



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

### Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

#### Carrera de Ingeniería Agrícola

### Distribución espacial de la especie *Inga insignis* bajo escenarios de cambio climático y cambios usos del suelo en la Región Sur del Ecuador

Trabajo de Titulación previo a  
la obtención del título de  
Ingeniero Agrícola

#### AUTOR:

Bryan Alexis Cartuche Coello

#### DIRECTOR:

Ing. Aníbal Eduardo González González, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

## Certificación

Loja, de 2 de marzo de 2023

Ing. Aníbal Eduardo González González, Mg. Sc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Distribución espacial de la especie *Inga insignis* bajo escenarios de cambio climático y cambios usos del suelo en la Región Sur del Ecuador**, previo a la obtención del título de Ingeniero Agrícola, de la autoría del estudiante Bryan Alexis Cartuche Coello, con cedula de identidad Nro. 1105745689, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Atentamente,

Ing. Aníbal Eduardo González González, Mg. Sc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **Autoría**

Yo, **Bryan Alexis Cartuche Coello**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula de identidad:** 1105745689

**Fecha:** Loja 10 de julio de 2023

**Correo electrónico:** bryan.cartuche@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988512582

**Carta de Autorización por parte del autor para la consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del trabajo de titulación**

Yo, **Bryan Alexis Cartuche Coello**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **“Distribución espacial de la especie *Inga insignis* bajo escenarios de cambio climático y cambios usos del suelo en la Región Sur del Ecuador”** como requisito para optar por el título de **Ingeniero Agrícola**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los diez días del mes de julio del dos mil veintitrés.

**Firma:**



**Autor:** Bryan Alexis Cartuche Coello

**Cédula de identidad:** 1105745689

**Dirección:** Loja, barrio Carigan

**Correo electrónico:** bryan.cartuche@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988512582

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director del Trabajo de Titulación:** Ing. Aníbal Eduardo González González, Mg. Sc.

## **Dedicatoria**

Dedico mi Trabajo de Titulación de manera especial a mis padres, a Guido Cartuche Loja y Marlene Esperanza Coello Mena. Quienes me ha inculcado a ser una persona responsable y respetuosa, a seguir mis metas a pesar de las dificultades y me han apoyado siempre en transcurso de mi formación académica.

***Bryan Alexis Cartuche Coello***

## **Agradecimiento**

Agradezco a la Universidad Nacional de Loja que me permitió salir adelante con mis estudios académicos, a la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables – FARNR, al personal administrativo de la carrera de Ingeniería Agrícola y del Centro de Investigaciones Territoriales – CIT, al Ing. Aníbal González Mg. Sc. por su valiosa revisión y redacción, así como los consejos necesarios para terminar el estudio de forma acertada y de manera especial al Ing. César Benavidez Silva PhD por su aporte en el modelamiento de distribución de la especie y guía.

***Bryan Alexis Cartuche Coello***

## Índice de contenidos

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Carta de Autorización</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de contenidos</b> .....	<b>vii</b>
Índice de tablas .....	ix
Índice de figuras .....	x
Índice de anexos .....	xi
<b>1</b> <b>Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1</b> <b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b> <b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b> <b>Marco teórico</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1</b> <b>Cambio de uso de suelo</b> .....	<b>6</b>
4.1.1      Factores del cambio de uso de suelo.....	6
4.1.2      Modelos de cambio de uso de suelo.....	6
<b>4.2</b> <b>Cambio climático</b> .....	<b>7</b>
4.2.1      Escenarios climáticos.....	7
<b>4.3</b> <b>Modelos de distribución de especies (MDE)</b> .....	<b>8</b>
4.3.1      Técnicas para modelar la distribución de especies.....	8
4.3.2      Modelos estadísticos de regresión.....	9
4.3.3      Métodos de clasificación.....	9
4.3.4      Métodos de sobre .....	9
4.3.5      Métodos basados en algoritmos específicos.....	9
4.3.6      Ensamblajes de técnicas.....	10
<b>4.4</b> <b>Limitaciones de los Modelos de distribución de especies (MDE)</b> .....	<b>11</b>
4.4.1      Hipótesis de pseudo-equilibrio.....	11
4.4.2      Relaciones Bióticas .....	11
4.4.3      Ausencia de componente temporal en el proceso .....	11
4.4.4      Ausencia del componente espacial.....	12
4.4.5      Limitaciones en la capacidad de dispersión de la especie.....	12
<b>4.5</b> <b>Ventajas de los modelos de distribución de especies (MDE)</b> .....	<b>12</b>

<b>4.6</b>	<b>Variables relacionadas a la distribución de especies (MDE).....</b>	<b>13</b>
<b>4.7</b>	<b>Aplicaciones de los modelos de distribución.....</b>	<b>14</b>
<b>4.8</b>	<b>Evaluación de modelos de distribución de especies .....</b>	<b>14</b>
<b>4.9</b>	<b>Características generales de la especie Inga Insignis.....</b>	<b>15</b>
4.9.1	Inga Insignis (Guaba).....	15
4.9.2	Clasificación taxonómica.....	16
4.9.3	Suelos.....	16
4.9.4	Propagación de la semilla.....	16
4.9.5	Importancia de la especie.....	16
<b>5</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>Área de estudio.....</b>	<b>19</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelamiento de la distribución potencial de la especie Inga insignis (Guaba) 20</b>	
5.2.1	Datos de presencia y pseudo-ausencia de la especie.....	21
5.2.2	Variables bioclimáticas y Topográficas.....	21
5.2.3	Calibración del modelo.....	21
5.2.4	Evaluación del modelo.....	22
<b>5.3</b>	<b>Predicciones del modelo y proyecciones.....</b>	<b>23</b>
<b>5.4</b>	<b>Definición de las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie por comparación entre los modelos actuales y futuros.....</b>	<b>23</b>
<b>5.5</b>	<b>Análisis estadístico .....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>25</b>
<b>6.1</b>	<b>Modelar la distribución espacial potencial futura de la especie Inga insignis en la Región Sur del Ecuador (RSE). .....</b>	<b>25</b>
<b>6.2</b>	<b>Definición de las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie por comparación entre los modelos actuales y futuros.....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>47</b>

## Índice de tablas

Tabla 1.	Variables bioclimáticas .....	13
Tabla 2.	Clasificación taxonómica.....	16
Tabla 3.	Categorías de uso actual del suelo en la Región Sur del Ecuador.....	19
Tabla 4.	Técnicas de modelación presentes en Biomod2.....	22
Tabla 5.	Índices de clasificación para predecir la exactitud del modelo.....	23
Tabla 6.	Clasificación del uso del suelo.....	24
Tabla 7.	Análisis VIF de las variables a considerar .....	25
Tabla 8.	Evaluación de las técnicas de modelación con los test True Skill Statistic (TSS) y Receiver Operating Characteristic (ROC).....	26
Tabla 9.	Superficie actual y futura de la especie <i>Inga insignis</i> en la RSE .....	27
Tabla 10.	Ganancias, pérdidas y persistencias de la distribución potencial futura de la especie <i>Inga insignis</i> para los años 2030,2050 y 2080 en el RSE .....	28
Tabla 11.	Rangos de aspectos bioclimáticos según los escenarios donde se distribuye la especie <i>Inga insignis</i> .....	29
Tabla 12.	Distribución Potencial actual y futuras menos uso del suelo de la especie <i>Inga insignis</i> .....	30

## Índice de figuras

Figura 1.	Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies.....	10
Figura 2.	Plántula de Inga Insignis. b. Fruto de Inga Insignis, c. Flor de Inga Insignis.....	17
Figura 3.	Flujograma de la modelación bajo escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0, actual y futuro para los años 2030,2050 y 2080 de la especie Inga insignis en la RSE .....	18
Figura 4.	Mapa de ubicación Región Sur del Ecuador – Categoría uso de suelo 2020.....	20
Figura 5.	Distribución potencial actual de la especie Inga Insignis .....	26
Figura 6.	Distribución potencial de la especie Inga insignis bajos los escenarios RCP 4.5 Y 6.0 para los años 2030, 2050 y 2080 en la RSE.....	27
Figura 7.	Distribución potencial de la especie Inga insignis asociada a la su superficie .....	29
Figura 8.	Distribución actual de la especie Inga insignis y el uso de suelo en la RSE.....	31

## Índice de anexos

Anexo 1.	Prueba Janckknife para variables importantes .....	47
Anexo 2.	Correlación de Pearson para las variables climáticas y topográficas.....	48
Anexo 3.	Evolución de las técnicas de modelación mediante test ROC y TSS.....	48
Anexo 4.	Evaluación de los ensambles de los modelos mediante el test ROC y TSS.....	49
Anexo 5.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2030 RCP4.5. .....	49
Anexo 6.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2050 RCP4.5. .....	50
Anexo 7.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2080 RCP4.5. .....	51
Anexo 8.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2030 RCP 6.0.....	51
Anexo 9.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2050 RCP 6.0 .....	52
Anexo 10.	Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2080 RCP 6.0 .....	53
Anexo 11.	Certificación de traducción Abstract.....	54

# 1 Título

**Distribución espacial de la especie *Inga insignis* bajo escenarios de cambio climático  
y cambios usos del suelo en la región sur del Ecuador**

## 2 Resumen

La especie *Inga insignis*, es una especie endémica del Ecuador, que es ampliamente utilizado en los sistemas agroforestales porque es favorable para el cultivo del café al proporcionar sombra, mantener la fertilidad del suelo y adaptarse a condiciones de suelos muy ácidos y pobres. El objetivo de este estudio es analizar el impacto del cambio de uso de suelo sobre la distribución de la especie *Inga Insignis* en la región sur del Ecuador, mediante el enfoque correlativo de modelación de la especie bajo distintos escenarios climáticos, dinámicas espaciales y temporales, para determinar su distribución potencial actual y futura. El modelamiento de la distribución potencial de la especie se llevó a cabo utilizando registros de presencia de la especie, 19 variables bioclimáticas, 4 variables topográficas y la librería Biomod2 v4.0 implementada en R Core Team (2021). Se aplicaron métodos estadísticos para excluir la multicolinealidad y el sobreajuste del modelo, para lo cual se utilizaron dos métodos: la correlación de Pearson y el factor de inflación de la varianza (VIF). Para la evaluación de los modelos y ensambles se realizó mediante los test ROC y TSS que alcanzaron valores mayores a 0.80 para ROC y 0.9 en TSS. Los modelos de distribución potencial se realizaron bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0 para los años 2030, 2050 y 2080, y se determinaron las zonas de ganancia, pérdida y persistencia de superficie para cada modelo utilizando un software de información geográfica. Además, se realizó una comparación de los modelos de distribución potencial mediante el cruce de capas con los modelos de cambio de uso del suelo que utilizan la información geográfica de cobertura terrestre basados en 20 tipos de cobertura Funcional Type (PTF) bajo los escenarios SSP – RCP 4.5 y 6.0 para el presente y para los años 2030, 2050 y 2080. La distribución de la especie *Inga insignis* (Guaba), en la región sur del Ecuador tiene una mayor tasa de incremento de área en el futuro bajo los escenarios RCP 4.5 y 6.0, mostrando tolerancia al cambio climático y alta capacidad adaptativa, especialmente en el sureste de la RSE, donde es más probable que se reproduzca. El rango de temperatura anual en que se desarrolla la especie oscila entre 23.6 a 9.1°C con un rango de elevación entre los 3333 a 643 m.s.n.m y la precipitación anual entre 3438 mm a 668.5 mm.

**Palabras clave:** *Inga insignis*, modelos de distribución de especie, región sur del Ecuador, escenarios climáticos, cambio de uso de suelo.

## 2.1 Abstract

*Inga insignis*, a species endemic to Ecuador, is widely used in agroforestry systems because it is favorable for coffee cultivation by providing shade, maintaining soil fertility and adapting to very acidic and poor soil conditions. The objective of this study is to analyze the impact of land use change on the distribution of the species *Inga Insignis* in the southern region of Ecuador, through the correlative approach of modeling the species under different climatic scenarios, spatial and temporal dynamics, to determine its current and future potential distribution. The modeling of the potential distribution of the species was carried out using records of species presence, 19 bioclimatic variables, 4 topographic variables and the Biomod2 v4.0 library implemented in R Core Team (2021). Statistical methods were applied to exclude multicollinearity and model overfitting, for which two methods were used: Pearson correlation and variance inflation factor (VIF). The evaluation of the models and assemblies was carried out using the ROC and TSS tests, which reached values greater than 0.80 for ROC and 0.9 for TSS. The potential distribution models were performed under the RCP 4.5 and 6.0 climate scenarios for the years 2030, 2050 and 2080, and the areas of surface gain, loss and persistence were determined for each model using geographic information software. In addition, a comparison of the potential distribution models was made by cross-linking layers with land use change models using geographic land cover information based on 20 Functional Type Cover (PTF) types under the SSP - RCP 4.5 and 6.0 scenarios for the present and for the years 2030, 2050 and 2080. The distribution of the species *Inga insignis* (Guaba), in the southern region of Ecuador has a higher rate of area increase in the future under the RCP 4.5 and 6.0 scenarios, showing tolerance to climate change and high adaptive capacity, especially in the southeast of the RSE, where it is more likely to reproduce. The annual temperature range in which the species develops ranges from 23.6 to 9.1°C with an elevation range between 3333 to 643 m.a.s.l. and annual precipitation between 3438 mm to 668.5 mm.

**Key words:** *Inga insignis*, species distribution models, southern Ecuador, climate scenarios, land use change.

### 3 Introducción

El cambio climático de origen antrópico, que se ha registrado en el transcurso de los últimos 60 años a nivel mundial, ha sido impulsado parcialmente por fenómenos asociados a cambios de uso de suelo causado por las actividades humanas, lo que ha provocado numerosas transformaciones en la distribución y abundancias de las especies a escala global (Chapin,2002; Walther,2002; Parmesan y Yohe ,2003; Root, 2003 citado por Suárez-Duque, 2009). El cambio climático en el Ecuador puede evidenciarse a través de la distribución espacial y temporal de la precipitación, en el incremento sostenido de la temperatura y en el retroceso de los glaciares (Aguirre *et al.*, 2010, p. 17).

Según la FAO (2016) en América Latina y el Caribe la conversión desde coberturas naturales hacia usos agrícolas de los ecosistemas naturales (pasto-arbustos-sabanas y bosques) ha alcanzado el 30 %, representando algo más de 600 millones de hectáreas de agro-ecosistemas, afectando a la biodiversidad presente en estas áreas. (p 48). El Ecuador es un país rico en diversidad de especies y representa una proporción importante de la biodiversidad mundial de alrededor del 10 % de todas las especies de plantas. Se estima que el país posee entre 25 mil especies de plantas vasculares de las cuales el 20 % de estas son endémicas (Villamar y Analía, 2015). Sin embargo, esta riqueza está amenazada debido a la degradación continua de los ecosistemas y el cambio climático, a pesar que los recursos naturales son los pilares de la economía y el desarrollo del país (Von, 2020.p.2).

En la región sierra del país, las zonas de vida de producción forestal van desde los 900 a 3000 m.s.n.m. en el cual se han identificado alrededor 181 sistemas agroforestales en la Subregión Sierra Centro (Sarango, 2015). Estos sistemas agroforestales estarían en peligro por los cambios de distribución geográfica de las especies como consecuencia de cambios en la distribución de las lluvias (Botero, 2015). El desplazamiento, adaptación o la extensión de las especies se provocan debido al cambio climático, produciendo impactos directos en la calidad de vida de la población y perjudicando la integridad de los ecosistemas (GTP, 2006). Existen estudios en la Región Sur del Ecuador que se han enfocado en evaluar patrones de cambio del suelo y deforestación, fragmentación y configuración espacial de los bosques como el realizado por Veliz Requena en el (2015), y Villalta en el (2018) quienes elaboraron un estudio de análisis multitemporal del cambio de uso de suelo para el cantón Zapotillo y Catamayo. En estos estudios se puede observar que el

impacto de la transición del uso del suelo en los ecosistemas depende de la cobertura existente antes de la transición y del tipo de cobertura establecida durante la transición (Hall et al., 2012).

Considerando que, El Art. 414 de la constitución de la República del Ecuador (2008), busca la adopción de medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático mediante la limitación tanto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como de la deforestación y la contaminación atmosférica; adoptando medidas para la conservación de los bosques y la vegetación (Asamblea Constituyente, 2008) ; y, que el cambio de uso de suelo es un problema que amenaza a la biodiversidad y a los sistemas agroforestales, se ha considerado la especie *Inga insignis* (Guaba), como centro del presente estudio, debido a que esta especie nativa de la región sur del Ecuador, es utilizada en los sistemas agroforestales para proporcionar sombra a algunos cultivos como el café y el cacao, además de mantener la humedad en la capa superficial del suelo, su madera es utilizada como leña y su fruto se consume como alimento (García, 2006).

La presencia de la especie en la región sur del Ecuador podría verse amenazada en su reproducción, al poseer una semilla recalcitrante (sensibles a la desecación) que pierde su viabilidad y al ser almacenadas, sufren daños por el frío, además problemas de contaminación microbiana y germinación por su alto contenido de humedad (Villamar y Analía, 2015).

La modelación y definición de sus habitas potenciales podría contribuir de manera significativa a aportar mayor información fundamental para la conservación, mantenimiento y preservación de la especie conservando la biodiversidad presente en la zona (Cartaya et al., 2016).

