

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA
DOCUMENTO FINAL DE PASANTÍA PROFESIONAL



Acción Operativa “Elaboración de atlas de distribución de especies prioritarias y sus cambios por efecto del cambio climático, año 2”. Enfoque en modelo de Cambio Climático.

PRESENTADO POR:

JOSÉ FERNANDO MERINO VILLALTA

CARNET: MV14003

PARA OPTAR AL GRADO AL GRADO DE:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, 17 DE MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS



M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

RECTOR

DR. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

VICERRECTOR ACADÉMICO

ING. JUAN ROSA QUINTANILLA

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

ING. FRANCISCO ALARCÓN

SECRETARIO GENERAL

LICDO. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARTÍN

FISCAL GENERAL

LICDO. LUIS ANTONIO MEJÍA LIPE

DEFENSOR DE LOS DERECHOS UNIVERSITARIOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
AUTORIDADES FACULTAD CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA



LIC. MAURICIO HERNÁN LOVO CÓRDOVA

DECANO

M.Sc. ZOILA VIRGINIA GUERRERO MENDOZA

VICEDECANA

LIC. JAIME HUMBERTO SALINAS ESPINOZA

SECRETARIO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA



Acción Operativa “Elaboración de atlas de distribución de especies prioritarias y sus cambios por efecto del cambio climático, año 2”. Enfoque en modelo de Cambio Climático.

PRESENTADO POR:

JOSÉ FERNANDO MERINO VILLALTA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

ASESORES:

LICDA. DORA ALICIA DURÁN

ASESORA INTERNA

M.Sc. CARLOS GIOVANNI RIVERA

ASESOR EXTERNO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA



Acción Operativa “Elaboración de atlas de distribución de especies prioritarias y sus cambios por efecto del cambio climático, año 2”. Enfoque en modelo de Cambio Climático.

PRESENTADO POR:

JOSÉ FERNANDO MERINO VILLALTA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

TRIBUNAL CALIFICADOR:

MsD. VIRGINIA GERALDINE RAMÍREZ PINEDA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Virginia', is written above a horizontal line.

ING. VINICIO ALEXANDER LÓPEZ QUEZADA

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Vinicio', is written above a horizontal line.

Agradecimientos.

Primero agradecer a mis padres, por apoyarme a pesar de todo y por quererme tanto. A mi hermana, por soportarme y darme ánimos.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y a todos ahí dentro, por brindarnos el espacio y tratarnos con mucho cariño desde el primer día. En especial a los guardarecursos, que realizan un trabajo tremendo y muchos no lo valoramos.

A mis asesores, el licenciado Carlos Rivera y la licenciada Dora Durán, por abrirme las puertas, ayudarme en cada paso y por su tiempo y dedicación.

A mis abuelitas que quiero mucho, Marta y Marina. A ambas les agradezco todo el cariño que me han dado. Espero que mi abuelita Marta esté orgullosa de mí donde sea que esté y decirle que la extraño. A mi abuelita Marina, que espero verla conmigo sosteniendo el título.

A quienes me acompañaron en todo este proceso: Alicia, Mayra y Marcos. Amigos que hice durante mi tiempo en el ministerio y que compartieron conmigo risas y almuerzos.

A mi compañera en todo el proceso, Katherine, por compartir todo el estrés.

A quienes les debo esta oportunidad, Luzmila y Liliana. Gracias a su amabilidad pude hacer esta pasantía.

A mí, por la compañía.

Ne Pajpadiush.

Achtu, padiush ne nuteku iwan ne nunan, ika yejemet nechpalewiat wan nechtasujtat. Padiush nuikaw, ika yaja nechselia wan nechtasujta (wan naja nikiselia wan niktasujta nusan).

Padiush Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, wan muchi iijtik ka né, ika yejemet nechajkawket nitekiti inwan wan nechnekiket tik achtu tunal.

Padiush ne nutajtamachtiani, Carlos Rivera wan Dora Alicia Durán , ika nechpalewijkket senpa. Padiush ika yejemet kipiaket keman nupal.

Padiush nunojnoya, Marta wan Marina. Naja sujsul nikintasujta. Nunoya Marta, nikneki ka yaja yulpaki nujme ka nemi. Nunoya Marina, ninemi pal nimetzmuneshtia ne iamat ne wey tamachtilyan.

Padiush nukumpawan Alicia, Mayra wan Marcos. Yejemet ne nukumpawan nikinishmatik ipal ne Ministerio. Nipakik wan nitakwak inwan.

Padiush nukumpa Katherine, ka tekitik nuwan.

Padiush nukumpawan Luzmila wan Liliana. Asu yejemet tesu nechilwijtuskia ika ne pasantiaj, tesu nikichiwatuskia nupasantiaj.

Padiush naja ika ninechkumpachiwak.

Índice de contenido.

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
3. Objetivos.....	4
3.1. Objetivos generales:.....	4
3.2. Objetivos específicos:.....	4
4. Metas.....	4
5. Metodología.....	5
5.1. Institución donde se desarrolló la pasantía.....	5
5.2. Proceso y recursos.....	6
5.2.1. ArcMap:.....	7
5.2.2. MaxEnt:.....	8
5.2.3. Lenguaje R:.....	8
5.3. Desarrollo de pasantía.....	9
5.3.1. Obtención de datos de presencia de <i>Global Biological Information Facility</i> (GBIF).....	9
5.3.2. Obtención de datos del informe de levantamiento de parcelas de <i>Dalbergias spp</i>	9
5.3.3. Obtención de datos, mediante giras de campo a diferentes Áreas Naturales Protegidas.....	9
5.3.4. Limpieza y preparación de los datos.....	10
5.3.5. Obtención de variables bioclimáticas.....	12
5.3.6. Modelado de datos en MaxEnt.....	13
5.3.7. Elaboración de material cartográfico.....	14
6. Resultados.....	17
6.1. Evaluación del modelo y variables bioclimáticas.....	17
6.2. Distribución potencial actual.....	18
6.3. Distribución potencial a futuro.....	20
7. Discusión.....	24
7.1. Resultados de los modelos.....	24
7.2. Experiencia de pasantía.....	26
8. Conclusiones.....	28
9. Recomendaciones.....	28
10. Bibliografía.....	29

Índice de tablas.

