnel, M. S., & Ignizio, D. A. 2012. Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States Data Series (pp. 17). Reston, VA.
80. Organización de las Naciones para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (20 de 06 de 2013). Organización de las Naciones para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Obtenido de <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/512238/>
81. Ortega-Andrade, H. M., Prieto-Torres, D. A., Gómez-Lora, I., & Lizcano, D. J. 2015. Ecological and geographical analysis of the distribution of the mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) in Ecuador: importance of protected areas in future scenarios of global warming. *PloS one*, 10(3), e0121137.
82. Ortega-Huerta, M. A. y A. T. Peterson. 2008. Modelado de nichos ecológicos y predicción de distribuciones geográficas: comparación de seis métodos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79: 205-216.
83. Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., . . . Myers, C. E. 2013. Constraints on interpretation of ecological niche models



- by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10-18.
84. Palacios, W. 2011. Situación de *Swietenia macrophylla* King y *Cedrela odorata* L. en el Ecuador. inédito). Quito: TRAFFIC-UICN.
  85. Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.
  86. Pearson, G. R., C. J. Raxworthy, M. Nakamura, y A. T. Peterson. 2007. Predicting species distribution from small number of occurrence records: a test using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34: 102-117.
  87. Pennington, T., Styles, B., & Taylor, D. 1981. Meliaceae. *Flora Neotropica Monograph 28*. The New York Botanical Garden, Bronx, New York, USA, 472.
  88. Peterson, A. T., M. Papes and J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213:63-72.
  89. Peterson, A., Soberon, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. (Princeton University Press: Princeton, NJ.).
  90. Phillips, O. L., & Gentry, A. H. 1994. Increasing turnover through time in tropical forests. *Science*, 263(5149), 954-958.
  91. Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231-259
  92. Qiao, H., Escobar, L. E., Saupe, E. E., Ji, L., & Soberón, J. 2017. A cautionary note on the use of hypervolume kernel density estimators in ecological niche modelling. *Global ecology and biogeography*, 26(9), 1066-1070.

93. Qiao, H., Feng, X., Escobar, L. E., Peterson, A. T., Soberón, J., Zhu, G., & Papeş, M. 2018. An evaluation of transferability of ecological niche models. *Ecography*.
94. Qiao, H., Feng, X., Escobar, L. E., Peterson, A. T., Soberón, J., Zhu, G., & Papeş, M. 2018. An evaluation of transferability of ecological niche models. *Ecography*.
95. Qiao, H., Soberón, J., & Peterson, A. T. 2015. No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(10), 1126-1136.
96. Rodda, G. H., Jarnevich, C. S., & Reed, R. N. 2011. Challenges in identifying sites climatically matched to the native ranges of animal invaders. *PloS one*, 6(2), e14670.
97. Rojas-Soto, O. R., Martínez-Meyer, E., Navarro-Sigüenza, A. G., Oliveras de Ita, A., Gómez de Silva, H., & Peterson, A. T. 2008. Modeling distributions of disjunct populations of the Sierra Madre sparrow. *Journal of Field Ornithology*, 79(3), 245-253.
98. Root, T. L., MacMynowski, D. P., Mastrandrea, M. D., & Schneider, S. H. 2005. Human-modified temperatures induce species changes: joint attribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(21), 7465-7469.
99. Shcheglovitova, M., & Anderson, R. P. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269, 9-17.
100. Shono, K., & Snook, L. 2006. Growth of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) in natural forests in Belize. *Journal of Tropical Forest Science*, 66-73.
101. Smith, M. J., Benítez-Díaz, H., Clemente-Muñoz, M. Á., Donaldson, J., Hutton, J. M., McGough, H. N., . . . Oldfield, T. E. 2011. Assessing the impacts of

international trade on CITES-listed species: current practices and opportunities for scientific research. *Biological Conservation*, 144(1), 82-91.

102. Soberon, J., & Peterson, A. T. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas.
103. Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Townsend, P. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Scielo*, 437 - 440.
104. Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. 2013. Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Cambridge (UK): Cambridge University Press.
105. Synnott, T. J. 1979. A manual of permanent plot procedures for tropical rainforests: Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford.
106. Téllez, O., M.A. Hutchinson, H.A. Nix y P. Jones. 2011. Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México. Universidad de Hidalgo, México.
107. Thomas, C. D. 2013. Biodiversity conservation in a changing climate. *Climate Change and Nature Conservation in Europe—an ecological, policy and economic perspective*, 42.
108. Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. 2014. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313-3328. doi: 10.1111/gcb.12581.
109. Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangeat, I., Lafourcade, B., & Araujo, M. B. 2011. Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470(7335), 531.

110. Torres, B., Billsborrow, R. E., Barbieri, A., & Torres, A. 2014. Cambios en las estrategias de ingresos económicos a nivel de hogares rurales en el norte de la Amazonía Ecuatoriana. *Revista Amazónica Ciencia Y Tecnología*, 3(3), 221-257.
111. Torres, B., Günter, S., Acevedo-Cabra, R., & Knoke, T. 2018. Livelihood strategies, ethnicity and rural income: The case of migrant settlers and indigenous populations in the Ecuadorian Amazon. *Forest Policy and Economics*, 86, 22-34.
112. Vasco, C., Torres, B., Pacheco, P., & Griess, V. 2017. The socioeconomic determinants of legal and illegal smallholder logging: Evidence from the Ecuadorian Amazon. *Forest Policy and Economics*, 78, 133-140.
113. Vazquez, D. P. (2005). Reconsiderando el nicho hutchinsoniano. *Scielo*, 149 - 158.
114. Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., . . . Yokohata, T. 2011. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 845.
115. Yang, L. H., & Rudolf, V. 2010. Phenology, ontogeny and the effects of climate change on the timing of species interactions. *Ecology Letters*, 13(1), 1-10.
116. Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., . . . Cardona, M. (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 69-82.
117. Yiming, L., & Cohen, J. M. 2013. Review and synthesis of the effects of climate change on amphibians. *Integrative Zoology*, 8(2), 145-161.
118. Zank, C., Becker, F. G., Abadie, M., Baldo, D., Maneyro, R., & Borges-Martins, M. 2014. Climate change and the distribution of neotropical red-bellied toads

(*Melanophryniscus*, Anura, Amphibia): how to prioritize species and populations? PloS one, 9(4), e94625.

119. Zurell, D., Elith, J., & Schröder, B. 2012. Predicting to new environments: tools for visualizing model behaviour and impacts on mapped distributions. *Diversity and distributions*, 18(6), 628-634.