Bajo estas consideraciones, se ha planteado como pregunta de investigación ¿Cuál será el grado de vulnerabilidad de la especie *Inga Insignis* frente a escenarios de cambio climático y el cambio de usos de suelo en la región sur del Ecuador? Para ello se ha planteado como objetivo general: Analizar el impacto del cambio de uso de suelo sobre la distribución de la especie *Inga Insignis* en la Región Sur mediante el enfoque correlativo de modelación de la especie bajo distintos escenarios climáticos, dinámicas espaciales y temporales, para determinar su distribución potencial actual y futura.

#### **Objetivos específicos:**

- Modelar la distribución espacial potencial futura de la especie *Inga insignis* en la región sur del Ecuador (RSE).
- Definir las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie por comparación entre los modelos actuales y futuros.

## 4 Marco teórico

### 4.1 Cambio de uso de suelo

La cobertura vegetal son los llamados cuerpos naturales o artificiales que cubren la superficie del suelo, estos pueden ser de origen natural (bosques, sabanas, lagunas, etc.) o de ambientes artificiales creado por el ser humano (cultivos, bosques productores de madera, ciudades, etc.) (Marcillo et al., 2016). Las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cobertura vegetal se conocen como usos del suelo y el grado de explotación influye en las variedades del paisaje (Fernández y Prados, 2010).

Se define como cambio de uso del suelo a los cambios constantes que sufre la superficie terrestre principalmente por la apertura de nuevas superficies agrícolas, desmontes, asentamientos humanos e industriales, entre otros (Ramos-Reyes *et al.*, 2004). El estudio de este cambio es el centro de la investigación ambiental actual, por las implicaciones que conllevan en relación con la pérdida de hábitat, biodiversidad, servicios ambientales y la capacidad productiva de los ecosistemas (Fernández y Prados, 2010).

#### 4.1.1 Factores del cambio de uso de suelo

En el proceso de cambio de uso de suelo intervienen varios factores como los impulsores y las fuerzas impulsoras. Refiriéndose a los impulsores al origen de los cambios en la cobertura del suelo estos pueden ser biofísicos y socioeconómicos (Briassoulis, 2020). Los impulsores biofísicos incluyen características y procesos del entorno natural como los factores climáticos, relieve, sucesión de planta, entre otros; mientras que los impulsores socioeconómicos se refieren a los procesos demográficos, sociales, económicos, políticos e institucionales. Mientras que las fuerzas impulsoras son la quema de biomasa, aplicación de fertilizantes, transferencias de especies, rotación del suelo, pastoreo, expansión de cultivo que promueven la erosión, desarrollo marginal urbano, entre otros (Isabel y Pérez, 2021).

#### 4.1.2 Modelos de cambio de uso de suelo

Para Isabel y Pérez (2021) un modelo es la representación gráfica o abstracta de un objeto, fenómeno, procedimiento o transformación el cual es utilizado para describir, analizar, simular, interpretar y predecir el comportamiento de un proceso, manifestación o fenómeno. Este se puede describir como una representación simplificada de un sistema real el cual es un método eficiente para reducir y entender la complejidad de los sistemas (Martínez *et al.*, 2011).

“La cuantificación de cambios de uso de suelo a través de la percepción remota junto con las herramientas de análisis que ofrecen los sistemas de información geográfica para modelar los procesos de cambio es una forma muy eficaz para comprender la dinámica de cambio de un territorio”(Pastrana, 2011, p.12).

## **4.2 Cambio climático**

El cambio climático es una serie de alteraciones en los patrones de distribución del clima en largos periodos de tiempo que contienen un aumento en la temperatura, cambios en los ciclos de precipitación y fenómenos climáticos extremos, siendo la causa principal de esto la actividad humana a diferencia de la variabilidad climática producida por causas naturales (Alban Cornejo, 2015). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que es el órgano de las Naciones Unidas encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático define al cambio climático como la variación del estado del clima identificable mediante pruebas estadísticas en n las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo (IPCC, 2013). El cambio climático está alterando irremediamente la integridad de la biosfera causando la extinción de plantas y animales (Pounds y Coloma, 2008).

### **4.2.1 Escenarios climáticos**

Los estudios del impacto del cambio climático se han realizado a través de las proyecciones a lo largo del siglo XXI mediante la utilización de escenarios climáticos (Gómez, 2016). Los escenarios climáticos son representaciones plausibles del clima a futuro basado en un conjunto de relaciones climatológicas (Centro UC cambio global, 2017).

En el quinto informe de evaluación AR5 (2013-2014) del IPCC estableció cuatro nuevos escenarios denominados Sendas Representativas de Concentración (RCP) que proveen un rango de emisión y concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que permite la exploración de posibles climas futuros de una forma más amplia que los utilizados en el pasado (CIIFEN, 2021). Los RCP son definidos según la intensidad de radiación para 2100, donde las estimaciones para la forzante radiactiva están basadas en las emisiones de GEI (Rodríguez, 2013).

Los cuatro escenarios RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento(CIIFEN, 2021). El RCP8.5 es considerado como de altas tasas de emisiones de GEI siendo el escenario más desfavorable. Los escenarios RCP6.0 y RCP4.5

pueden ser considerados como escenarios de mitigación mediana, en tanto que el de RCP2.6 puede ser considerado como el grado más bajo de emisiones (Rodríguez, 2013).

La trayectoria que puede los escenarios RCP considera las emisiones de gases de efecto invernadero en 2010 a 2100 considerando como el rango temporal futuro cercano (2010-2040), futuro medio (2041-2070) y futuro lejano (2071-2100) (Aclima, 2020).

### **4.3 Modelos de distribución de especies (MDE)**

Los modelos de distribución de especies son 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). Generalmente se basan en hipótesis biogeográficas, en el análisis de los gradientes ecológicos y los factores ambientales (García, 2013).

El concepto de idoneidad representa lo adecuado o inadecuado que es un lugar para satisfacer las necesidades o requerimientos de una especie calculada a partir de observaciones de campo y una serie de variables ambientales que actúan como predictores (Benito y Peñas, 2007).

Las variables ambientales pueden 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 (Mateo et al., 2011). La expresión de idoneidad del hábitat puede ser binaria, otorgando valor 1 a áreas idóneas y 0 a áreas no idóneas; o, continua, según un rango de valores que clasifican el territorio de menor a mayor grado de idoneidad (Benito y Peñas, 2007).

En el modelo de distribución de especies se destacan cinco elementos como: registros de presencias de la especie, variables ambientales almacenadas como mapas digitales (Rasters), un algoritmo que analice la relación entre ambas entradas, un modelo definido en el espacio ecológico y el resultado representado en forma de mapa (López, 2012).

#### **4.3.1 Técnicas para modelar la distribución de especies**

Existen varias técnicas de modelación para la distribución geográfica de las especies/ecosistemas siendo las más notables: Los relacionados a modelos estadísticos de regresión Modelos Lineales Generalizados (GML), Modelos Aditivos Generalizados (GAM)), los métodos de clasificación (Random Forest (RF), Boosted regression trees (BRT)), y los basados en algoritmos específicos (GARP, MAXENT) (Pliscoff y Fuentes, 2011).

### **4.3.2 Modelos estadísticos de regresión**

Son los más utilizados para la modelación de especies estos se basan en regresiones múltiples (Guisan et al., 2002). Permitiendo investigar las relaciones causales entre las variables ambientales y los registros de presencia y ausencia de la especie y ajustar el mejor modelo basado en la combinación óptima de variables significativas según el principio de parsimonia (Gutiérrez et al., 2018).

### **4.3.3 Métodos de clasificación**

Estos métodos necesitan los datos de presencia y ausencia, se basan en clasificaciones basadas en reglas, donde se asigna una clase para cada combinación de las variables predictivas que generan el modelo de distribución (Guisan y Zimmermann, 2000) Son identificados por dar buenos resultados al discriminar la importancia de las variables para la definición del modelo final el inconveniente de los métodos de clasificación es que la caracterización del conjunto de reglas que definen el modelo final es muy compleja dificultando su interpretación (López et al., 2016).

### **4.3.4 Métodos de sobre**

“Se basan en el establecimiento de combinación de rangos de valores máximos y mínimos entre las variables utilizadas para la definición del nicho”(Hernández, 2016). En donde se define un espacio o “sobre” en donde se combinan los valores deseados dentro del espacio n- dimensional de las variables (Pliscoff y Fuentes, 2011). Este modelo ofrece una definición muy poco flexible del espacio geográfico o climático sin tener en cuenta los diversas interacciones que san entre las variables como la colinealidad o el efecto de la distancia geográfica entre las presencias (autocorrelación espacial), por lo que ya no es tan utilizado en la actualidad (Hernández, 2016).

### **4.3.5 Métodos basados en algoritmos específicos**

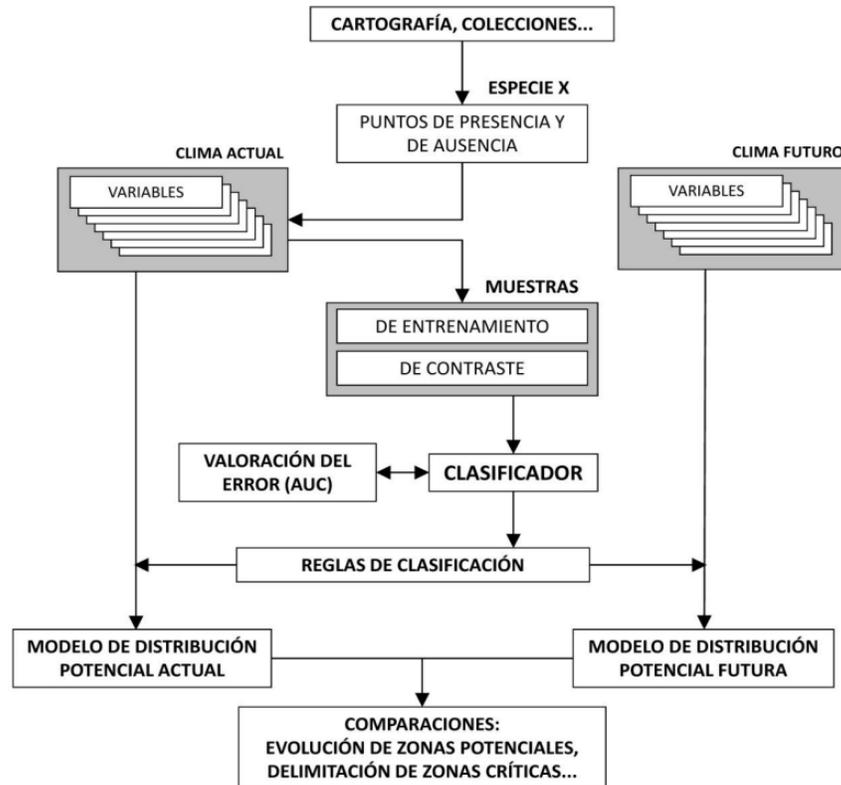
El uso de técnicas basadas en algoritmos específicos (máxima entropía, algoritmos genéticos) están tomando fuerza en los últimos años, por la facilidad de su aplicación y la rapidez que se obtienen los resultados (López *et al.*, 2016). El software MaxEnt es el que más destaca porque usando un algoritmo de máxima entropía, “se basa en el principio de que la distribución estimada de la especie debe coincidir con la distribución deducida a partir de las condiciones ambientales donde ha sido observada evitando hacer cualquier suposición que no sea soportada por los datos (Navarrete, 2019). Logrando resultados robustos en términos de distribución espacial,

cuando se cuenta con pocos datos de presencia de la especie de estudio (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011).

El procedimiento de construcción de los modelos espaciales se basa en una serie de premisas que guían el proceso general de trabajo (Mateo et al., 2011).

**Figura 1.**

Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies



Fuente: (Mateo *et al.*, 2011)

#### 4.3.6 Ensamblados de técnicas

El ensamble de técnicas permite disminuir las incertidumbres asociadas a los modelos de distribución relacionado a la validez estadística de los resultados obtenidos (Araújo y New, 2007; Marmion et al., 2009). **BIOMOD 2** (Modelización de la Biodiversidad): Es una herramienta programada para la generación de modelos de consenso creada como plataforma para compilar varias técnicas para la previsión de distribución de especies (Mateo et al., 2011). A partir de los modelos individuales se generan ciertos modelos consenso o ensamble en los que el modelo final indica el grado de coincidencia entre varios modelos generando un promedio ponderado de acuerdo a su precisión (Neder, 2016).

#### **4.4 Limitaciones de los Modelos de distribución de especies (MDE)**

De acuerdo a la investigación realizada por Mateo (2008) las limitaciones en los modelos de distribución de especies son las siguientes:

##### **4.4.1 Hipótesis de pseudo-equilibrio**

Los modelos asumen que las especies se encuentra en equilibrio o en pseudo-equilibrio con el medio ambiente (Mateo, 2008). Suponiendo que la distribución de las especies es estable en el tiempo y el espacio (Mateo et al., 2011). La validez de este supuesto varia sustancialmente entre las especies, el equilibrio con el medio ambiente es inversamente relacionado con la capacidad de las especies para seguir los cambios ambientales futuros (Araújo y Pearson, 2005).

##### **4.4.2 Relaciones Bióticas**

La distribución de las especies se da debido a varios procesos complejos donde las relaciones bióticas desempeñan un papel fundamental, que no se tienen en cuenta en la mayoría de los MDE, al igual de las demás interacciones como la polinización, depredación, parasitismo etc. Esto es debido a que incorporar este tipo de relaciones al MDE es difícil y no existe un consenso sobre la influencia de este en el modelamiento varios autores consideran que estas tienen una influencia a escala local y regional como las competencias interespecíficas (Mateo *et al.*, 2011). Pero existe evidencia que también influyen a escala macroecológicas como fue demostrado en el estudio realizado por Araújo y Luoto (2007).

##### **4.4.3 Ausencia de componente temporal en el proceso**

Los modelos de distribución de especies siguen siendo representaciones fotográficas de un momento concreto y por tanto no reflejan los procesos históricos sus reglas y clasificadores no pueden tenerlos en cuenta como los eventos geológicos, antropogénicos o climáticos (Guisan y Zimmermann, 2000; Svenning *et al.*, 2006).

Actualmente, los modelos evalúan los escenarios climáticos propuestos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) estos escenarios siguen siendo instantáneas ya que su cálculo se realiza independientemente y no hay reglas de transición entre los periodos temporales (Mateo *et al.*, 2011).

#### **4.4.4 Ausencia del componente espacial**

La modelización de la distribución de una especie consiste esencialmente en cartografiar la distribución potencial de esta y representarla en un mapa, pero en el mismo no se toma en cuenta las relaciones espaciales entre los puntos de partida siendo estos las presencias de la especie con sus respectivas coordenadas que son usados para la extracción de los valores de las variables independientes sin considerar lo que sucede alrededor de estos (Mateo et al., 2011).

Causando que el valor de idoneidad de un punto en concreto se estime con total independencia de los valores de sus vecinos y que la posible correlación espacial surja de la asociación entre variables independientes, pero no de la estructura espacial de las presencias/ausencias por ende es frecuente encontrar zonas potenciales separados por barreras climáticas. La solución a esta limitante es añadir reglas en el cálculo de idoneidad que permita que el contexto espacial de cada punto sea tomado en cuenta en la estimación (Mateo et al., 2011).

#### **4.4.5 Limitaciones en la capacidad de dispersión de la especie**

Esto es debido a que en algunos casos una especie puede no estar presente en su área potencial de distribución por su capacidad de dispersión o que estas ocupen partes limitadas de estas áreas (Mateo, 2008, p. 40). Esto se corrobora en el estudio realizado por Svenning y Skov (2004) en donde la distribución potencial de las especies nativas arbóreas de Europa se vio limitadas en gran medida por la limitada dispersión de estas. Guisan y Thuiller (2005) también recalcan la importancia del efecto de las barreras a la dispersión.

#### **4.5 Ventajas de los modelos de distribución de especies (MDE)**

La modelación de distribución de especies proporciona la medida de ocupación potencial de una especie en áreas no exploradas ya sea por motivos económicos o accesibilidad (Mejía et al., 2018). Además de la misma forma que se puede proyectar en el tiempo y espacio futuro es posibles proyectar la distribución en tiempos pasados permitiendo conocer antecedentes claves para caracterizar de mejor forma la distribución actual, como para hipotetizar como serán los cambios esperados en el futuro, se han aplicado esto para identificar refugios biogeográficos, rutas de migración y evaluación de hipótesis de conservación del nicho (Pliscoff y Fuentes, 2011). Este enfoque de modelación fue utilizado por Nogués et al. (2008) en donde se evaluó diversas hipótesis sobre la desaparición de la especie del mamut lanudo y mediante la modelación de su paleo-distribución en relación a la variación del espacio climático se definió la hipótesis más fuerte.

Los modelos de distribución de especies/ecosistemas es una de las áreas de investigación con mayor desarrollo en el campo de la biografía de la conservación, esto gracias a los grandes avances en tecnología informática, métodos analíticos, la disponibilidad de datos biológicos y la creciente demanda de predicción de especies/ ecosistemas generando un nuevo dinamismo en la disciplina biogeográfica (Richardson y Whittaker, 2010).

#### 4.6 Variables relacionadas a la distribución de especies (MDE)

Las variables que principalmente se utilizan para la MDE son las variables climáticas (bioclimáticas) y las variables topográficas. Las primeras son mayormente utilizadas independientemente del tipo de ecosistema o entidad natural esto debido a la facilidad de obtención, existiendo bases de datos globales a una resolución alta (~1 km) de acceso libre (Hijmans et al., 2005) Una de las estrategias de selección más empleadas en los MDE son el conjunto de variables climáticas predefinidas como las que se encuentran disponibles en WorldClim.org que es una base de datos global de superficie climática para uso cartográfico y creación de modelos espaciales de todo el mundo (Tabla1) siendo una base de 19 variables climáticas (Hernández, 2016; Hijmans et al., 2005; Manuel y Barredo, 2016).