Tabla 1. Recursos materiales.....	6
Tabla 2. Recursos humanos.....	7
Tabla 3. Herramientas de ArcMap aprendidas.....	7
Tabla 4. Variables de interés a extraer.....	11
Tabla 5. Variables ambientales en los modelos de WorldClim.....	12
Tabla 6. Descripción de las 4 trayectorias utilizadas (van Vuuren et. al., 2011).....	13
Tabla 7. Valores reclasificados del modelo actual.....	15
Tabla 8. Área de distribución potencial de D. retusa por departamento.....	22
Tabla 9. Área de distribución potencial de D. retusa por rango altitudinal.....	23
Tabla 10. Conocimientos adquiridos.....	27

Índice de figuras.

Figura 1. Ubicación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.....	5
Figura 2. Capacitación de guardarecursos de aplicación Survey123 (izquierda) y registro de observaciones en campo (derecha).....	10
Figura 3. Limpieza de los datos.....	10
Figura 4. Concatenación de dos fuentes de datos.....	11
Figura 5. Proceso de reclasificación. El mapa de valores continuos resultante de MaxEnt (a) se reclasifica en uno de dos valores discretos (b).....	14
Figura 6. Extracción de píxeles coincidentes por mayoría simple.....	15
Figura 7. Curva ROC del modelo.....	17
Figura 8. Contribución porcentual (a) e importancia de permutación (b) de las variables bioclimáticas en el modelo de distribución.....	17
Figura 9. Mapa producto de MaxEnt.....	18
Figura 10. Distribución potencial actual de <i>D. retusa</i> en El Salvador.....	19
Figura 11. Área total y propicia para <i>D. retusa</i> por departamento (Km ²).....	19
Figura 12. Área total y de distribución potencial por rango altitudinal.....	20
Figura 13. Distribución potencial a futuro de <i>D. retusa</i> en El Salvador.....	21
Figura 14. Curvas de respuestas de las variables 10 y 6.....	24

1. Resumen.

De abril a diciembre de 2021 se colaboró con la Gerencia de Áreas Naturales Protegidas y Corredor Biológico, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en la obtención, limpieza y modelamiento de datos de presencia de la especie *Dalbergia retusa*, una especie amenazada por la destrucción de su hábitat (bosque seco) y la intensificación de su tala para la exportación a mercados emergentes de Asia (especialmente China). Con la finalidad de mostrar cómo la distribución futura de la especie puede verse amenazada por el Cambio Climático. Se proyectaron en MaxEnt 6 modelos climáticos a dos años (2050 y 2070), con 4 trayectorias de concentración representativas (RCP) por cada uno de estos (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5). Tanto 2050 como 2070 pronostican una extirpación de *D. retusa* del territorio salvadoreño, sin importar el RCP. La especie ya está protegida por el apéndice II de CITES, sin embargo se recomienda que los esfuerzos para su conservación sean más proactivos y diversos, ya que su distribución actual parece ser insuficiente para asegurar la preservación de *D. retusa* en el futuro.

2. Introducción.

El cambio climático es uno de los mayores peligros que enfrentan las sociedades humanas y la biodiversidad. Se estima que una vez el ecosistema se haya adaptado a este, el cambio en la temperatura eliminará entre 12% y 16% de las especies a nivel mundial y hasta el 20% en el Neotrópico (Dobson et al. 2005). Lo que vuelve necesario conocer las especies más vulnerables para plantear o mejorar planes de conservación que permitan reducir esta pérdida, en especial en una de las regiones más amenazadas por el cambio climático, como Centroamérica (Mantyka-Pringle et al. 2015; Imbach et al. 2018).

A través del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el Estado salvadoreño honra su deber constitucional de asegurar la preservación del medio ambiente y su biodiversidad (Constitución de la República de El Salvador, 1983, Art.117), monitoreando las especies del país y prediciendo cuáles de estas se verán más afectadas por el cambio climático. En 2021 se creó un atlas dinámico que contiene información general de algunas especies arbóreas de El Salvador, su distribución potencial en el país y los cambios de esta según diferentes escenarios climáticos.

Una de estas especies es *Dalbergia retusa*, una de las 9 especies del género *Dalbergia* amenazadas o en peligro de extinción de las 11 registradas en el país (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2015, Berendsohn et al. 2009). Su situación es crítica por la deforestación histórica del bosque seco, su hábitat natural (Dull, 2008; Condit et al., 2010), y por la creciente demanda de su madera para la elaboración de muebles lujosos en mercados emergentes en Asia y el mercado especulativo asociado a esta (Wenbin & Xiufang, 2013; Zhu, 2020).

El MARN, mediante la gerencia de Áreas Naturales Protegidas y Corredor Biológico, en colaboración con la Universidad de El Salvador, le abrió las puertas del proyecto a un estudiante que estuviera interesado por el tema y deseara realizar sus prácticas profesionales en el Ministerio. Esta consistió en recopilar datos bioclimáticos del país y datos de presencia de especies, modelar estos en distribuciones potenciales y generar mapas de distribución potencial. Como producto final, se presentó una sección del atlas antes mencionado, del cual se beneficiarán los tomadores de decisiones y el público en general, al proveer información clave de esta especie.