Las Variables topo-edáficas o derivadas de imágenes satelitales como la son la cobertura de uso de suelo o índices de productividad son de gran utilidad para la obtención de modelos con un mayor ajuste (Zimmermann et al., 2007; Randin et al., 2009). En especial las topográficas que su uso en conjunto con las variables bioclimáticas pueden mejorar el resultado de los modelos dando una mayor precisión y detalle (Randin *et al.*, 2009).

**Tabla 1.**  
Variables bioclimáticas

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura Media Anual (°C)
BIO2	Rango Medio Diurno °C = (Media mensual (max temp - min temp))
BIO3	Isotermalidad (°C) =(BIO2/BIO7) (* 100)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)
BIO5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
BIO7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media del mes más húmedo (°C)
BIO9	Temperatura media del mes más seco (°C)
BIO10	Temperatura media del cuatrimestre más cálido (°C)
BIO11	Temperatura media del cuatrimestre más frío (°C)
BIO12	Precipitación anual (mm)
BIO13	Precipitación del periodo más húmedo (mm)

BIO14	Precipitación del periodo más seco (mm)
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)
BIO17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
BIO18	Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)
BIO19	Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)

Fuente: (Rivera *et al.*, 2021)

#### 4.7 Aplicaciones de los modelos de distribución

Las posibilidades de aplicación de los modelos de distribución son numerosas y constantemente surgen nuevas ideas y proyectos, algunas de ellas son: Patrones de riqueza de especie como el realizado por Wohlgemuth en el (2008), distribución potencial/ecosistemas (Cartaya *et al.*, 2016; Felicísimo *et al.*, 2004; Manuel y Barredo, 2016; Reguerin, 2012), la distribución de refugio de especies del pasado (Médail y Diadema, 2009), efectos del cambio climático (Muñoz , 2010), biogeografía y modelos de distribución de especies (Castro, 2020), reintroducción de especies amenazadas (Williams *et al.*, 2009), modelos de nicho ecológico (Navarrete, 2019), Estudios de conservación (Rodríguez *et al.*, 2007).

#### 4.8 Evaluación de modelos de distribución de especies

La evaluación y la validación caracterizan la fiabilidad de los resultados del modelo y no definen si son correctos o incorrectos (Allouche *et al.*, 2006). La forma correcta de evaluar el rendimiento de un modelo es disponer de un conjunto de datos de presencia que sea independiente de los datos utilizados para calibración del modelo, pero esto es difícil debido a los limitados datos de presencia, para resolver esto es mediante la partición del conjunto de datos en dos sets uno de calibración y otro de evaluación (Guisan y Zimmermann, 2000).

La forma más básica de evaluar un modelo es crear una matriz de confusión o error que compare las ausencias y presencias predichas con las ausencias y presencias reales. Esto permite calcular indicadores para evaluar el modelo, como la sensibilidad (porcentaje de resultados positivos verdaderos predichos correctamente) y la especificidad (porcentaje de resultados negativos verdaderos predichos correctamente) (Hirzel *et al.*, 2006).

Otra forma de medir la precisión de los modelos es, donde un modelo es un mapa con valores continuos de probabilidad de presencias para poder reclasificar el mapa con valores continuos, basados en un valor de corte o umbral determinado para analizar como los puntos conocidos de presencias se distribuyen en el nuevo mapa reclasificado de forma binaria, en donde

los valores sobre el umbral determinado se estima como presencia y los valores bajos como ausencias en la entidad de estudio (Pliscoff y Fuentes, 2011).

Existen análisis estadísticos para la evaluación de precisión de los modelos denominados umbral-independiente que sobre el mapa de valores continuos sin necesidad de calcular un valor de corte o umbral (Manel et al., 2001). Como ejemplo tenemos el ROC (Receiver Operating Characteristic curve), es un método gráfico que representa la relación entre la fracción de Falso Positivo (1-Especificidad) y Sensitividad, en el cual no es necesario definir un umbral de probabilidad (Neder, 2016).

El TSS (True Skill Statistics) también conocido como el discriminante de Hanssen-Kuipers es utilizado cuando las predicciones de los modelos son expresadas como presencia-ausencia porque permite la comparación del número de datos correctos menos aquellos obtenidos al azar. Se define como  $TSS = \text{Sensitividad} + \text{Especificidad} - 1$ , los rangos van de -1 a 1, donde 1 indica una perfecta correlación y valores de 0 o menores están asociados al azar (Neder, 2016).

La sensibilidad se asocia a los sitios positivos correspondientes al sitio en el que está presente la muestra, lo mismo se aplica a la especificidad, pero en el que se debe tener en cuenta los lugares ausentes. Los falsos positivos son sitios que se predijeron como positivo porque está por encima del umbral de probabilidad de ocurrencia, pero en él se observa ausencia, mientras que los falsos negativos son los sitios en los que se detecta la presencia del elemento de estudio, aunque esté por debajo del valor umbral de probabilidad (Neder, 2016).

## **4.9 Características generales de la especie *Inga Insignis***

### **4.9.1 *Inga Insignis* (Guaba)**

La *Inga Insignis* es una plata endémica de los andes ecuatorianos, pertenece a la familia Mimosoideae de las leguminosas, puede alcanzar los 12 m de altura, de flores blancas, que produce una fruta en vaina de color verde oscuro, dentro se encuentra el fruto de color blanco. Sus hojas son de color verde que forma un follaje denso (García y Ñauta, 2016). Crece en altitudes de 1500-3000 m.s.n.m, florece y fructifica en zonas templadas con temperaturas entre 8°C y 25°C, y puede tolerar periodos prolongados sin precipitaciones (Pennington et al., 1997). La precipitación en donde se desarrolla la especie está asociado a los sistemas agroforestales que se desarrollan en el piso florísticos pie montano (franja del café) donde la precipitación anual es de 900-1700 mm, pero también se encuentra en valles secos donde la precipitación anual es de 850 mm o menos

(Aguirre y Aguirre, 2021; Quintana *et al.*, 2017). Se estima que la vida útil de una planta es de 20 años, esta especie ha sido reducida notablemente por la actividad humana por lo que es importante su conservación (Sousa, 2008; Villamar y Analía, 2015).

#### 4.9.2 Clasificación taxonómica

**Tabla 2.**

Clasificación taxonómica

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Subfamilia	Mimosoideae
Tribu	Ingeae
Genero	Inga
Especie	Insignis

Fuente:(Villamar y Analía, 2015)

#### 4.9.3 Suelos

La planta es adaptable a diversos tipos de suelos, teniendo un mejor desarrollo en terrenos no inundables, con un pH mínimo de 5 la planta soporta el hidromorfismo y periodos largos de sequía. Los lugares con poca precipitación no son capaces de mantener la especie (Villamar y Analía, 2015).

#### 4.9.4 Propagación de la semilla

La propagación de la especie se realiza mediante la semilla que posee el 90 % de eficiencia de germinación, pero al clasificarse como semilla recalcitrante pierde su viabilidad muy rápidamente y esta no tolera el secado. La germinación se da a los tres días si no se ha cosechado el fruto y alcanza el máximo a los trece días, siendo trasplantadas cuando las plantas alcanzan una altura entre los 40 a 60 cm para su posterior uso como sombra para las plantaciones de café (Villamar, 2014).

#### 4.9.5 Importancia de la especie

Al ser una especie nativa de los andes ecuatorianos su conservación es trascendental (García y Ñauta, 2016). Es importante recalcar que además de ser utilizada en los sistemas

agroforestales, ésta también da sombra y sostén a varias aves, produce hojarasca que se transforma en humus para mantener la fertilidad de los suelos y las hojas sirven para aliviar dolores estomacales y anormalidades del aparato digestivo (Aguirre *et al.*, 2015).

**Figura 2.**

Plántula de Inga Insignis. b. Fruto de Inga Insignis, c. Flor de Inga Insignis.

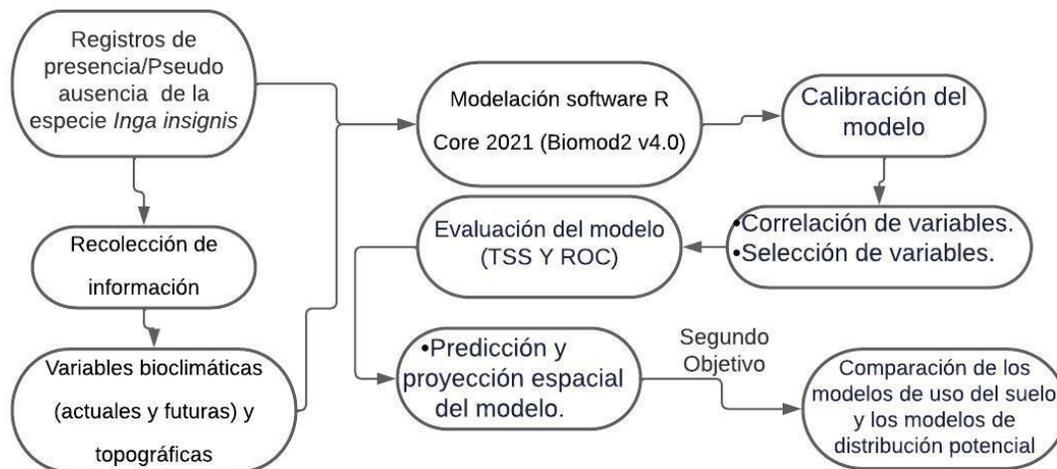


Fuente:(García y Ñauta, 2016).

## 5 Metodología

**Figura 3.**

Flujograma de la modelación bajo escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0, actual y futuro para los años 2030, 2050 y 2080 de la especie *Inga insignis* en la RSE



Fuente: El autor

Este estudio tiene un enfoque correlacional por lo que se analizó la relación de las variables climáticas, topográficas con los datos de presencia y ausencia de la especie *Inga insignis*. Las observaciones de presencia de la especie se obtuvieron del geoportal Web GBIF (<https://www.gbif.org/>) y registros en investigaciones previas. Tras revisar la información de ocurrencia, incluyendo el año de observación y las coordenadas geográficas se procedió al modelamiento de distribución potencial de la especie en la RSE para el presente y para los años 2030, 250 y 2080 bajo los escenarios climáticos RCP 4,5 y 6,0.

El modelamiento se lo realizó mediante el uso de la librería Biomod2 v4.0 implementado en el software R Core Team 2021 (Wilfried et al., 2022). Para posterior evaluación de la distribución potencial de la especie *Inga insignis*, en términos de pérdida y ganancia de superficie en la RSE. Además, se compararon los modelos de uso del suelo y de distribución potencial para examinar la dinámica del uso del suelo y los impactos potenciales sobre la distribución de la especie *Inga insignis*, estudiado bajo diferentes dinámicas espaciales y temporales y escenarios de cambio climático.

## 5.1 Área de estudio

El área de estudio para el desarrollo de la presente investigación se centró en la región 7 del Ecuador, también denominada región sur del Ecuador (RSE) conformada por las provincias de Loja, Zamora Chinchipe y El Oro (Figura 4), con una superficie aproximada 27414.70 km<sup>2</sup> que representa el 11% de la superficie del Ecuador (Quezada, 2017).

La región sur está situada en las coordenadas geográficas, Latitud: 03°02'41''S y 4°17'10'' S y longitud: 78°23'53'' W y 80°29'03'' W, limitando al norte con las provincias del Azuay, el Guayas y Morona Santiago al sur y al este con la República del Perú y al Oeste con el Océano Pacífico. Posee un rango altitudinal que va desde los 0 a 3800 m.s.n.m, la temperatura promedio anual varía entre 3° C (hacia la cordillera de los Andes) y 26° C (en tierras bajas) y la precipitación anual esta entre 37 mm y 6000 mm (Aguirre *et al.*, 2015).

De acuerdo a la clasificación de Pourrut los tipos de climas presentes en la RSE de forma general son: a) Clima megatérmico seco a semihúmedo, b) Clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo a húmedo y c) Clima tropical mega térmico muy húmedo (Samaniego *et al.*, 2015). Como parte de la RSE se puede observar diversos usos del suelo (Tabla 3), los cuales proporcionan información del estado en que se encuentran la cobertura y el uso del suelo.

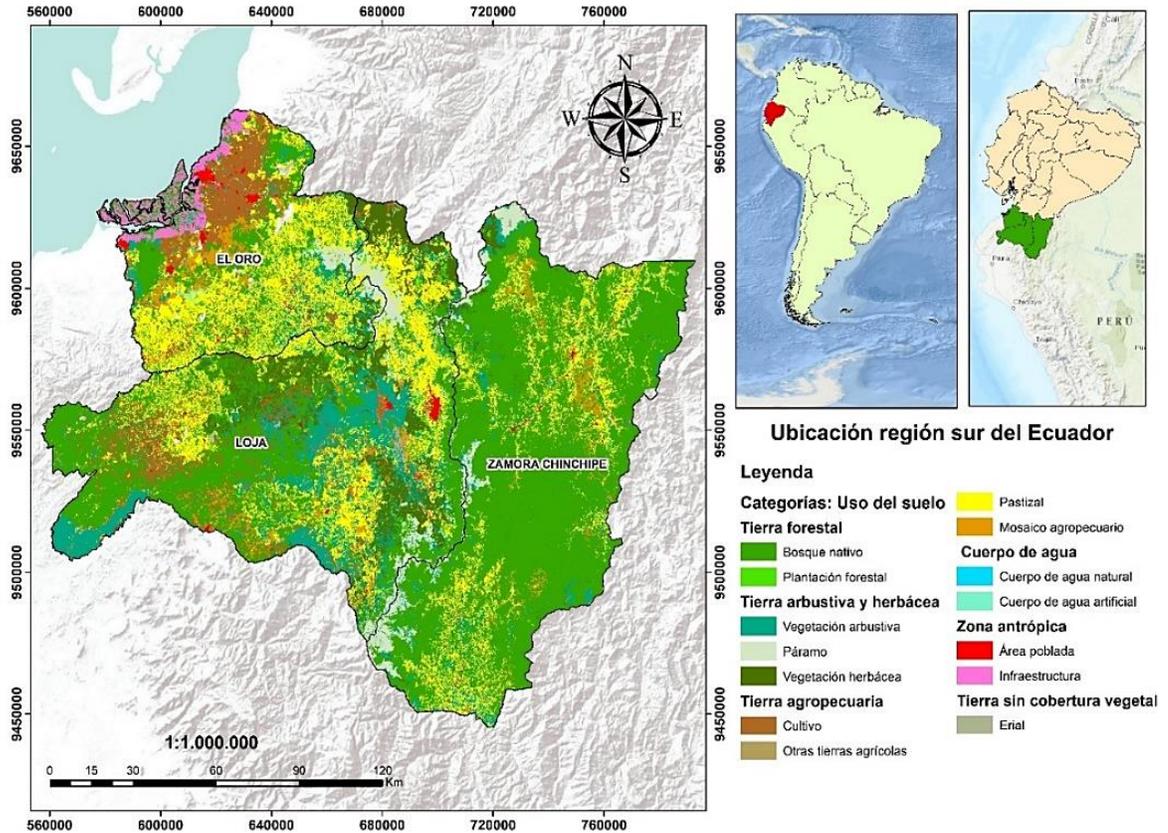
**Tabla 3.**  
Categorías de uso actual del suelo en la Región Sur del Ecuador

Categorías: Uso de suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Área poblada	182.47	0.67
Bosque nativo	12490.05	45.56
Cuerpo de agua artificial	17.75	0.06
Cuerpo de agua natural	145.36	0.53
Cultivo	1669.26	6.09
Erial	119.43	0.44
Información no disponible	89.91	0.33
Infraestructura	390.25	1.42
Mosaico agropecuario	1029.41	3.75
Otras tierras agrícolas	32.68	0.12
Paramo	998.89	3.64
Pastizal	5364.21	19.57
Plantación forestal	158.86	0.58
Vegetación arbustiva	3028.16	11.05
Vegetación herbácea	1698.00	6.19
Total	27414.70	100

Fuente: (Geo Portal del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, n.d.)

**Figura 4.**

Mapa de ubicación Región Sur del Ecuador – Categoría uso de suelo 2020



Fuente:(Geo Portal del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, n.d.)

## 5.2 Modelamiento de la distribución potencial de la especie *Inga insignis* (Guaba)

Para el modelamiento del área de distribución potencial de la especie *Inga insignis* en la Región Sur del Ecuador (RSE) se utilizó la librería Biomod2 v4.0, instalado en el software de desarrollo integrado del lenguaje de programación R Core Team 2021, para simular la distribución actual y potencial futura de la especie en los años 2030, 2050 y 2080 bajo distintos escenarios climáticos (RCP 4.5,6.0). El paquete Biomod2 v4.0 es capaz de realizar hasta 10 modelos individuales (Tabla 4) coherentes para datos de presencia/pseudo-ausencia y combinarlos en modelos y predicciones de conjuntos (Wilfried *et al.*, 2022).

### **5.2.1 Datos de presencia y pseudo-ausencia de la especie**

Los datos de presencia de la especie *Inga insignis*, corresponde a la base de datos del geo portal web GBIF (<https://www.gbif.org/>) y registros de fuentes de información secundaria (tesis, artículos científicos, manuales), los cuales fueron sometidos un proceso de depuración dejando solo registros de presencia de la especie *Inga insignis*, que se encuentren dentro de Ecuador y Perú (se amplió el área de estudio para obtener una mejor calibración y evaluación del modelo).

Posteriormente se utilizó el software de información geográfica (QGIS) para excluir los puntos de presencia cercanos entre sí, dejando solo las presencias situadas a una distancia de un kilómetro y se utilizó la herramienta Create Random to Point para generar pseudo\_ausencias de la especie, obteniendo un total de 10000 puntos.

### **5.2.2 Variables bioclimáticas y Topográficas**

Pliscoff y Fuentes, (2011) afirma que “La selección de las variables bioclimáticas adecuadas y que aporten la información más relevante de la entidad natural analizada es el paso más crítico antes de la aplicación de las técnicas de modelación, puesto que el resultado final está totalmente determinado por esta selección”.

Para la investigación se utilizaron las 19 variables bioclimáticas (Tabla 1), disponibles en CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), (<http://www.ccafs-climate.org/>), estas variables son biológicamente significativas porque actúan como factores limitantes que explican los patrones de biodiversidad y que afectan directamente en la distribución, porque no sólo refleja las precipitaciones y la temperatura, sino también las fluctuaciones a lo largo del año (García, 2008). También se consideró las variables topográficas como elevación, pendiente y aspect a una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> extraídas de un modelo de elevación (DEM) de la RSE.

### **5.2.3 Calibración del modelo**

La calibración es un análisis estadístico para determinar la idoneidad del modelo que posteriormente se proyectará en el espacio geográfico (Pliscoff y Fuentes, 2011). Para el despliegue de la librería biomod2 se utilizó el software R Core Team 2021 cargando la base de datos en formato CVS (delimitado por comas) que contiene los registros de presencia y pseudoausencia de la especie *Inga insignis*, seguido de las variables bioclimáticas y topográficas,

a las que se le realizó el análisis de correlación de Pearson e inflación de varianza (VIF), para la selección de variables.

Utilizando biomod2 la modelación se llevó a cabo mediante 10 técnicas diferentes (Tabla 4), para obtener modelos más robustos y de mejor calidad al momento de realizar los ensambles finales. Por último, se utilizó la prueba Jackknife para determinar la contribución individual de cada variable en el modelo de distribución.

**Tabla 4.**

Técnicas de modelación presentes en Biomod2.

<b>Técnicas de modelación presentes en Biomod2</b>	
<b>Técnica</b>	<b>Nombre</b>
ANN	Artificial Neural Networks
SER	Surface Range Envelop or usually called BIOCLIM
CTA	Classification Tree Analysis
FDA	Flexible Discriminant Analysis
GAM	Generalized Additive Models
GBM	Generalized Boosting Model or usually called Boosted Regression Trees
GLM	Generalized Lineal Models
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines
MAXENT PHILLIPS	Maximum Entropy
RF	Random Forest

Fuente: (Wilfried *et al.*, 2022).

#### 5.2.4 Evaluación del modelo

Se utilizaron dos métodos de evaluación, ROC y TSS, para valorar la calidad de cada modelo durante la fase de simulación, utilizándose el 70% del conjunto total de datos de presencia para la calibración y el 30% para la evaluación del modelo. Se consideró que los resultados de ROC y TSS, de los modelos debían superar el valor de 0.8 para determinar la calidad del modelo como bueno y los que no superaban este umbral, se descartaron (Tabla 5).

El método estadístico ROC (Receiver Operating Characteristics) o también conocido como área bajo la curva (AUC), permite el cálculo de la sensibilidad y especificidad de los valores de presencia de la especie (Yáñez-Cajo *et al.*, 2015). La curva ROC se obtiene trazando la proporción de falsos positivos (1 - especificidad) en el eje X y la proporción de verdaderos positivos (sensibilidad) en el eje Y, y comparando la proporción de falsos y verdaderos positivos, los dos ejes contienen valores entre 0 y 1 (Plisoff y Fuentes, 2011). Donde valores de 0.5 indica que las predicciones del modelo no difieren de la predicción completamente al azar y 1 corresponde con la predicción perfecta (Tabla 5). El índice estadístico TSS (True Skill Statistics), representa la sensibilidad + especificidad - 1, y varía de -1 a +1 (Allouche *et al.*, 2006; Villegas, 2019).

**Tabla 5.**  
Índices de clasificación para predecir la exactitud del modelo

Precisión	AUC	TSS
Excelente o alto	0.9-1	0.8-1
Bueno	0.8-0.9	0.6-0.8
Justo	0.7-0.8	0.4-0.6
Pobre	0.6-0.7	0.2-0.4
Fallido o nulo	0.5-0.6	0-0.2

Fuente: (Neder, 2016)

### 5.3 Predicciones del modelo y proyecciones

La última etapa del modelamiento de distribución de especie consiste en evaluar el rendimiento del modelo y proyectar el modelo calibrado y evaluado en un espacio geográfico (Pliscoff y Fuentes, 2011). Para ello se implementó un umbral específico para evaluar los modelos donde los valores por debajo del umbral se identificaron como ausencia y los valores por encima del umbral como presencia de la especie. A continuación, se realizó el ensamblaje de los modelos lo que permitió la obtención de resultados más robustos. Las proyecciones de la distribución potencial de la especie *Inga insignis* (Guaba), bajos los escenarios climáticos RCP 4.5 Y 6.0 para los años 2030,2050 y 2080, permitió evaluar hasta qué punto la especie podría desarrollarse o restringirse en un futuro próximo.

### 5.4 Definición de las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie por comparación entre los modelos actuales y futuros

Para la definición de las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie *Inga Insignis*, se realizó mediante la información obtenida del modelamiento de la especie y la información geográfica de cobertura terrestre basados en Plant Functional Type (PFT) que se obtuvo del geo portal web Geo simulación (<http://www.geosimulation.cn/Global-SSP-RCP-LUCC-Product.html>), esta información es una proyección terrestre global del 2015 al 2100, adaptada a los escenarios socioeconómicos y de cambio climático del IPCC y del SSP-RCP, con una resolución de 1 km y cubriendo 20 tipos de cobertura terrestre (Chen *et al.*, 2022).

Se utilizó un software de procesamiento geográfico para clasificar los 20 tipos de cobertura de suelo en tres categorías para los años 2030, 2050 y 2080 según los escenarios RCP 4.5 y 6.0 (Tabla 6). La información se utilizó para cuantificar el área de distribución potencial de la especie *Inga insignis*, teniendo en cuenta la superficie que abarca el uso del suelo antrópico de influencia.

**Tabla 6.**

Clasificación del uso del suelo

Clasificación de uso del suelo	Categorías
Árbol de hoja ancha perenne, tropical (Broadleaf evergreen tree, tropical)	Natural
Árbol de hoja ancha perenne, templado (Broadleaf evergreen tree, temperate)	
Árbol caducifolio de hoja ancha, tropical (Broadleaf deciduous tree, tropical)	
Árbol caducifolio de hoja ancha, templado (Broadleaf deciduous tree, temperate)	
Árbol caducifolio de hoja ancha, boreal (Broadleaf deciduous tree, boreal)	
Árbol de hoja perenne, templado (Needleleaf evergreen tree, temperate)	
Árbol de hoja perenne, boreal (Needleleaf evergreen tree, boreal)	
Árbol caducifolio de hoja fina (Needleleaf deciduous tree)	
Arbusto de hoja ancha perenne, templado (Broadleaf evergreen shrub, temperate)	
Arbusto caducifolio de hoja ancha, templado (Broadleaf deciduous shrub, temperate)	
Arbusto caducifolio de hoja ancha, boreal (Broadleaf deciduous shrub, boreal)	
Hierba C3, ártica (C3 grass, arctic)	Antrópico de no influencia
Hierba C3 (C3 grass)	
Hierba C4 (C4 grass)	
Hierba mixta C3/C4 (Mixed C3/C4 grass)	
Cultivos (Cropland)	Antrópico de influencia
Suelo desnudo o Barrena (Barren)	
Urbano (Urban)	
Agua (Water)	
Nieve y hielo permanentes (Permanent snow and ice)	

Fuente: (Chen et al., 2022).

## 5.5 Análisis estadístico

De las variables bioclimas y topográficas empleadas no todas son adecuadas para una modelación óptima siendo unas de más utilidad para una especie que para otras, por tanto, es necesario filtrarlas estadísticamente para garantizar que los resultados puedan utilizarse (Macías, 2016). Para ello se realizó un análisis de correlación de Pearson e inflación de varianza (VIF), que se encuentran implementado en las librerías “corrplot” y “usdm” que permitió seleccionar las variables, evitar la multicolinealidad y el sobreajuste del modelo.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson por par de variables considerando un umbral de 0,7 donde se excluyeron las variables con correlación superior a este umbral para evitar la multicolinealidad (Feng *et al.*, 2019). A continuación, se realizó un análisis del factor de inflación de la varianza (VIF) para eliminar variables que pudieran ser el resultado de regresiones de otras variables. Las variables con un valor VIF >5 se eliminaron progresivamente hasta lograr un VIF menor a 5 en todas las variables (Navarrete, 2019).

## 6 Resultados

### 6.1 Modelar la distribución espacial potencial futura de la especie *Inga insignis* en la Región Sur del Ecuador (RSE).

Para lograr el primer objetivo, se obtuvieron un total de 76 puntos de presencia de la especie *Inga insignis* los cuales fueron obtenidos del portal web GBIF y de investigaciones previas.

Para las variables bioclimáticas y topográficas utilizadas se realizó el análisis de correlación de Pearson por pares de variables e inflación de varianza (VIF), para eliminar la multicolinealidad y el sobre ajuste de los modelos. En el análisis de correlación de Pearson se excluyeron las variables que estaban por encima del umbral de 0.7 (Anexo 2), y en el análisis de inflación de varianza (VIF) el valor debía ser  $VIF < 10$  en un primer análisis y  $VIF < 5$  en un segundo análisis. Los resultados de estos análisis indicaron que hay un total de 9 variables a considerar para el modelamiento (Tabla 7).

**Tabla 7.**

Análisis VIF de las variables a considerar

Variables	VIF	Categorías:
1 Bio 2 (Rango medio diurno)	1.88742	
2 Bio 3 (Isotermalidad)	3.015327	
3 Bio 4 (Estacionalidad de la temperatura)	3.937318	
4 Bio 9 (Temperatura media del mes más seco)	1.253792	Bioclimáticas
5 Bio 15 (Estacionalidad de la precipitación)	4.324476	
6 Bio 18 (Precipitación del trimestre más cálido)	2.078446	
7 Bio 19 (Precipitación del trimestre más frío)	1.955098	
8 Hillshade (Sombreado)	1.058761	
9 Slope (Pendiente)	1.324524	Topográficas

Fuente: El autor

Los resultados de evaluación de la capacidad predictiva de las técnicas de modelación (Tabla 8) muestran que los modelos producidos se consideran excelentes en su calidad predictiva con valores superiores a 0.8 para TSS y valores ROC superiores a 0.9. Por lo tanto, es probable que los resultados del modelo para la distribución potencial de *Inga insignis* se ajusten a la realidad.

**Tabla 8.**

Evaluación de las técnicas de modelación con los test True Skill Statistic (TSS) y Receiver Operatic Characteristic (ROC)

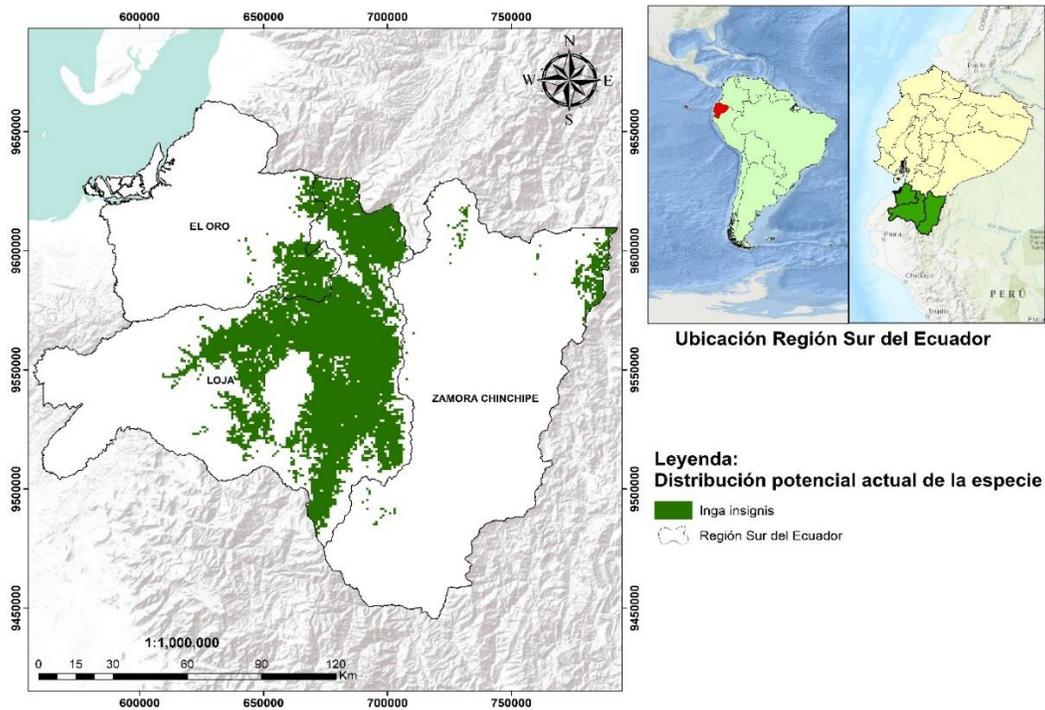
Modelo	TSS	ROC
GLM	0.932	0.985
GBM	0.969	0.993
CTA	0.838	0.913
FDA	0.824	0.966
MARS	0.945	0.985
RF	0.881	0.977

Fuente: El autor

El área de distribución potencial actual de la especie *Inga insignis*, en la región sur del Ecuador (Figura 5) es de aproximadamente 577914.5393 ha, que representa el 21.0.8% de la superficie total de la RSE. Siendo la provincia de Loja la que obtuvo mayor superficie de área potencial de distribución actual con ~499137.4376 ha (86.37%), seguido por la provincia del Oro con ~52773.65927 ha (9.13%) y Zamora con 26003.4424 ha (4.50%).

**Figura 5.**

Distribución potencial actual de la especie Inga Insignis



Fuente: El autor

La modelización de la distribución potencial futura de la especie *Inga Insignis*, mostró una tendencia a la expansión del área bajo los escenarios climáticos 4, 5 y 6.0 para los años 2030, 2050

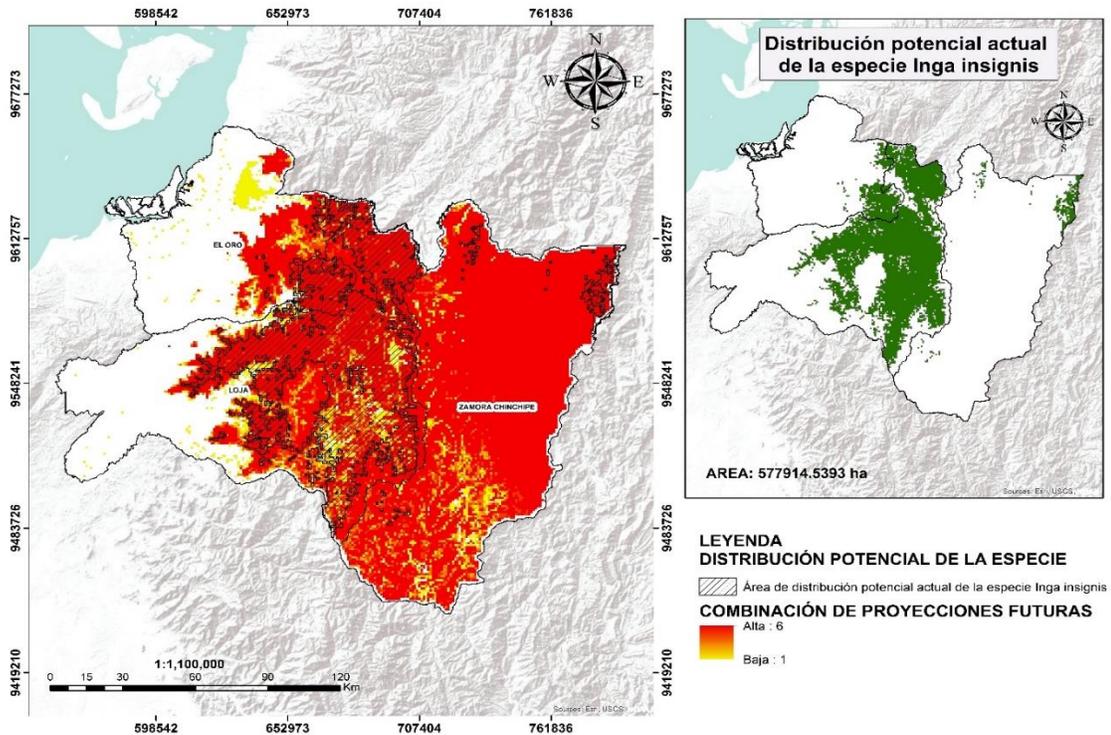
y 2080 en comparación con la distribución potencial actual (Tabla 9), con la especie principalmente redistribuida a nuevas áreas de la RSE. (Figura 6).