Durante la pasantía, el estudiante tuvo la oportunidad de practicar y expandir sus conocimientos en áreas de gran importancia como sistemas de información geográfica (SIG), redacción científica, estadística descriptiva y aprender lenguajes programación como R y Powershell. Habilidades que se han vuelto necesarias estos últimos años.

3. Objetivos.

3.1. Objetivos generales:

- Pronosticar cambios en el área de distribución de *Dalbergia retusa* debido al cambio climático, mediante métodos de aprendizaje automático.

3.2. Objetivos específicos:

- Modelar escenarios de cambio climático mediante la técnica de Máxima Entropía.
- Proyectar la distribución de *Dalbergia retusa* a futuro.
- Analizar los diferentes modelos climáticos y sus efectos en la distribución potencial de *Dalbergia retusa*.

4. Metas.

- Modelar la distribución de *Dalbergia retusa* en El Salvador.
- Publicar sección de *Dalbergia retusa* en el atlas dinámico del MARN.

5. Metodología.

5.1. Institución donde se desarrolló la pasantía.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) se encuentra en El Salvador, departamento y municipio de San Salvador.



Figura 1. Ubicación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

La pasantía se desarrolló en la Gerencia de Áreas Naturales Protegidas y Corredor Biológico, que pertenece al Ministerio. Instituida en 2005, producto de la Ley de Áreas Naturales Protegidas, la gerencia tiene como objetivo “el establecimiento del régimen legal, administración, manejo e incremento de las ANP con el fin de conservar la diversidad biológica, asegurar el funcionamiento ecológico esencial y garantizar la perpetuidad de los sistemas naturales”.

Entre las funciones principales de la gerencia están: planificar, ejecutar y dar seguimiento a proyectos de investigación, conservación y desarrollo en todo lo relacionado a las Áreas Naturales Protegidas. Con el fin de mantener una gestión efectiva y eficiente, que asegure la provisión de servicios ecosistémicos y la conservación biológica para el beneficio de la población salvadoreña (Ley de Áreas Naturales Protegidas, 2005).

5.2. Proceso y recursos.

La pasantía comenzó el 12 de abril de 2021 y terminó el 8 de diciembre del mismo año. La asistencia fue híbrida, el pasante se presentaba al Ministerio 3 días a la semana y 2 días se trabajaba desde casa, excepto cuando se hacían viajes de campo. Durante la pasantía se tuvo acceso a diferentes recursos, que pueden apreciarse en la tabla 1.

Tabla 1. Recursos materiales

Nombre	Descripción	Precio (USD)
Workstation	Computadora de alta gama.	9,500.00
R	Lenguaje de programación especializado en estadística.	Gratis
Python	Lenguaje de programación multiparadigma.	Gratis
Powershell	Interfaz de línea de comandos nativa de Windows.	Gratis
RStudio	<i>Integrated Development Environment</i> (IDE) o entorno de desarrollo interactivo. Específico para R.	Versión gratuita
NeoVIM	Editor de texto en la línea de comandos.	Gratis
MaxEnt	Programa escrito en Java para modelar la distribución potencial de especies.	Gratis
ArcMap	Software privativo de Sistemas de Información Geográficas.	13,500.00
QGIS	Software libre de Sistemas de Información Geográfica.	Gratis
GIT	Software para control de versiones.	Gratis
Survey123	Aplicación de Esri para la recolección de datos en campo.	4,000.00
GPS	Instrumento para obtener puntos georeferenciados.	100.00
	Total:	27,100.00

Además se contó con la ayuda de diferentes miembros del MARN, entre los cuales podemos destacar los descritos en la tabla 2.

Tabla 2. Recursos humanos

Nombre	Descripción
M.Sc Carlos Rivera	Asesor externo del pasante. Explicó las actividades que debían realizarse, compartió su experiencia, brindó capacitaciones, participó en los monitoreos, entre otras.
Br. Alicia Beltrán	Estudiante egresada de la licenciatura en Estadística. Colaboró en el modelado de la especie, así como en la elaboración del material cartográfico.
Guardarecursos	Participaron activamente en la recolección de datos de presencia de especies.
Licda. Carolina Canales	Brindó su conocimiento técnico siempre que surgieron dudas respecto al uso de ArcMap.
Lic. Marcos Córdova	Colaboró con la maquetación del atlas y los monitoreos.

Durante el transcurso de la pasantía se recibieron diferentes capacitaciones, con el fin de educar al pasante en las tecnologías necesarias para hacer su trabajo. La mayoría de estas se realizaron los viernes después del mediodía, con dos horas de presentación más una de preguntas y respuestas. Los temas abordados fueron los siguientes:

5.2.1. ArcMap:

Es una aplicación central usada en ArcGIS para mostrar y explorar conjuntos de datos, asignar simbología y diseñar esquemas de mapas para imprimir o publicar (Law & Collins, 2021). De esta se explicaron las herramientas descritas en la tabla 3 (Esri, revisado diciembre 18 de 2021)

Tabla 3. Herramientas de ArcMap aprendidas.

Herramienta	Descripción
Definir proyección	Sobrescribe la información del sistema de coordenadas, sin cambiar la geometría.
Proyectar	Cambia la geometría de la capa a la del sistema de coordenadas a

	un sistema de coordenadas específico.
Reclasificar	Cambia los valores de un ráster.
Calculadora ráster	Permite crear y ejecutar expresiones de álgebra de mapas en una herramienta.
Model Builder	Aplicación para crear, editar y administrar flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada
Estadísticas zonales como tabla	Resume los valores de un ráster dentro de las zonas de otro dataset e informa los resultados en una tabla.