**Tabla 9.**  
Superficie actual y futura de la especie *Inga insignis* en la RSE

Escenario	Distribución potencial	
	ha	%
Actual	577914.54	21.08
2030 RCP 4.5	1800235.79	65.67
2030 RCP 6.0	1800818.84	65.69
2050 RCP 4.5	1830481.33	66.77
2050 RCP 6.0	1728956.19	63.07
2080 RCP 4.5	1770888.36	64.60
2080 RCP 6.0	1733050.74	63.22

Fuente: El autor

**Figura 6.**  
Distribución potencial de la especie *Inga insignis* bajos los escenarios RCP 4.5 Y 6.0 para los años 2030, 2050 y 2080 en la RSE



Fuente: El autor

La distribución potencial de la especie *Inga insignis* (Guaba), en el 2030 bajo el escenario climático RCP 4.5 (Anexo 5) en función al área potencial de distribución actual muestra una probabilidad de pérdida de ~-73423.48 ha (12.70%), con una persistencia de ~506224.31 ha (87.60%) y un aumento de la superficie de 1294126.92 ha (223.93%). En el escenario RCP 6.0 la

distribución potencial para 2030 (Anexo 6), tiene una probabilidad de pérdida es ~-72999.92 ha (12.63%), con una persistencia de ~506692.59 ha (87.68%) y un aumento de superficie de ~1312743.14 ha (223.99%).

En el escenario climático RCP 4.5, la distribución potencial para el 2050 (Anexo 7) en comparación con el área de distribución potencial actual de la especie muestra una probabilidad de pérdida de superficie de ~-61917.11 ha (10.71%) y una persistencia de ~ 517749.09 ha (89.59%) con una ganancia de superficie de ~1312743.14 ha (227.15 %). En el escenario climático RCP 6.0 la distribución potencial en 2050 (Anexo 8) es que probablemente se pierda un área de ~-86894.80 ha (15.04%), con una persistencia de ~ 492746.08 ha (85.26%) y un aumento de área de ~1236591.57 ha (213.97%).

Para el año 2080 la distribución potencial de la especie según el escenario climático RCP 4.5 (Anexo 9) en comparación con la distribución potencial actual dio una probabilidad de pérdida de ~-78461.79 ha (13.58%), persistencia de ~501210.60 ha (86.73%) y un aumento de superficie de ~1269572.77 ha (219.68%). En cambio, en el escenario climático RCP 6.0 (Anexo 10) muestra una pérdida de ~-92351.54 ha (15.98%), persistencias de ~ 487304.89 ha (84.32%) y una ganancia de superficie de 1246034.49 ha (215.61%).

**Tabla 10.**

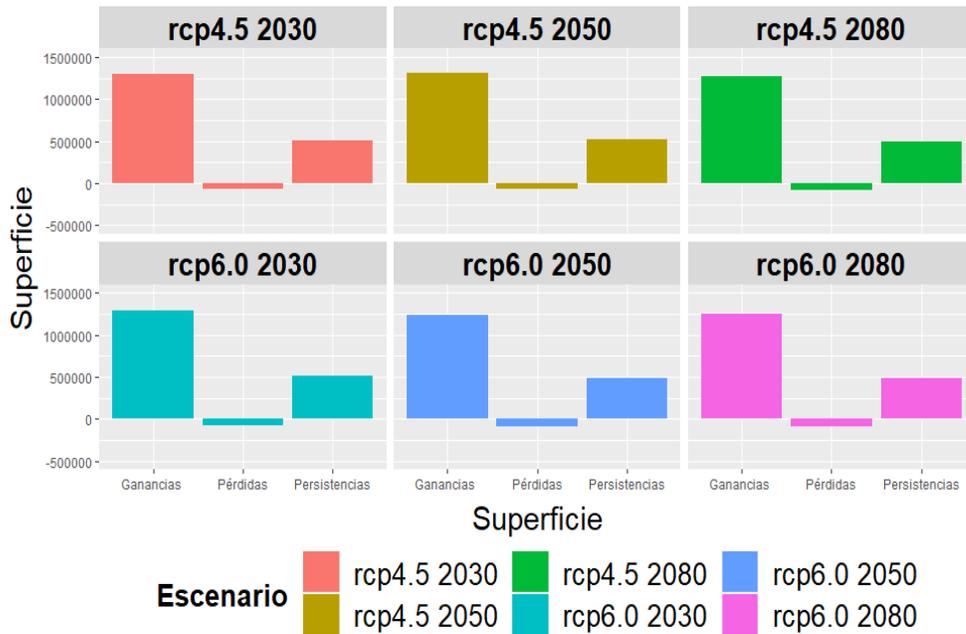
Ganancias, pérdidas y persistencias de la distribución potencial futura de la especie *Inga insignis* para los años 2030,2050 y 2080 en el RSE

Escenario	Área (ha)	Área (%)	Descripción
RCP45_2030	-73423.48	12.70	Pérdidas
	506224.31	87.60	Persistencia
	1294126.92	223.93	Ganancias
RCP6_2030	-72999.92	12.63	Pérdidas
	506692.59	87.68	Persistencia
	1294494.11	223.99	Ganancias
RCP45_2050	-61917.11	10.71	Pérdidas
	517749.09	89.59	Persistencia
	1312743.14	227.15	Ganancias
RCP6_2050	-86894.80	15.04	Pérdidas
	492746.08	85.26	Persistencia
	1236591.57	213.97	Ganancias
RCP45_2080	-78461.79	13.58	Pérdidas
	501210.60	86.73	Persistencia
	1269572.77	219.68	Ganancias
RCP6_2080	-92351.54	15.98	Pérdidas
	487304.89	84.32	Persistencia
	1246034.49	215.61	Ganancias

Fuente: El autor

**Figura 7.**

Distribución potencial de la especie *Inga insignis* asociada a la su superficie



Fuente: El autor

La Tabla 11 muestran los rangos de temperatura media anual, precipitación anual (mm) y el rango de elevación bajo los escenarios futuros donde es probable que la especie *Inga insignis*, se distribuya. Donde se puede observar que hay cambios en los rangos de temperatura, precipitación y elevación porque la especie registra grandes ganancias de área bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0 para los años 2030, 2050 y 2080.

**Tabla 11.**

Rangos de aspectos bioclimáticos según los escenarios donde se distribuye la especie *Inga insignis*.

Escenario	Descripción		
	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (m. s.n.m)
Actual	23.6-9.1	3438.1-668.5	3333-643
2030 RCP 4.5	26.6-8.3	3114-608.6	3773-9
2030 RCP 6.0	26.5-8.2	3120-545	3773-1
2050 RCP 4.5	26.9-8.7	3139-598.6	3773-2
2050 RCP 6.0	26.7-8.5	3171.6-659	3773-1
2080 RCP 4.5	26.3-9.2	3185.6-631.3	3732-141
2080 RCP 6.0	27.3-9.2	3196.3-767	3773-14

Fuente: El autor

## 6.2 Definición de las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie por comparación entre los modelos actuales y futuros

Excluyendo el cambio de uso de suelo antrópico de influencia, la distribución potencial de la especie *Inga insignis*, en la región sur del Ecuador es de ~571483.19 ha, que es menos del 0,23% del área modelada de distribución actual. La provincia de Loja tiene la mayor área potencial con ~492706.09 ha (86.22), seguida por la provincia del Oro con ~52773.66 ha (9.23%) y la provincia de Zamora con ~26003.44 ha (4.55%). La provincia de Loja fue la más afectada al mermar el uso de suelo antrópico de influencia dentro de su área.

La distribución de la especie *Inga insignis*, excluyendo el uso de suelo antrópico de influencia bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 6.0 en el 2030, 2050 y 2080 en la región sur del Ecuador no sufre una reducción significativa de área en comparación con la distribución potencial (Tabla 12). Los porcentajes están en función de la superficie total de la RSE, en donde la provincia de Zamora Chinchipe (Figura 6) es la que posee la mayor área potencial de distribución bajo los escenarios de cambio climático 4.5 y 6.0 para 2030, 2050 y 2080.

**Tabla 12.**

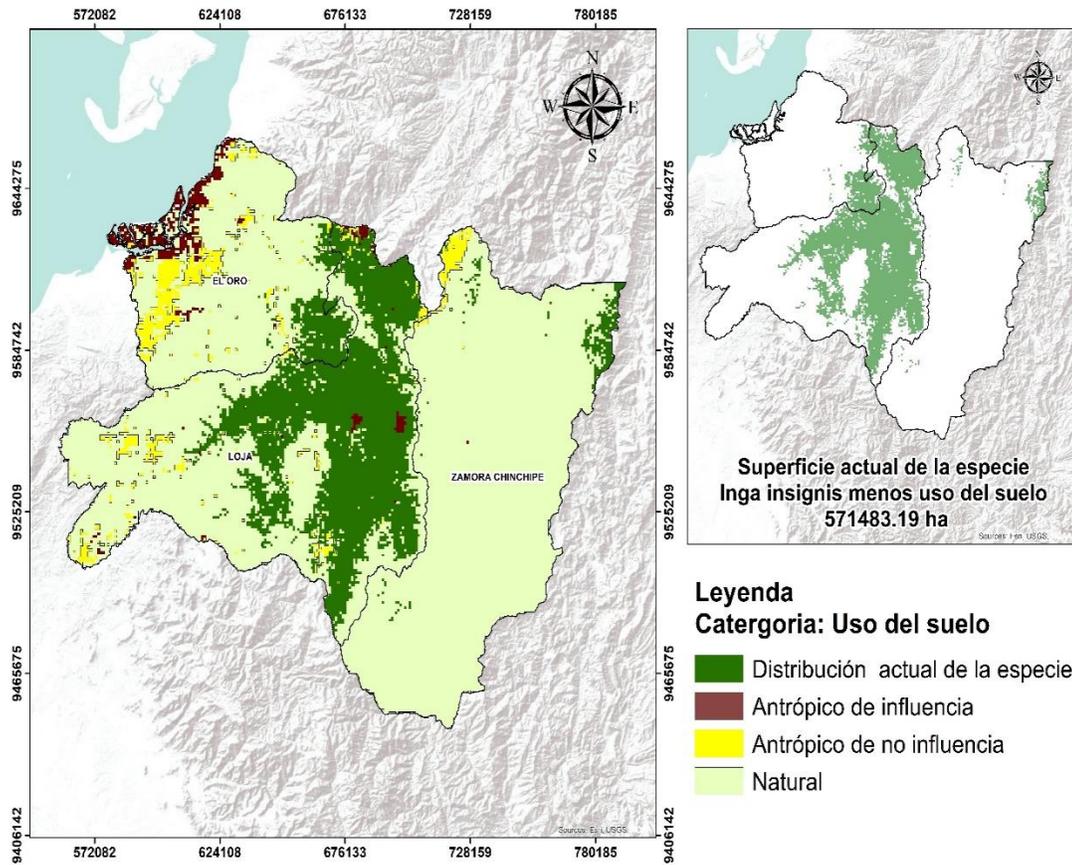
Distribución Potencial actual y futuras menos uso del suelo de la especie *Inga insignis*

Escenario	Distribución potencial		Distribución potencial menos uso del suelo	
	ha	%	ha	%
Actual	577914.54	21.08	571483.19	20.85
2030 RCP 4.5	1800235.79	65.67	1796901.88	65.55
2030 RCP 6.0	1800818.84	65.69	1796912.41	65.55
2050 RCP 4.5	1830481.33	66.77	1825479.47	66.59
2050 RCP 6.0	1728956.19	63.07	1724485.82	62.90
2080 RCP 4.5	1770888.36	64.60	1766893.12	64.45
2080 RCP 6.0	1733050.74	63.22	1727599.03	63.02

Fuente: El autor

**Figura 8.**

Distribución actual de la especie *Inga insignis* y el uso de suelo en la RSE



Fuente: El autor

## 7 Discusión

El área de distribución potencial actual de la especie *Inga insignis* en la RSE se encuentra mayormente en la provincia de Loja, seguido por El Oro, y de manera limitada en Zamora Chinchipe (Figura 4), esto concuerda con Pennington et al., (1997) quien manifiesta que la especie es cultivada principalmente en la región sierra en las provincias de Pichincha Tungurahua, Chimborazo, Azuay y Loja, aunque también se cultivan en El Oro y Napo.

El cambio climático afectará a la distribución y composición de los ecosistemas andinos que responderá mediante el desplazamiento, adaptación o extinción local de las especies que lo conforman (Aguirre et al., 2010). La especie *Inga insignis*, que bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0 para los años 2030, 2050 y 2080, muestra tolerancia al cambio climático y gran capacidad de adaptación, especialmente en el sureste de la RSE, donde es más probable que se reproduzca (Figura 6). Esto se corrobora con la investigación realizada por Ortega, (2020) que manifiesta que el género *Inga* se caracteriza por su competitividad y adaptación a una variedad de condiciones ecológicas y un amplio rango altitudinal.

El género *Inga* prefiere los climas húmedos, pero también puede encontrarse a orillas de cursos de agua en climas secos, tolera una amplia gama de condiciones de suelo y puede sobrevivir y crecer en suelos pobres con alta acidez (Alvarado *et al.*, 2020; INAB, 2016). Además, la especie *Inga insignis* crece en tanto en topografía escarpada como llana (Villamar, 2014). En consecuencia, la especie muestra una alta tasa de porcentaje de ganancia de superficie y persistencia en cada uno de los escenarios RCP 4.5 y 6.0 para los años futuros, siendo el escenario RCP 6.0 el que muestra la mayor disminución de área en el 2080 pero de nuevo la ganancia es mayor en el mismo escenario y año. Se puede indagar que los ejemplares dentro de las persistencias se reproducen en las mismas zonas presentes en la distribución potencial actual y continúan en la distribución potencial futura (Anexo 5 al 10).

Según Pennington et al. (1997), el rango de temperatura en el que prospera la especie es entre 8°C a 25°C considerados como zonas templadas y puede tolerar largos periodos sin precipitaciones. En este sentido la especie *Inga insignis* se desarrolla en un rango de temperatura media anual de 9.1°C a 23.6 °C para la distribución actual en la región sur del Ecuador, pero el rango es más amplio en los escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0, que puede oscilar en rangos de 27,3°C a 8,2°C (Tabla 11).

Con respecto a la precipitación la especie crece en el piso florísticos pie montano (franja del café) donde la precipitación anual es de 900 a 1700 mm, pero también se presenta en valles secos con precipitaciones anuales de 850 mm o menos (Aguirre, y Aguirre., 2021; Quintana et al., 2017). Los resultados difieren en términos de precipitación, la especie se desarrolla en el rango de 668,5-3438,1 mm de precipitación anual en la distribución potencial actual, mientras que en los escenarios RCP 4.5 y 6.0 para los años futuros el rango de precipitación anual oscila entre 3196.3 a 545 mm (Tabla 11). Esto se debe a la elevada tasa de incremento de superficie esperada para la especie, especialmente en la provincia de Zamora (Anexo 5 al 10), donde la precipitación anual oscila entre 3000 mm en las regiones próximas a la cordilla y entre 2500 a 3000 en las zonas más orientales (Samaniego *et al.*, 2015).

Pennington et al. (1997) afirma que la especie *Inga insignis*, crece en Ecuador en altitudes comprendidas entre 1500 a 3000 m.s.n.m. Sin embargo, la especie en su distribución actual en la RSE ha presentado altitudes de 643 a 3333 m.s.n.m. y las proyecciones futuras bajo dos escenarios climáticos indican que se desarrollará en diferentes altitudes entre 1 a 3773 m.s.n.m. (Tabla 11), esto es debido a que se espera que la superficie de esta especie aumente en la RSE (Anexo 5 al 10).

Utilizando los escenarios SPP2- RCP 4.5 Y SPP4 RCP 6.0 basados en Plant Functional Type (PFT) para el presente (Figura 7); y para los años 2030, 2050 y 2080 se demostró que la especie se desarrolla principalmente dentro de la cobertura de Árbol de hoja ancha perenne, tropical (Broadleaf evergreen tree, tropical) perteneciente a la categoría de uso del suelo natural. Pennington *et al.* (1997) manifiesta que los árboles del género *Inga*, posee un crecimiento rápido por lo que pueden alcanzar un gran tamaño en poco tiempo por lo que se encuentra en los bosques de tierras bajas tropicales, pero algunas alcanzan las tierras altas de los Andes.

La especie *Inga insignis* prefiere un suelo franco arenoso y bien drenado, pero crecen en casi cualquier tipo de suelo, tolera suelos muy ácidos y pobres además de soporta el hidromorfismo y periodos largos de sequía lo que indica que puede tolerar niveles freáticos altos y anegamientos (Pennington et al., 1997; Villamar et al., 2015). Por lo tanto, el cambio de uso del suelo no altera la distribución actual o futura de la especie en los escenarios SSP2 - RCP 4.5 y SSP4 - RCP 6.0 en su totalidad. Si se resta el uso de suelo antrópico de influencia (Urbano, Agua, Suelo desnudo o Barrena, Nieve y hielo permanentes) de la distribución potencial actual y futura de la especie se

puede denotar que la superficie permanece casi intacta, perdiendo solo un diminuto porcentaje (Tabla 12).

## 8 Conclusiones

- Los resultados muestran que la especie posiblemente tenga una alta tasa de aumento de superficie y persistencia bajo cada escenario climático, destacando el escenario climático RCP 4.5 en el 2050 donde la ganancia es del 227.15 % (~1312743.141 ha), la persistencia del 89.59% (~517749.09 ha) y pérdidas del 12.70% (~61917.113763 ha) con respecto a la distribución actual (Tabla 10).

-El escenario RCP 6.0 en 2080 es donde se presentaría la mayor pérdida de superficie con el 15.98% (~92351.54 ha) pero la ganancia sigue siendo mayor para el mismo escenario y año (Tabla 10).

- Las zonas potenciales de cambio y estabilidad de la especie se definieron comparando los modelos actual y futuro en la RSE bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y 6.0, se determinó que el cambio climático afectará la distribución de la especie, esta se distribuirá principalmente en la provincia de Zamora Chinchipe, Loja y el Oro en los escenarios futuros (Anexos 5 al 10).

-Los resultados muestran que los cambios en el uso del suelo no cambiarán la distribución de la especie en su totalidad. La distribución potencial actual de la especie es de ~ 577914.5393 ha (21.08%) en función a la RSE pero, si se reduce el uso de suelo antrópico (Urbano, Agua, Suelo desnudo o Barrena, Nieve y hielo permanentes) queda una superficie de ~ 571483.19 ha (20.85%) (Tabla12), lo que demuestra que el cambio de uso del suelo no afecta en su mayoría a la distribución potencial debido a la adaptabilidad de la especie al cambio climático, incluso para la distribución futura según los escenarios RCP 4.5 y 6.0, la influencia, del uso de suelo antrópico de influencia reduce el área de distribución potencial de la especie en un porcentaje mínimo (Tabla 12).

-La zona de estabilidad de la especie se encuentra principalmente en la provincia Loja y la de cambio en la provincia de Zamora, el Oro y Loja (Anexo 5 al 10), por lo que se puede esperar un alto porcentaje de ganancia de área en cada uno de los escenarios RCP 4.5 y 6.0 para los años futuros (Tabla 12).

## 9 Recomendaciones

- Dado que un ligero margen de error puede sesgar los resultados, se recomienda utilizar bases de datos sobre la presencia de la especie de geo portales reconocidos a nivel mundial o con datos de registros donde la especie se distribuye naturalmente.

- Se recomienda tener conocimientos previos de software de información geográfica, R Estudio y la biblioteca Biomod 2. Estos conocimientos son esenciales para quienes deseen trabajar con la modelización de especies.

- Si hay problemas con la evaluación de las técnicas de modelización de especie y estas no llegan a un rango adecuado en los métodos ROC y TSS, se puede conseguir una evaluación mejor y más fiable ampliando la zona de estudio en la que se lleva a cabo la detección de presencia.

- Se recomienda continuar las investigaciones sobre esta especie, especialmente en lo que respecta a su distribución, ya que es de gran importancia en los sistemas agroforestales del país, especialmente en la región sur de Ecuador, y es ampliamente utilizada para madera y como planta medicinal.

## 10 Bibliografía

- Aclima. (2020). *Escenarios climáticos, una ventana al futuro del clima terrestre – Aclima*.  
<https://aclima.eus/escenarios-climaticos-una-ventana-al-futuro-del-clima-terrestre/>
- Aguirre Mendoza, Z., Loja Chalan, A. F., Solano Ayala, C., & Mendoza Aguirre, N. (2015).  
*Especies forestales más aprovechadas en la región sur del Ecuador*.  
<https://nikolayaguirre.files.wordpress.com/2011/12/lb-especies-forestales-sur-ecuador-2015.pdf>
- Aguirre, N., & Aguirre, Z. (2021). *Diversidad Florística del sur de Ecuador*.  
<https://www.researchgate.net/publication/349295131>
- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Coronel, V., Samaniego, N., Ojeda Luna, T., & Aguirre, M. Z. (2015). *Vulnerabilidad al cambio climático en la Región Sur del Ecuador: Potenciales impactos en los ecosistemas, producción de biomasa y producción hídrica*.  
[https://www.researchgate.net/publication/298753988\\_Vulnerabilidad\\_al\\_cambio\\_climatico\\_en\\_la\\_Region\\_Sur\\_del\\_Ecuador\\_Potenciales\\_impactos\\_en\\_los\\_ecosistemas\\_produccion\\_de\\_biomasa\\_y\\_produccion\\_hidrica](https://www.researchgate.net/publication/298753988_Vulnerabilidad_al_cambio_climatico_en_la_Region_Sur_del_Ecuador_Potenciales_impactos_en_los_ecosistemas_produccion_de_biomasa_y_produccion_hidrica)
- Aguirre Nikolay, Ojeda Tatiana, & Eguiguren Pail. (2010). El cambio Climático y la conservación de la biodiversidad en el Ecuador. *CEDAMAZ, 1*, 17.  
[https://www.researchgate.net/profile/Diego-Armijos-2/publication/271833091\\_Herpetofauna\\_de\\_un\\_Bosque\\_Humedo\\_Tropical\\_en\\_la\\_Quinta\\_El\\_Padmi\\_del\\_Centro\\_de\\_Estudios\\_y\\_Desarrollo\\_para\\_la\\_Amazonia\\_CEDAMAZ\\_provincia\\_de\\_Zamora\\_Chinchipe/links/54d327760cf28e0697279df5/Herpetofauna-de-un-Bosque-Humedo-Tropical-en-la-Quinta-El-Padmi-del-Centro-de-Estudios-y-Desarrollo-para-la-Amazonia-CEDAMAZ-provincia-de-Zamora-Chinchipe.pdf#page=17](https://www.researchgate.net/profile/Diego-Armijos-2/publication/271833091_Herpetofauna_de_un_Bosque_Humedo_Tropical_en_la_Quinta_El_Padmi_del_Centro_de_Estudios_y_Desarrollo_para_la_Amazonia_CEDAMAZ_provincia_de_Zamora_Chinchipe/links/54d327760cf28e0697279df5/Herpetofauna-de-un-Bosque-Humedo-Tropical-en-la-Quinta-El-Padmi-del-Centro-de-Estudios-y-Desarrollo-para-la-Amazonia-CEDAMAZ-provincia-de-Zamora-Chinchipe.pdf#page=17)
- Alban Cornejo, F. (2015). *Impactos potenciales del Cambio Climático en la biodiversidad de ecosistemas de alta montaña o páramo de Ecuador*.  
<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8747/ALBAN%20FLAVIA%20MONGRAFIA%20MAR%2026%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>

- Alvarado Aguayo, A. A., Carrera Maridueña, B. J., Pilaloe David, W. O., & Carrera Maridueña, D. M. (2020). Desarrollo comparativo de dos especies Inga en base a su potencial agroforestal. *Revista Alfa*, 4(12), 186–199. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.83>
- Araújo, M. B., & Luoto, M. (2007). The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 16(6), 743–753. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00359.x>
- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 22, Issue 1, pp. 42–47). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Araújo, M. B., & Pearson, R. G. (2005). Equilibrium of species' distributions with climate. *Ecography*, 28(5), 693–695. <https://doi.org/10.1111/J.2005.0906-7590.04253.X>
- Becerra López, J. L., Romero Méndez, U., Ramírez Bautista, A., & Becerra López, J. S. (2016). Revisión de las técnicas para el modelado de la distribución de las especies. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 4(1), 176–187. <https://doi.org/10.47808/REVISTABIOAGRO.V4I1.47>
- Benito de Pando, B., & Peñas de Giles, J. (2007). *APLICACIÓN DE MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES A LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD EN EL SURESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA*. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/113/275>
- Briassoulis, H. (2020). *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches Approaches*. <https://researchrepository.wvu.edu/rri-web-book>
- Cartaya, S., Anchundia, C., & Mantuano, R. (2016). *DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA POTENCIAL DE LA ESPECIE Cuniculus Paca EN EL OCCIDENTE DEECUADOR*. <https://doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.11>
- Castro, A. (2020). *Biogeografía y modelos de distribución de especies*. [https://www.researchgate.net/publication/344310835\\_Biogeografia\\_y\\_modelos\\_de\\_distribucion\\_de\\_especies](https://www.researchgate.net/publication/344310835_Biogeografia_y_modelos_de_distribucion_de_especies)
- Centro UC cambio global. (2017). *Glosario - Escenario climático*. <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/escenario-climatico>

- Chen, G., Li, X., & Liu, X. (2022). Global land projection based on plant functional types with a 1-km resolution under socio-climatic scenarios. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01208-6>
- CIIFEN. (2021). *Escenarios y Proyecciones | CIIFEN*. <https://ciifen.org/escenarios-y-proyecciones/>
- Delgado, T., & Suárez-Duque, D. (2009). EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DIVERSIDAD VEGETAL DEL CORREDOR DE CONSERVACIÓN COMUNITARIA RESERVA ECOLÓGICA EL ÁNGEL- BOSQUE PROTECTOR GOLONDRINAS EN EL NORTE DEL ECUADOR. *Ecología Aplicada*, 8(1–2), 27. <https://doi.org/10.21704/rea.v8i1-2.379>
- 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. <https://doi.org/10.1111/J.1472-4642.2010.00725.X>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas). (2016). *Estado mundial del Recurso Suelo : resumen técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
- Felicísimo, A. M., Gómez, A., & Muñoz, J. (2004). *Potential Distribution of Forest Species in Dehesas of Extremadura (Spain)*.
- Feng, X., Park, D. S., Liang, Y., Pandey, R., & Papeş, M. (2019). Collinearity in ecological niche modeling: Confusions and challenges. *Ecology and Evolution*, 9(18), 10365–10376. <https://doi.org/10.1002/ece3.5555>
- Fernández Nuñez, M., & Prados Velasco, M. J. (2010). *Cambios en las coberturas y usos en la cuenca del río Guadalfeo*. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/196>
- García Mateo, M. R. (2008). *Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y Optimización de Métodos de Modelado Ecológico*. [Universidad Complutense de Madrid]. [https://www.researchgate.net/publication/236692213\\_Modelos\\_predictivos\\_de\\_riqueza\\_de\\_diversidad\\_vegetal\\_Comparacion\\_y\\_Optimizacion\\_de\\_Metodos\\_de\\_Modelado\\_Ecologico\\_Madrid\\_Universidad\\_Complutense\\_de\\_Madrid](https://www.researchgate.net/publication/236692213_Modelos_predictivos_de_riqueza_de_diversidad_vegetal_Comparacion_y_Optimizacion_de_Metodos_de_Modelado_Ecologico_Madrid_Universidad_Complutense_de_Madrid)
- García, N. P. (2013). *Inferencia espacial y predicción de la distribución de plantas: un estudio a diferentes escalas Spatial inference and prediction of plant species distribution: a multiscale study*.

[https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/129083/NPG\\_THESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/129083/NPG_THESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- García Pino, K. T., & Ñauta Yandún, A. P. (2016). *Estudio piloto para la recuperación forestal de la franja de amortiguamiento del embalse mazar a través de la inoculación de hormonas de crecimiento*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26233>
- García Pino, K. T., & Ñauta Yandun, A. P. (2016). “ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN FORESTAL DE LA FRANJA DE AMORTIGUAMIENTO DEL EMBALSE MAZAR ATRAVÉS DE LA INOCULACIÓN DE HORMONAS DE CRECIMIENTO.”
- García Riofrio, J. C. (2006). *Especies Forestales Útiles del Bosque Petrificado de Puyango H. Consejo Povoynal de Loja, Mancomunidad del BPP. Loja, Ecuador*. 39 p.
- Geo portal del Ministerio del ambiente, agua y transición ecológica. (n.d.). Retrieved June 22, 2023, from <http://ide.ambiente.gob.ec:8080/mapainteractivo/>
- Gómez Royuela, M. (2016). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector turístico*. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- Grupo de trabajo en parámetros del Ecuador (GTP). (2006). *Investigaciones biofísicas en el Páramo - EcoCiencia*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/14787099/investigaciones-biofísicas-en-el-paramo-ecociencia>
- Guisan, A., Edwards, T. C., & Hastie, T. (2002). *Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00204-1)
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. In *Ecological Modelling* (Vol. 135). [www.elsevier.com/locate/ecolmodel](http://www.elsevier.com/locate/ecolmodel)
- Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, ISSN 0212-9426, ISSN-e 2605-3322, Nº. 78, 2018, Págs. 89-126, 78, 89–126. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6553105>

- Hall, J. M., van Holt, T., Daniels, A. E., Balthazar, V., & Lambin, E. F. (2012). Trade-offs between tree cover, carbon storage and floristic biodiversity in reforesting landscapes. *Landscape Ecology*, 27(8), 1135–1147. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9755-y>
- Hernández Gómez, I. U. (2016). *Evaluación de la transformación del paisaje para la determinación de áreas prioritarias de conservación en la región de Uxpanapa, Veracruz*. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/688657>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hirzel, A. H., le Lay, G., Helfer, V., Randin, C., & Guisan, A. (2006). *Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.017>
- INAB, F. (2016). *Guía técnica de las especies forestales más utilizadas para la producción de leña en Guatemala*. [www.inab.gob.gt](http://www.inab.gob.gt)
- IPCC. (2013). *Glosario IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: 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*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf)
- Isabel, J., & Pérez, J. (2021). *Estudio de los procesos de cambio de uso del suelo en México Fundamentos teóricos y metodológicos*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109937>
- Legislativo, D. (2008). CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. *Registro Oficial*, 449(20), 25–2021. [www.lexis.com.ec](http://www.lexis.com.ec)
- Macías Barredo, J. M. (2016). *DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE ESPECIES LEÑOSAS ALIMENTICIAS EN ÁFRICA PARA LA FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN*. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/40046/1/TFM.pdf>
- Manel, S., Ceri Williams, H., & Ormerod, S. J. (2001). Evaluating presence-absence models in ecology: The need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38(5), 921–931. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2664.2001.00647.X>
- Marcillo, J. L. M., Mesía, M. A., & Osorio, B. G. (2016). Cambio Multitemporal De La Cobertura Vegetal Y Fragmentación En La Reserva Ecológica “Mache- Chindul” Ecuador. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(30), 152. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n30p152>

- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R. K., & Thuiller, W. (2009). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 15(1), 59–69. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x>
- Martínez Candelaria, B., Ruiz Rosado, O., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Martínez Becerra, Á., & Vargas Villami, L. (2011). *Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300004)
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Médail, F., & Diadema, K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*, 36(7), 1333–1345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.02051.x>
- Mejía, D., Tonón, M., & Abad, L. (2018). *Distribución potencial del género Polylepis en la Cuenca del río Paute bajo un escenario de cambio climático*. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2215>
- Muñoz S, A. G. (2010). *Validación y Análisis de Modelos de Cambio Climático para Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Informe-An%C3%A1lisis-de-Consenso.pdf>
- Navarrete Macedo, C. E. (2019). *Distribución Potencial de especies forestales amenazadas y endémicas raras mediante modelos de nicho ecológico* [Universidad Nacional Agraria la Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4038/navarrete-macedo-corina-erika.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Neder, C. (2016). *El bento de Caleta Potter (Antártida): Un meta-análisis usando modelos de distribución de especies*. <https://core.ac.uk/download/pdf/158569057.pdf>
- Nogués Bravo, D., Rodríguez, J., Hortal, J., Batra, P., & Araújo, M. B. (2008). Climate Change, Humans, and the Extinction of the Woolly Mammoth. *PLoS Biol*, 6(4), 79. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060079.g001>
- Ortega Rodríguez, A. S. (2020). *Análisis proximal y evaluación de la actividad antioxidante de semillas de la especie Inga densiflora Benth* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21956>

- Pastrana, O. P. (2011). *ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DE SUELO MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA EN EL MUNICIPIO DE VALLE DE SANTIAGO* [CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA ING. JORGE L. TAMAYO, A.C. CentroGeo]. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/41/1/21-2011-Tesis-Pineda%20Pastrana%2C%20Oliva-Maestra%20en%20Geom%C3%A1tica.pdf>
- Peña Villalta, E. F. (2018). *Análisis multitemporal para la detección de cambios de uso del suelo, en el cantón Catamayo, provincia de Loja*. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/20290>
- Pennington, T. D., Revelo, N., Linklater, Ruth., & Wise, R. (1997). *El género Inga en el Ecuador: morfología, distribución y usos*. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Phillips, S. B., Aneja, V. P., Kang, D., & Arya, S. P. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2005.03.026>
- Pinta Sarango, F. (2015). *Sistemas Agroforestales Potencialidades para el caso del Ecuador*. <http://revelaaustria.com/sistemas-agroforestales-potencialidades-para-el-caso-del-ecuador/>
- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2011(48), 61–79. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Pounds, J. A., & Coloma, L. A. (2008). Beware the lone killer. *Nature Climate Change*, 1(805), 57–59. <https://doi.org/10.1038/climate.2008.37>
- Quintana, C., Pennington, R. T., Ulloa, C. U., & Balslev, H. (2017). Biogeographic Barriers in the Andes: Is the Amotape-Huancabamba Zone a Dispersal Barrier for Dry Forest Plants? *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 102(3), 542–550. <https://doi.org/10.3417/D-17-00003A>
- Randin, C. F., Engler, R., Normand, S., Zappa, M., Zimmermann, N. E., Pearman, P. B., Vittoz, P., Thuiller, W., & Guisan, A. (2009). Climate change and plant distribution: Local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*, 15(6), 1557–1569. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01766.x>
- Reguerin Lopez, J. M. I. (2012). *“DISTRIBUCION POTENCIAL DE ESPECIES DE LA FAMILIA ARALIACEAE DE LA REGION MADIDI.”* [http://www.mobot.org/pdfs/research/madidi/itla\\_2010\\_thesis.pdf](http://www.mobot.org/pdfs/research/madidi/itla_2010_thesis.pdf)