5.2.2. MaxEnt:

Es un paquete de software desarrollado en Java en 2006 por Steven J. Phillips, Robert P. Anderson y Robert E. Schapire para modelar distribuciones de especies utilizando sólo datos de presencia de estas. Este aplica el principio de máxima entropía para ajustar el modelo, de tal forma que la distribución estimada de la especie se desvíe de la distribución uniforme lo menos posible requerido para explicar las observaciones (Guillera-Aroita et al., 2014).

Durante las capacitaciones se aprendió qué modela (nichos potenciales) y cómo se utiliza MaxEnt. Después de esto se redactó una guía para utilizar la aplicación, con un ejemplo práctico sobre la distribución de *Amazona auropalliata* (“lora nuca amarilla”) en El Salvador. Esta se publicó en la revista Minerva (Rivera et al., 2021).

5.2.3. Lenguaje R:

Es un lenguaje de programación y entorno de estadística y graficación computacional. R provee una gran variedad de técnicas estadísticas y gráficas. Esta última es una de sus fortalezas, por la facilidad con la que se pueden producir gráficos bien diseñados y listos para publicar (R Core Team, 2019).

La capacitación se centró en los elementos básicos de R como declaración de variables, los tipos de *data*, operaciones matemáticas y lógicas, y en la producción de gráficos mediante el paquete ggplot2 (Wickham, 2011). Se leyeron los primeros 7 capítulos del libro *The Book of R: A First Course in Programming and Statistics* por Tilman M.

5.3. Desarrollo de pasantía.

La obtención de datos de *Dalbergia retusa* se hizo de tres formas: a través de la plataforma de *Global Biological Information Facility* (GBIF), del informe de levantamiento de parcelas de *Dalbergias spp.* que realizó el MARN (Aquino, 2020) y de la recolección de datos en campo.

5.3.1. Obtención de datos de presencia de *Global Biological Information Facility* (GBIF).

GBIF es una “red internacional e infraestructura de datos financiada por los gobiernos del mundo, con el objetivo de ofrecer a cualquiera, en cualquier parte del planeta, fácil acceso a datos sobre la vida en la Tierra” (*What Is GBIF?*, revisado septiembre 20 de 2021). Se optó por trabajar con una extensión del software de información geográfica QGIS que extrae la información de la base de GBIF, llamada *QGIS Occurrences*, por su facilidad de uso.

Debido a que QGIS y sus extensiones soportan el lenguaje Python, se escribió un pequeño *script* en este para acelerar el proceso. Los datos se obtuvieron en formato CSV (*Comma Separated Values*, valores separados por comas) con diferentes variables.

5.3.2. Obtención de datos del informe de levantamiento de parcelas de *Dalbergias spp.*

Se obtuvieron los datos de presencia de *Dalbergia retusa* en formato XLSX (*Office Open XML*) del “Informe final de levantamiento de tres parcelas de muestreo permanente en *Dalbergia spp.* en El Salvador” realizado por el MARN en 2020. Estos se guardaron en formato CSV.

5.3.3. Obtención de datos, mediante giras de campo a diferentes Áreas Naturales Protegidas.

Los monitoreos para recolectar datos de especies se realizaron dentro de 7 Áreas Naturales Protegidas y La Montañona, Chalatenango. Cada una de las 8 giras duró una semana, en cuatro de las cuales participó el estudiante: El Imposible, La Ermita, Montecristo y la Montañona. Los guardas de cada área planearon rutas con anticipación y al menos 2 grupos de trabajo recorrían diferentes rutas todos los días. Los guardas con conocimiento de las áreas y su vegetación identificaron las especies (y por tanto

D. retusa). Estas observaciones se registraron en la aplicación Survey123. Una vez se tenía conexión a internet, los registros se enviaban a una base de datos del MARN. Cada observación contó por lo menos con un punto de georreferencia y altitud del lugar.



Figura 2. Capacitación de guardarecursos de aplicación Survey123 (izquierda) y registro de observaciones en campo (derecha).

5.3.4. Limpieza y preparación de los datos.

Género	Especie	X	Y	...	Elevación	NomVulg	Creado
Dalbergia	retusa	-89.3549	-13.1649	...	NA	NA	NA
Dalbergia	retusa	-89.4816	-13.2504	...	NA	NA	NA
Dalbergia	retusa	-89.3874	-13.5478	...	NA	NA	NA

↓

Especie	Longitud	Latitud	Estado	Clasificación
Dalbergia retusa	-89.3549	-13.1649	amenaza	arboles
Dalbergia retusa	-89.4816	-13.2504	amenaza	arboles
Dalbergia retusa	-89.3874	-13.5478	amenaza	arboles

Figura 3. Limpieza de los datos.

Después de terminar los monitoreos, se descargó la base de datos del MARN en formato CSV. De esta se extrajeron todos los registros de *D. retusa*, tomando en cuenta solo las variables necesarias para correr MaxEnt, nombre de la especie y las coordenadas en grados decimales de longitud y latitud, (ver tabla 4) y otras necesarias para la organización de los datos, como se observa en la figura 3.

Tabla 4. Variables de interés a extraer.

Variable	Descripción	Ejemplo
especie	Nombre científico de la especie de interés.	<i>Quercus segoviensis</i>
estado	Estado de conservación de la especie dentro de El Salvador.	amenazada
clasificación	Categoría taxonómica no estricta de la especie.	árboles
longitud	Ubicación Este-Oeste sobre la Tierra en grados decimales.	-89.245619
latitud	Ubicación Norte-Sur sobre la Tierra en grados decimales.	13.264554

Una vez obtenidos todos los CSV con datos de *D. retusa* (GBIF, MARN y Proyecto Dalbergias), se concatenaron en un solo archivo mediante un *script* de Powershell 7.1 (ver figura 4). Se estandarizó el nombre de la especie como “*Dalbergia retusa*” en todos los registros con ayuda de expresiones regulares, para evitar confusiones en MaxEnt.

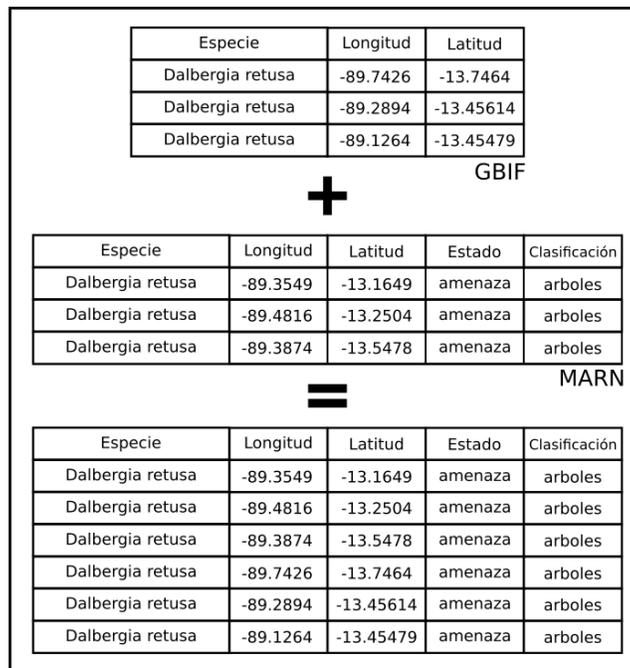


Figura 4. Concatenación de dos fuentes de datos.

5.3.5. Obtención de variables bioclimáticas.

Para modelar en MaxEnt se requiere de variables bioclimáticas, características abióticas del área de estudio. Se prefieren datos climáticos sobre otros para modelar, como la altitud y composición del suelo, porque los primeros pueden ser más significativos biológicamente y los segundos solo sucedáneos de estos (Austin & Van Niel, 2011).

Se utilizaron los datos de Worldclim 5, por poseer una resolución de 30 arcosegundos (aproximadamente 0.9 Km para El Salvador), que se consideró más adecuado dado el tamaño del país. Producido a partir de datos climáticos registrados del año 1950 al 2000, consta de 19 variables climáticas (ver tabla 5).

Tabla 5. Variables ambientales en los modelos de WorldClim

Código	Descripción
Bio1	Temperatura promedio anual (°C)
Bio2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
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)

Estas variables constituyen modelos climáticos proyectados a dos años diferentes: 2050 y 2070. Worldclim 5 cuenta con 19 modelos para cada año. De estos se seleccionaron 6 modelos, 4 de los cuales fueron recomendados por el MARN como los más adecuados para El Salvador (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017), más otros dos con buenos resultados para el país, para robustecer el modelo: CCSM4, GFDL-CM3, GISS-E2-R, HadGEM2-AO, MIROC5, MRI-CGCM3.

La mayoría de los modelos cuentan con 4 escenarios diferentes, llamados Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, *Representative Concentration Pathways*), que se refieren a trayectorias de la concentración de los gases de efecto invernadero y otros químicos activos en la atmósfera (IPCC, 2014). Van Vuuren et. al., 2011, recalcan que estos son representativos pues no cubren la totalidad de posibles caminos que conlleven al mismo resultado. Estos constituyen una gama de posibilidades de forzamiento radiativo a futuro: uno optimista (2.6), dos moderados (4.5 y 6.0) y uno pesimista (8.5). Una explicación breve de estos puede verse en la tabla 6.

Tabla 6. Descripción de las 4 trayectorias utilizadas (van Vuuren et. al., 2011)

RCP	Descripción
2.6	Pico del forzamiento radiativo de ~3 W/m ² (~490 ppm CO ₂ eq) antes de 2100 y después se reduce.
4.5	Estabilización, sin sobrepasar, a ~4.5 W/m ² (~650 ppm CO ₂ eq) después de 2100
6.0	Estabilización, sin sobrepasar, a ~6.0 W/m ² (~850 ppm CO ₂ eq) después de 2100
8.5	Trayectoria de forzamiento radiativo elevándose hacia ~8.5 W/m ² (~1370 ppm CO ₂ eq) en 2100.

5.3.6. Modelado de datos en MaxEnt.

Para producir los modelos de distribución potencial actual y futuros de *D. retusa*, se trabajaron en MaxEnt los datos limpios, organizados y concatenados de la especie (GBIF y MARN), un total de 108 registros, y las variables climáticas de Worldclim 5 para El Salvador.

En MaxEnt, se definió el tamaño de prueba como 25% (27 de 108 registros). Se configuró este para realizar 5 réplicas y una validación cruzada de estas. Se activó la remoción de registros duplicados. El archivo de salida fue tipo logístico y en formato ASCII. Para los modelos a futuro en particular, se utilizaron los 6 modelos mencionados con anterioridad, proyectados para los años 2050 y 2070. Ambos con sus 4 escenarios diferentes.

5.3.7. Elaboración de material cartográfico.

5.3.7.1. Mapa de distribución potencial actual de *D. retusa*.

Se tomaron los resultados promediados de MaxEnt en formato ASCII para El Salvador y se llevaron a ArcMap. Aquí se definió el sistema de coordenadas como *World Geodetic System of 1984* (WGS 1984) con ayuda de la herramienta *Define Projection*, para después ser proyectado con *Project Raster* a Lambert cónico, El Salvador. Con el sistema de coordenadas listo, se reclasificó el ráster de valores continuos resultante de MaxEnt a un ráster binario de dos grupos: valores debajo de 0.4 se reclasificaron en 0 y valores arriba de 0.4 en 1 (figura 5).