- Richardson, D. M., & Whittaker, R. J. (2010). *Conservation biogeography-foundations, concepts and challenges*. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00660.x>
- Rivera, C. G., Hernández, K. T. F., Villalta, J. F. M., & Sánchez, A. V. B. (2021). Guía para el modelo de distribución de especies por Máxima Entropía, estudio de caso de la “lora nuca amarilla” *Amazona auropalliata* en El Salvador. *Revista Científica Multidisciplinaria de La Universidad de El Salvador - Revista Minerva*, 4(2), 125–142. <https://minerva.sic.ues.edu.sv/index.php/Minerva/article/view/131>
- Rodríguez Camino. (2013). *Cambio climático 2013: bases físicas*. [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org)
- Rodríguez, J. P., Brotons, L., Bustamante, J., & Seoane, J. (2007). The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 13(3), 243–251. <https://doi.org/10.1111/J.1472-4642.2007.00356.X>
- Samaniego Rojas, N., Eguiguren, P., Maita, J., & Aguirre, N. (2015a). *Cambio climático y Biodiversidad: Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador* (O.-L. T., E. P., y A.-M. Z. Aguirre N., Ed.). [https://www.researchgate.net/publication/299426281\\_Clima\\_de\\_la\\_Region\\_Sur\\_el\\_Ecuador\\_historia\\_y\\_tendencias](https://www.researchgate.net/publication/299426281_Clima_de_la_Region_Sur_el_Ecuador_historia_y_tendencias)
- Samaniego Rojas, N., Eguiguren, P., Maita, J., & Aguirre, N. (2015b). *Clima de la Región Sur del Ecuador: historia y tendencias*. [https://www.researchgate.net/publication/299426281\\_Clima\\_de\\_la\\_Region\\_Sur\\_el\\_Ecuador\\_historia\\_y\\_tendencias](https://www.researchgate.net/publication/299426281_Clima_de_la_Region_Sur_el_Ecuador_historia_y_tendencias)
- Sousa S, M. (2008). El Genero Inga (Leguminosae: Mimosoideae) Del Sur de Mexico Y Centroamerica, Estudio Previo Para la Flora Mesoamericana. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 80(1), 223–269. <http://www.bionica.info/biblioteca/Sousa1993Leguminosae.pdf>
- Svenning, J. C., Normand, S., & Skov, F. (2006). Range filling in European trees. *Journal of Biogeography*, 33(11), 2018–2021. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2699.2006.01630.X>
- Svenning, J. C., & Skov, F. (2004). Limited filling of the potential range in European tree species. *Ecology Letters*, 7(7), 565–573. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00614.x>
- Uribe Botero, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en America Latina*. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295\\_en.pdf?sequence=1](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf?sequence=1)

- Veliz Requena, F. S. (2015). *ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL CANTÓN ZAPOTILLO, PROVINCIA DE LOJA*. [Universida Nacional de Loja].  
[https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11321/1/Tesis\\_An%c3%a1lisis\\_Multitemporal\\_CUS-Z\\_Fredy\\_Veliz\\_R\\_04.02.2015.pdf](https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11321/1/Tesis_An%c3%a1lisis_Multitemporal_CUS-Z_Fredy_Veliz_R_04.02.2015.pdf)
- Villamar, F., & Analía, L. (2015). *Micropropagación in vitro de la guaba (Inga insignis) endémica de la provincia de Imbabura*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9668>
- Villamar Flores, L. A. (2014). *ESTANDARIZACION DE LAS ETAPAS DE MICROPAGACION IN VITRO DE LA GUABA (Inga insignis) ENDEMICA DE LA PROVINCIA DE IMBABURA*. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9670/1/T-ESPE-048079.pdf>
- Villegas, S. S. (2019). *Efectos del cambio climatico en la distribucion geografica de la especie invasora Asparagopsis Armata Harvey, 1855*.
- von Loebenstein, K. (2020). *Aumento de la resiliencia frente al cambio climatico a traves de la porteccion y el uso sostenible de ecosistemas fragiles*. <https://adaptacioncc.com/genero-adaptacion/aumento-resiliencia#:~:text=El%20Programa%20%E2%80%9CAumento%20de%20la,medidas%20y%20acciones%20que%20implementa>.
- Wilfried Thuiller, Damien Georges, Maya Gueguen, Robin Engler, Frank Breiner, Bruno Lafourcade, & Remi Patin. (2022). *Ensemble Platform for Species Distribution Modeling*. <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf>
- Williams, J. N., Seo, C., Thorne, J., Nelson, J. K., Erwin, S., O'Brien, J. M., & Schwartz, M. W. (2009). Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Diversity and Distributions*, 15(4), 565–576. <https://doi.org/10.1111/J.1472-4642.2009.00567.X>
- Wohlgemuth, T., Nobis, M. P., Kienast, F., & Plattner, M. (2008). Modelling vascular plant diversity at the landscape scale using systematic samples. *Journal of Biogeography*, 35(7), 1226–1240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.01884.x>
- Yáñez-Cajo., D. J., B., M. E. V., & L., D. L. (2015). Aplicación del modelamiento de distribución de *Bradypus variegatus*, para la conservación del nicho ecológico. *Boletín Técnico, Serie Zoológica*, 12(10–11). <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-serie-zoologica/article/view/1466>

Zhiñin Quezada, H. R. (2017). *IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA Y SITIOS DE REFERENCIA EN LA REGIÓN SUR DEL ECUADOR* [Universidad Nacional de Loja].

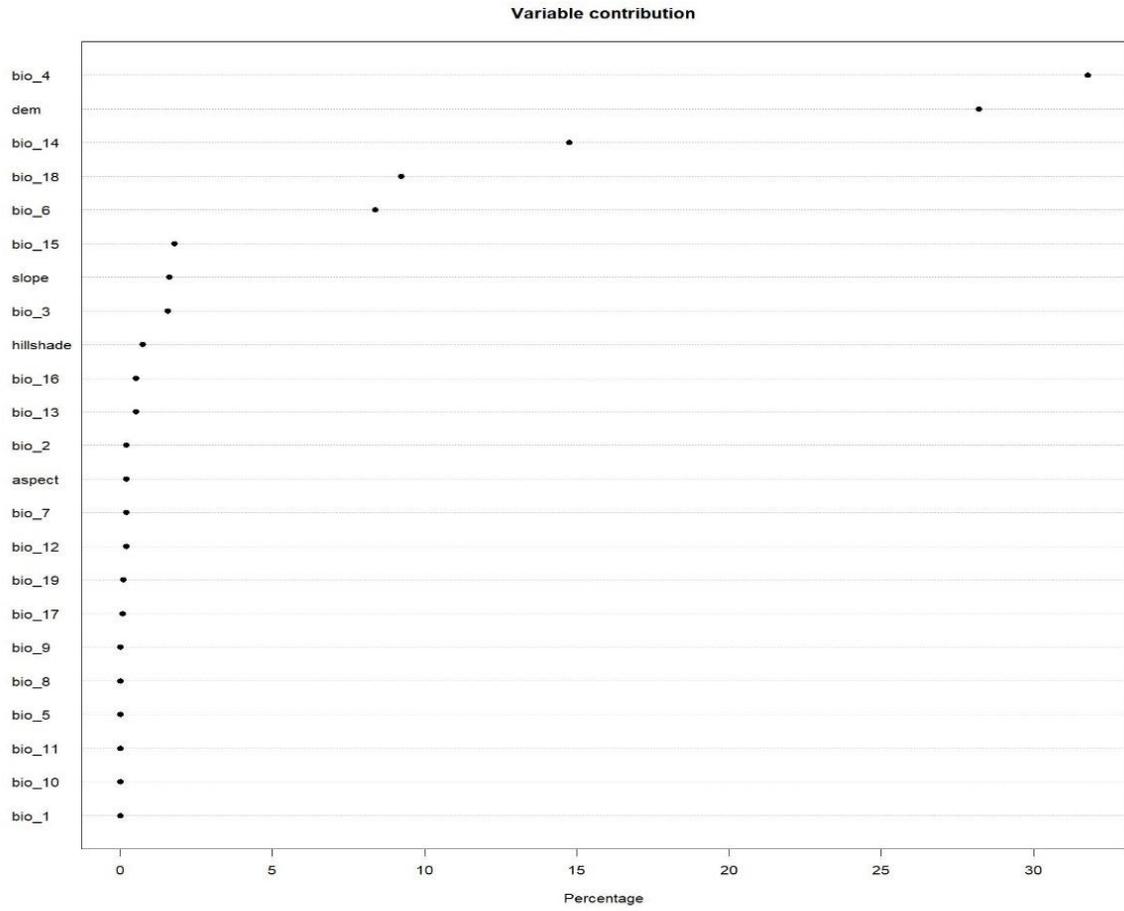
[https://www.researchgate.net/publication/329584827\\_IDENTIFICACION\\_DE\\_AREAS\\_PRIORITARIAS\\_PARA\\_LA\\_RESTAURACION\\_ECOLOGICA\\_Y\\_SITIOS\\_DE\\_REFERENCIA\\_EN\\_LA\\_REGION\\_SUR\\_DEL\\_ECUADOR\\_AUTOR\\_DIRECTOR/stats](https://www.researchgate.net/publication/329584827_IDENTIFICACION_DE_AREAS_PRIORITARIAS_PARA_LA_RESTAURACION_ECOLOGICA_Y_SITIOS_DE_REFERENCIA_EN_LA_REGION_SUR_DEL_ECUADOR_AUTOR_DIRECTOR/stats)

Zimmermann, N. E., Edwards Jr, T. C., Moisen, G. G., Frescino, T. S., Blackard, J. A., & Zimmermann, N. E. (2007). Remote sensing-based predictors improve distribution models of rare, early successional and broadleaf tree species in Utah. *Journal of Applied Ecology*, 44, 1057–1067. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01348.x>

# 11 Anexos

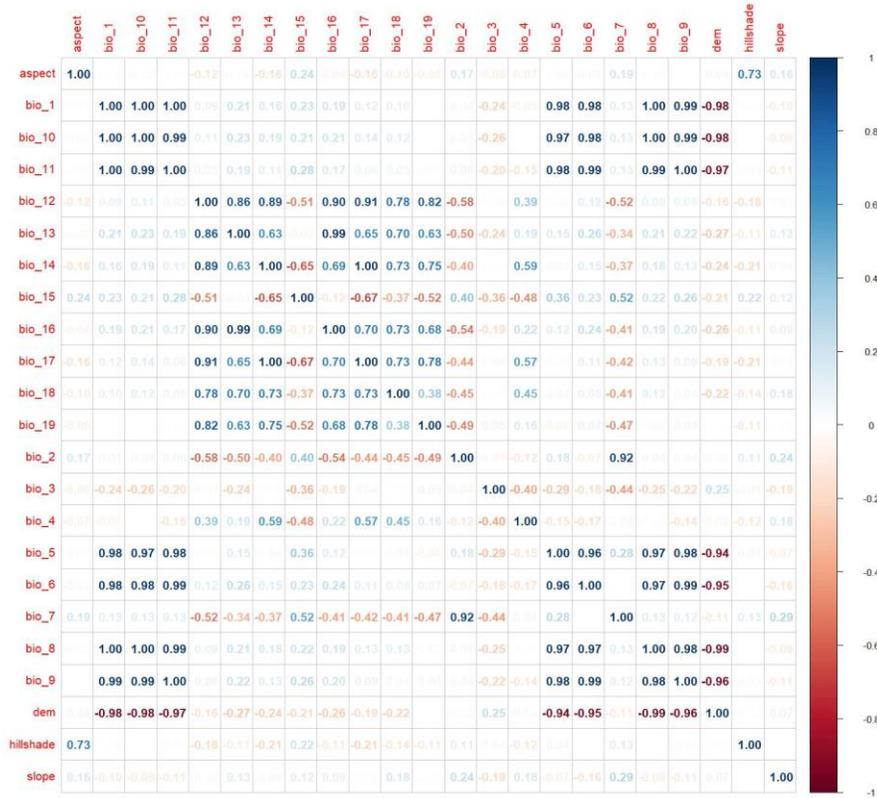
## Anexo 1.

Prueba Janckknife para variables importantes



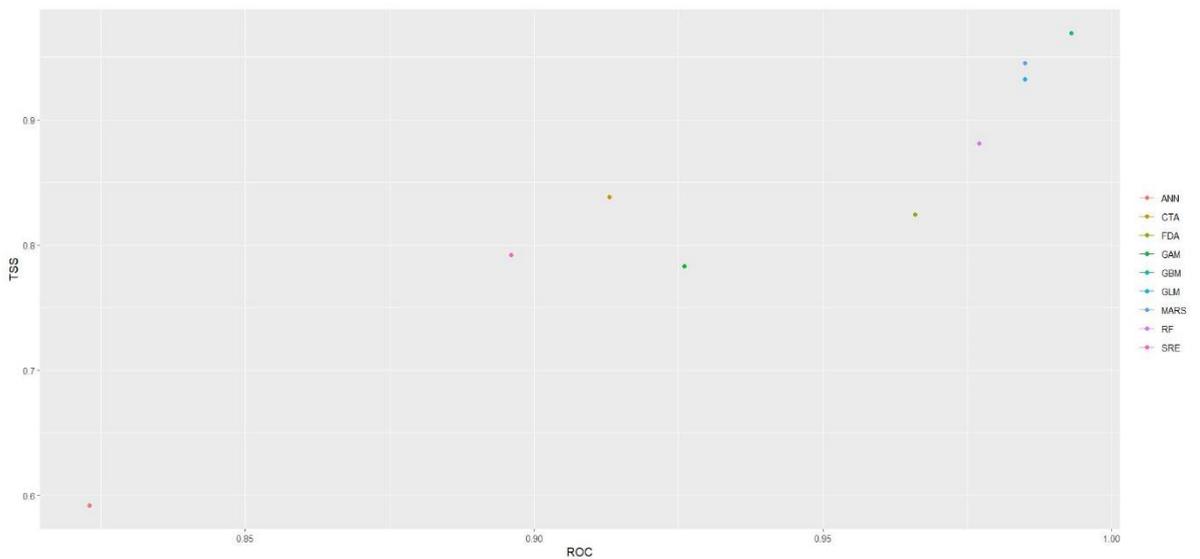
## Anexo 2.

Correlación de Pearson para las variables climáticas y topográficas



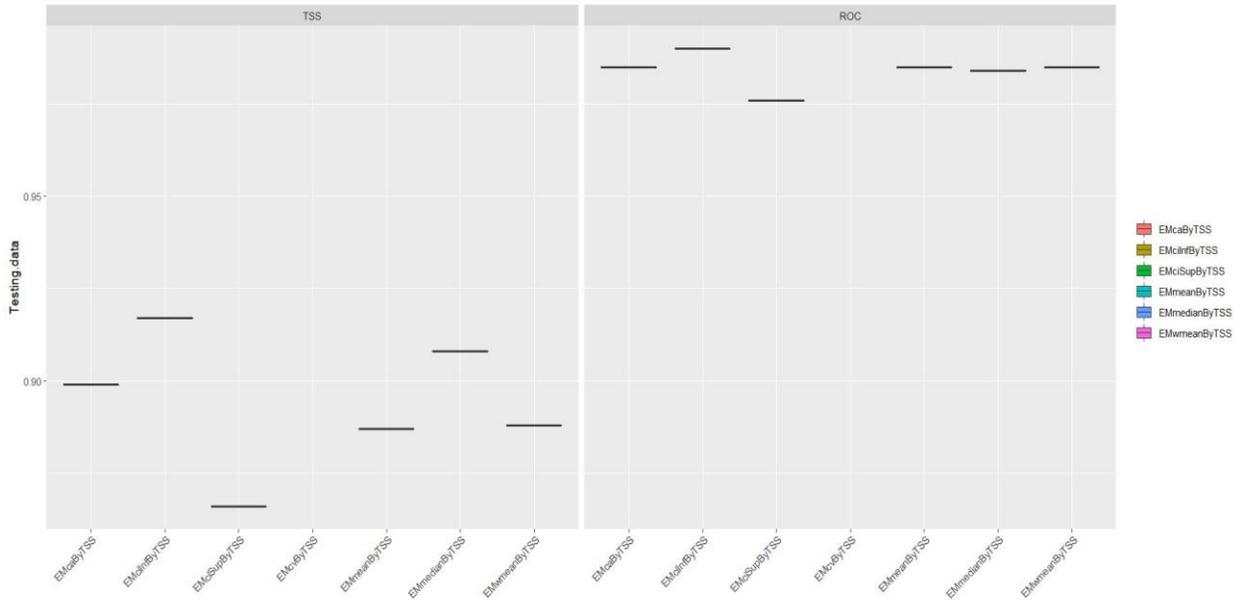
## Anexo 3.