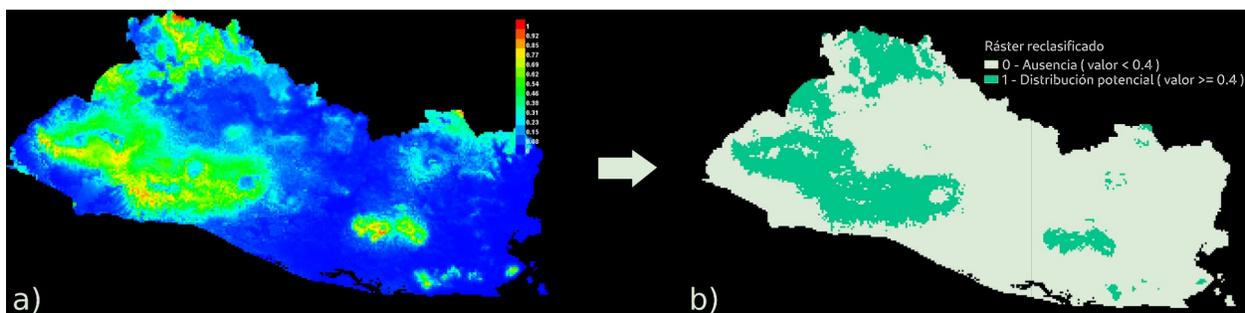


Figura 5. Proceso de reclasificación. El mapa de valores continuos resultante de MaxEnt (a) se reclasifica en uno de dos valores discretos (b).

5.3.7.2. Mapas de distribuciones a futuro de *D. retusa*.

Debido a que ambos años proyectados (2050 y 2070) poseen 4 RCP (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5), cada modelo produjo 8 rásteres diferentes. Para el análisis de cada escenario se utilizaron 6 rásteres de diferentes modelos para cada año proyectado y RCP.

Estos 6 rásteres se llevaron a ArcMap, donde pasaron por el mismo proceso anterior: se definió su sistema de coordenadas como WGS 1984, luego se proyectó al sistema cónico de Lambert para El Salvador. Las imágenes proyectadas se guardaron en formato TIFF (*Tagged Image File Format*, extensión “.tif”). Como explica la tabla 7, los archivos fueron reclasificados para convertir los valores continuos que devuelve MaxEnt en dos valores discretos: valores menores a 0.4 se reclasificaron a 0 y los mayores a 0.4 en 1. Este resultado también se guardó en formato TIFF.

Tabla 7. Valores reclasificados del modelo actual

Valores Originales	Valores Reclasificados	Significado
$p < 0.4$	0	Ausencia
$0.4 \leq p$	1	Distribución potencial

Las 6 imágenes reclasificadas resultantes se sumaron con la ayuda de la herramienta *Map Calculator* en ArcMap. Gracias a la reclasificación, solo se sumaron los píxeles con valores de 1. Esto permitió saber en cuáles píxeles estaban de acuerdo la mayoría simple de los modelos. Por ejemplo, si se tienen 3 imágenes ráster (A, B y C), se extraerán en una tercera (D) solo aquellos píxeles en donde coinciden las 3 en al menos dos ocasiones (ver figura 6). Para la creación de los mapas de distribución a futuro se extrajeron sólo aquellos píxeles donde al menos 4 modelos estuvieran de acuerdo.

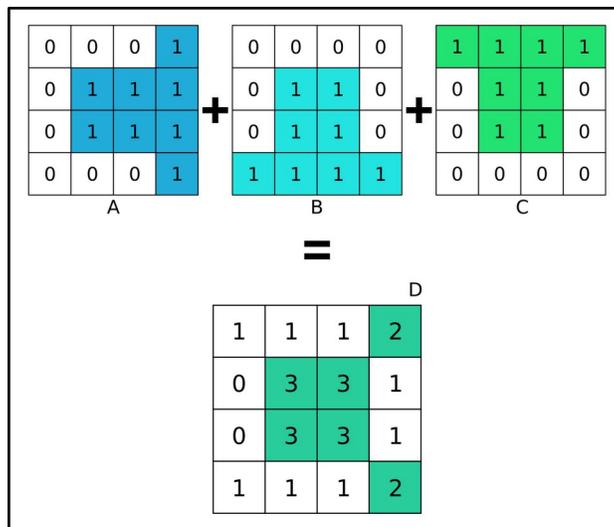


Figura 6. Extracción de píxeles coincidentes por mayoría simple.

Una vez extraídos los píxeles coincidentes, se guardaron los ráster resultantes y se analizaron las distribuciones espaciales de todos los ráster finales en dos capas: las departamentales y las altitudinales. Primero se aseguró que los valores de área de todos los cuadros de atributos estuvieran en km². Luego, con la ayuda de la herramienta *Zonal Statistics as Table*, se cruzó la información entre las distribuciones y las capas antes mencionadas.

Después de obtener estos datos se preparó el material cartográfico de todos los ráster reclasificados obtenidos. En el caso del mapa de distribución potencial actual, se colocaron capas de El Salvador y países vecinos, los cuerpos de agua dulce, el océano Pacífico y las Áreas Naturales Protegidas. Los mapas de las proyecciones a futuro se realizaron de la misma forma que la del presente, sin embargo se incorporó una cuadrícula que mostrara los 4 escenarios por año (2050 y 2070). Además, se les dio un color único a cada *RCP* para distinguirlos mejor.

6. Resultados.

6.1. Evaluación del modelo y variables bioclimáticas.

El modelo resultante muestra un AUC promedio de 0.846, lo que significa que se ajusta correctamente a los datos 84.6% de las veces. Según Phillips et al., 2006, el modelo se considera bueno para estimar los puntos de presencia de la especie contenidos en la muestra.

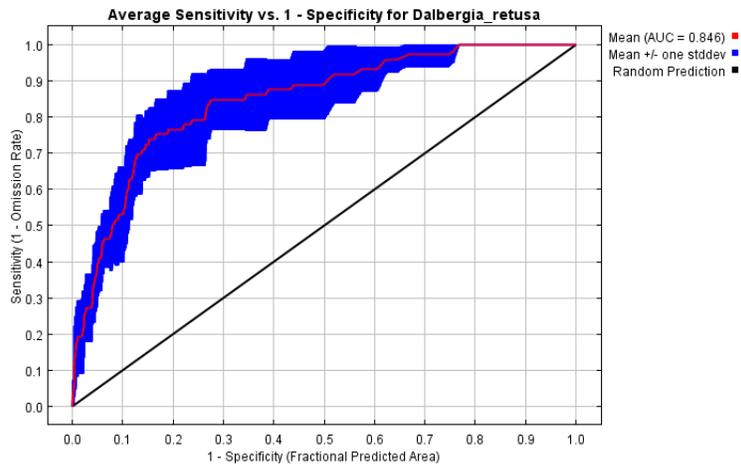


Figura 7. Curva ROC del modelo.

MaxEnt aplica por defecto dos evaluaciones a las variables climáticas: la contribución porcentual y la importancia de permutación. En el primer caso, la variable 10 (temperatura media del cuatrimestre más cálido) aportó en promedio 45.10%, seguido por las variables 4 (10.58%) y 6 (6.58%). Esta última, temperatura mínima del mes más frío, fue la más importante en el análisis de permutación, teniendo una importancia de 40.82%, seguido por las variables 12 (15%) y 17 (13.12%).

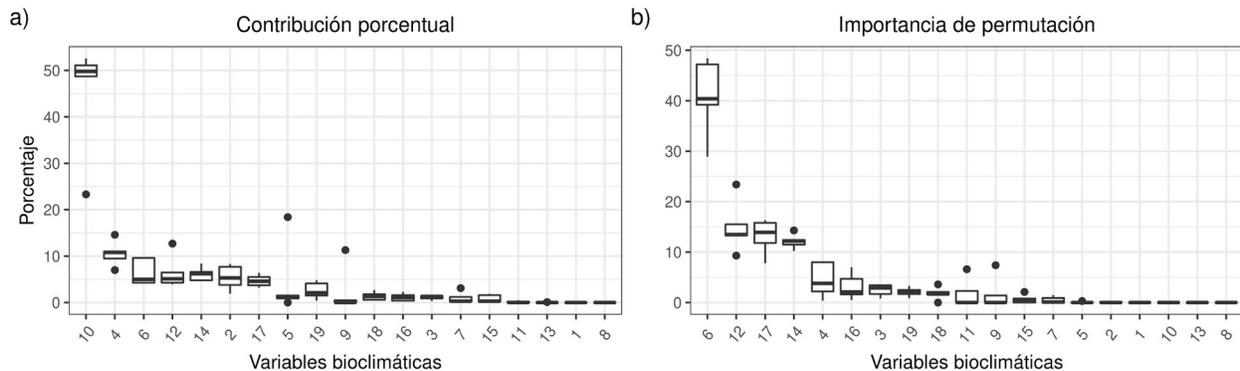


Figura 8. Contribución porcentual (a) e importancia de permutación (b) de las variables bioclimáticas en el modelo de distribución.

6.2. Distribución potencial actual.

El mapa de probabilidades de idoneidad para *D. retusa* se observa en la figura 9. Los colores indican la probabilidad de que el área sea adecuada para el desarrollo de la especie. Valores bajos, azules, sugieren que los ambientes no son propicios para el desarrollo de la especie. Los colores verdes sugieren que la especie podría desarrollarse bien en esos lugares y el color rojo señala una alta idoneidad del lugar para el desarrollo de *D. retusa*. De este mapa se extrajeron todos los puntos con probabilidades arriba de 0.4 para producir la figura 10.

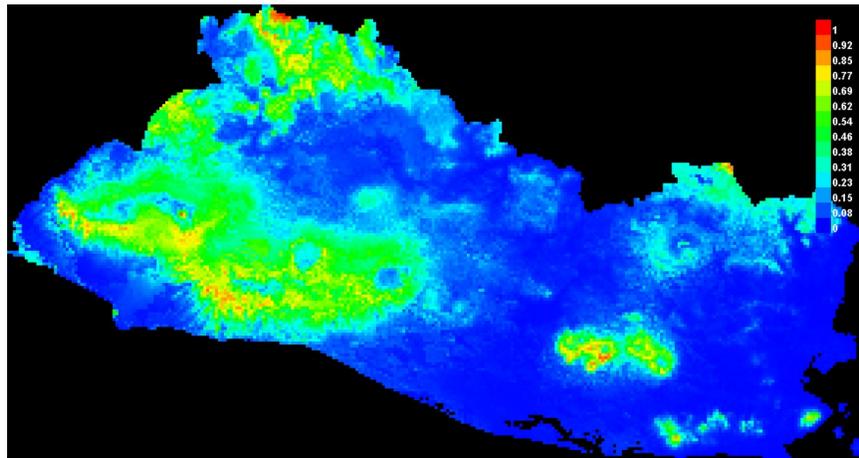
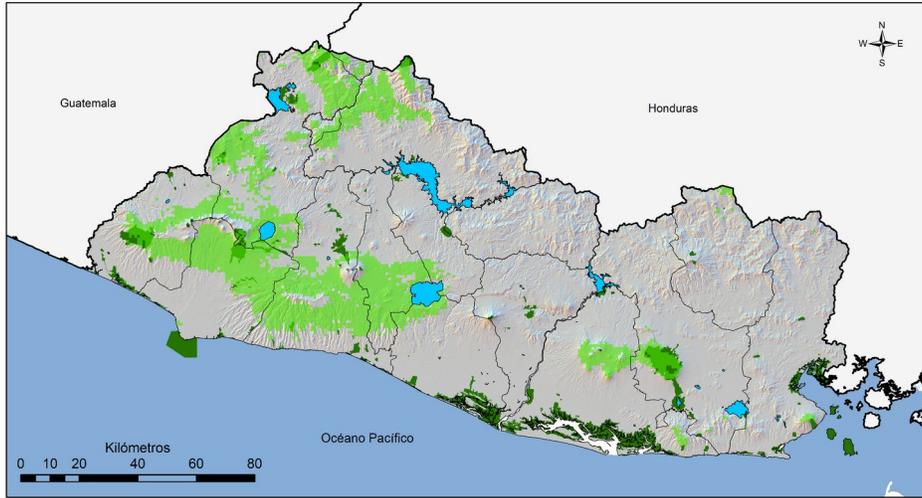