Evolución de las técnicas de modelación mediante test ROC y TSS



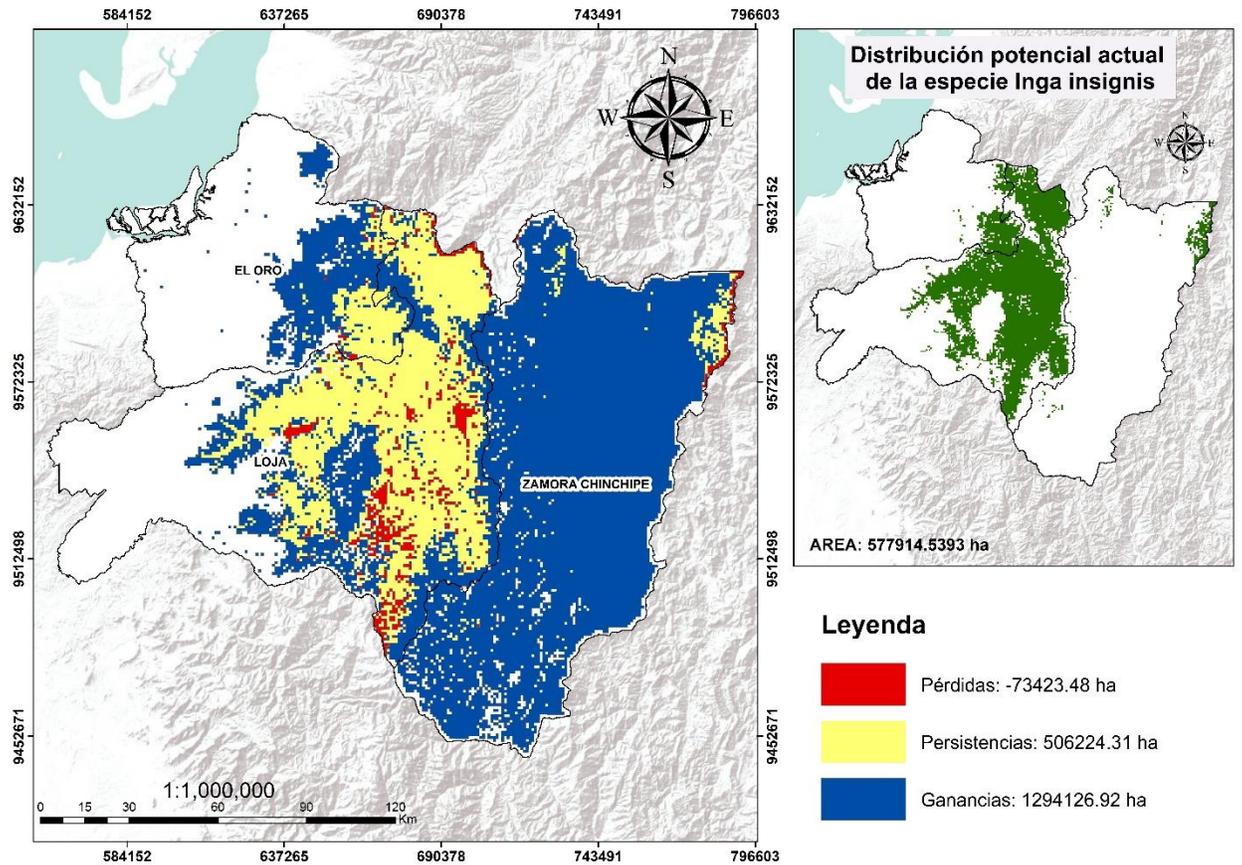
#### Anexo 4.

Evaluación de los ensambles de los modelos mediante el test ROC y TSS



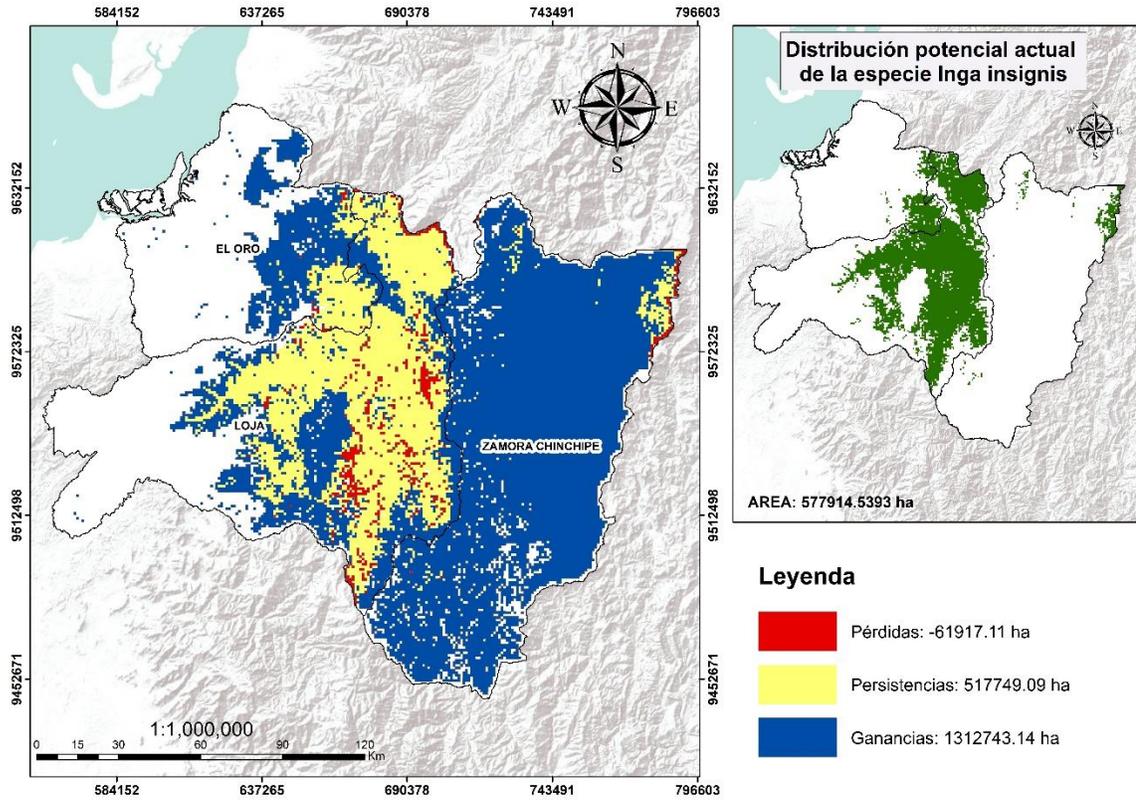
#### Anexo 5.

Distribución Potencial de la especie *Inga insignis* en la RSE-Escenario 2030 RCP4.5.



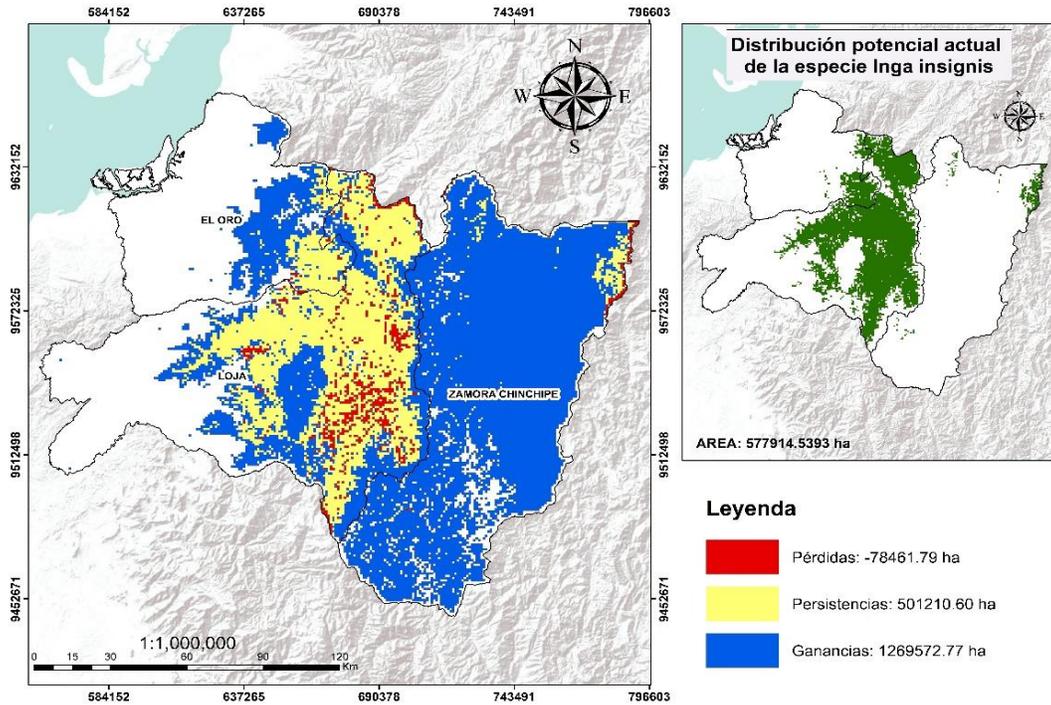
**Anexo 6.**

Distribución Potencial de la especie *Inga insignis* en la RSE-Escenario 2050 RCP4.5.



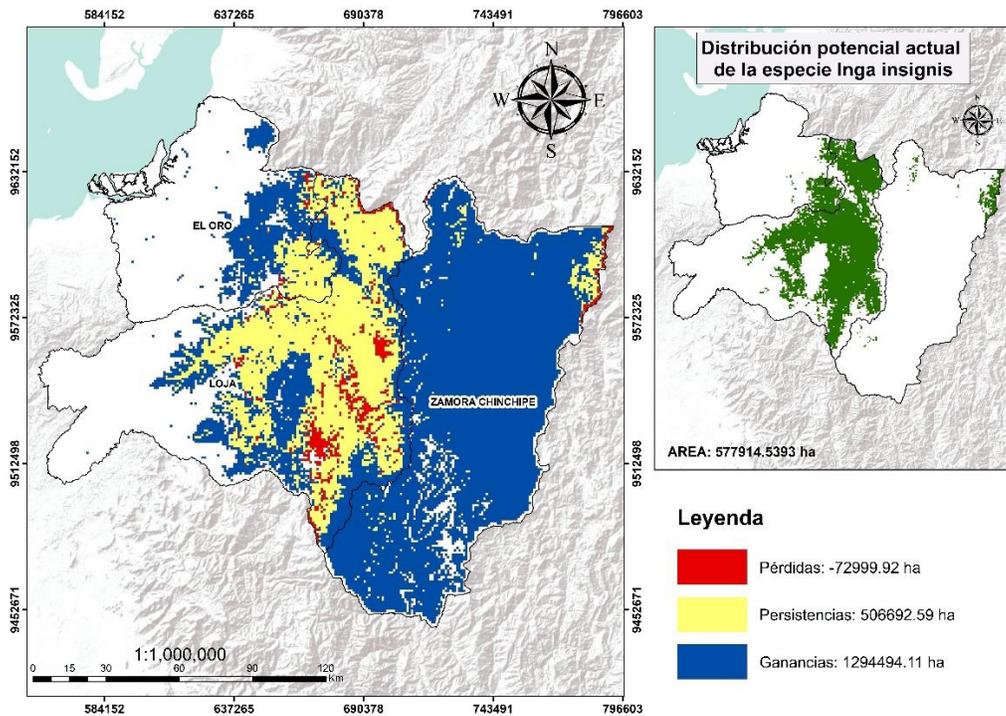
### Anexo 7.

Distribución Potencial de la especie *Inga insignis* en la RSE-Escenario 2080 RCP4.5.



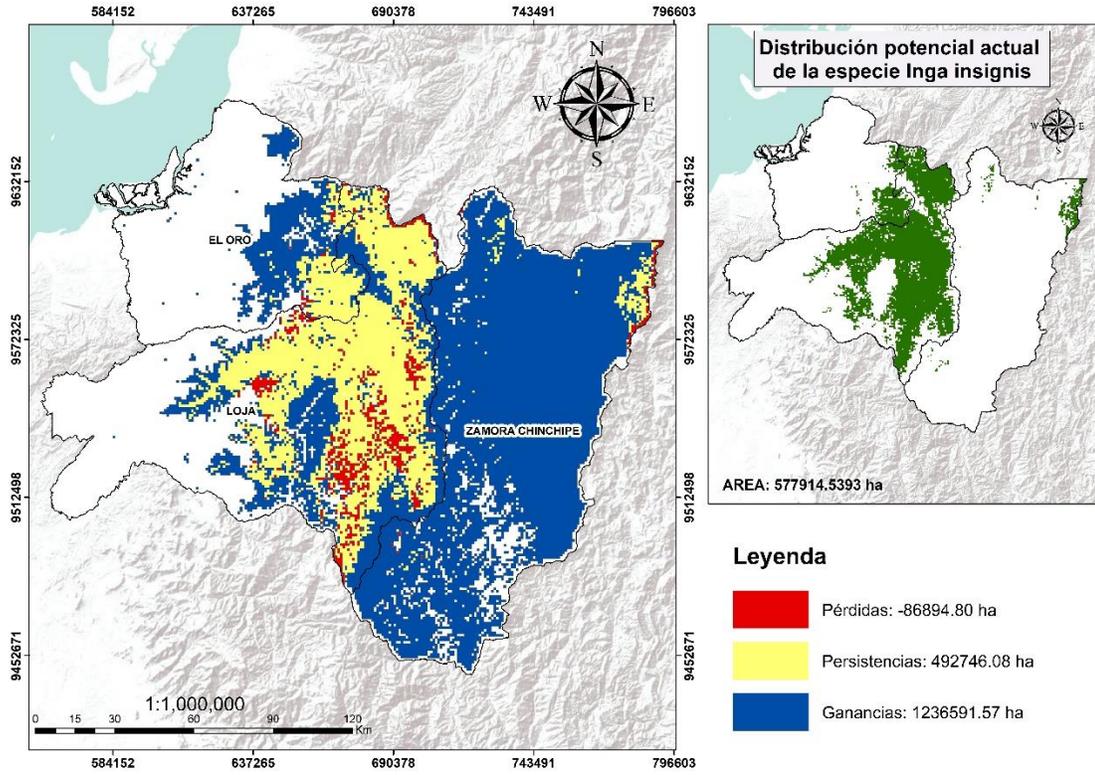
### Anexo 8.

Distribución Potencial de la especie *Inga insignis* en la RSE-Escenario 2030 RCP 6.0.



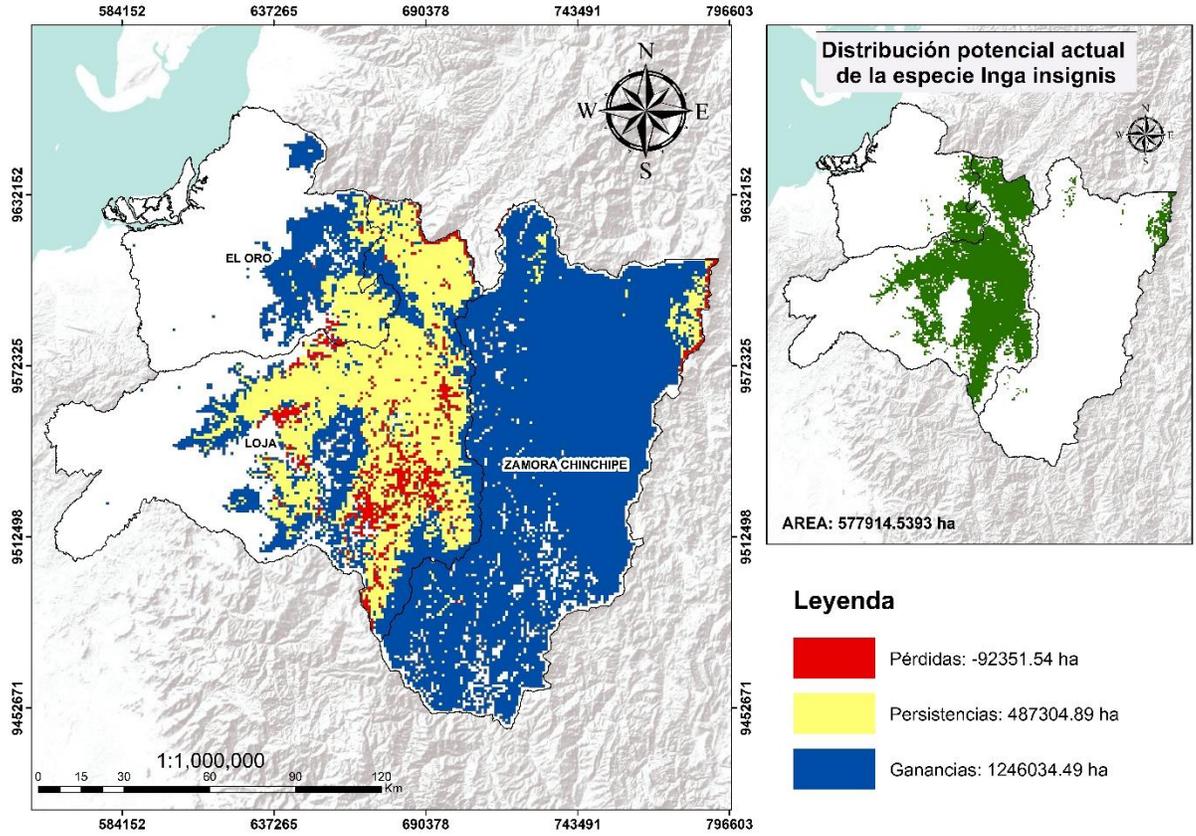
**Anexo 9.**

**Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2050 RCP 6.0**



**Anexo 10.**

**Distribución Potencial de la especie Inga insignis en la RSE-Escenario 2080 RCP 6.0**



**Anexo 11.**

Certificación de traducción Abstract

Loja, 29 de junio del 2023

Lic.

Manuel Agustín González Estrella

**DOCENTE DE LA UNIDAD EDUCATIVA FISCOMISIONAL SAN FRANCISCO DE ASÍS**

**CERTIFICA:**

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés de la Tesis de Grado titulada “**Distribución espacial de la especie *Inga insignis* bajo escenarios de cambio climático y cambios usos del suelo en la Región Sur del Ecuador**”, de autoría del Sr. Bryan Alexis Cartuche Coello, con cédula de ciudadanía No. 1105745689, egresado de la carrera de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico en honor a la verdad y autorizo al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.



Lic. Manuel Agustín González Estrella

**CI:** 1101840690

**Número de registro:** 1008-15-1380447