Figura 9. Mapa producto de MaxEnt.

El mapa final de distribución potencial actual de *D. retusa* tiende al occidente del país. Las áreas más grandes cubren buena parte de las cordilleras de Apaneca, el Bálamo, Alotepeque-Metapán y la sierra Tecapa-Chinameca. Hay puntos aislados como en el volcán de Conchagua y el norte de Morazán. Buena parte del Área Metropolitana de San Salvador es propicia para el desarrollo de *D. retusa*, según el modelo (ver figura 10).



Distribución potencial de *Dalbergia retusa*

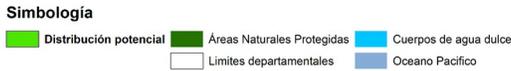


Figura 10. Distribución potencial actual de *D. retusa* en El Salvador.

Como se observa en la figura 11, los departamentos con mayor cantidad de km² son Santa Ana (770.648 km²), La Libertad (625.983 km²) y Sonsonate (511.749 km²). Exceptuando los dos departamentos que carecen de área idóneas para la especie (Cabañas y San Vicente), los tres departamentos con menor área son Cuscatlán (32.570 km²), Morazán (19.844 km²) y La Unión (11.405 km²). Siendo este último el segundo departamento más extenso, después de San Miguel.

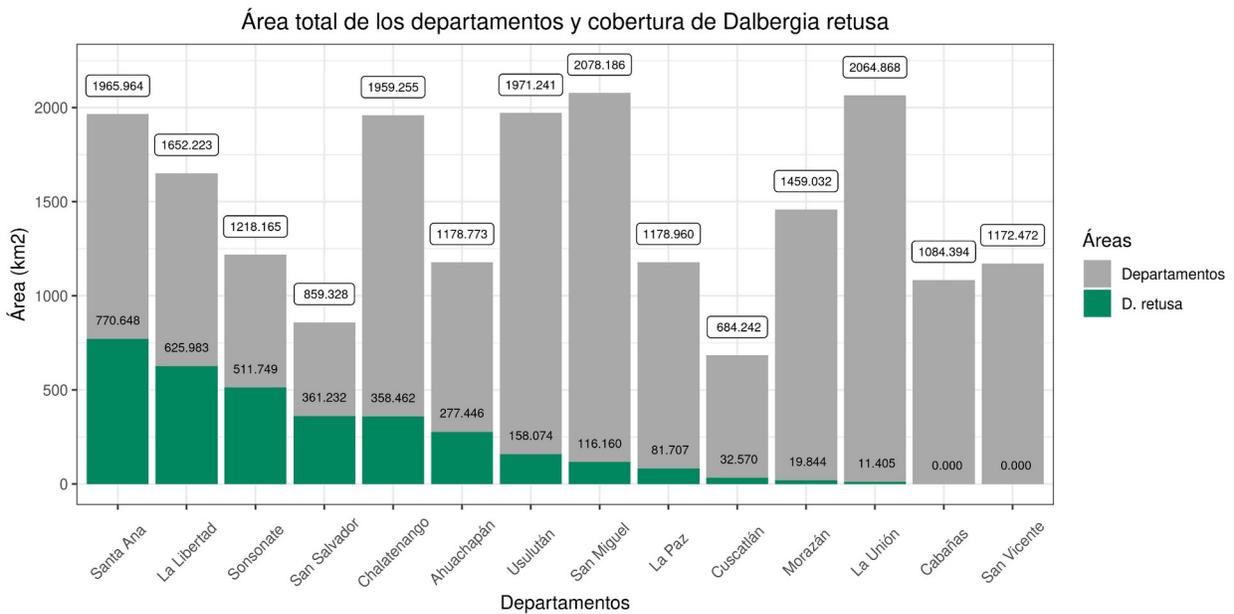


Figura 11. Área total y propicia para *D. retusa* por departamento (Km²).

Los rangos altitudinales con mayor área de distribución potencial para la especie son el de 900-1,200 msnm (1620.385 Km²), el de 1,200-1,500 msnm (956.607 Km²) y el de 600-900 msnm (478.970 Km²), como se observa en la figura 14. Solo estos tres equivalen al 91.89% del área de distribución potencial total en el país. El rango más alto y menos extenso, de 2,400-2,700 msnm, posee solo 26.639 Km² adecuados para el desarrollo de *D. retusa*. Seguido por el rango más bajo y más extenso del país, de 0-300 msnm, con 18.308 Km².

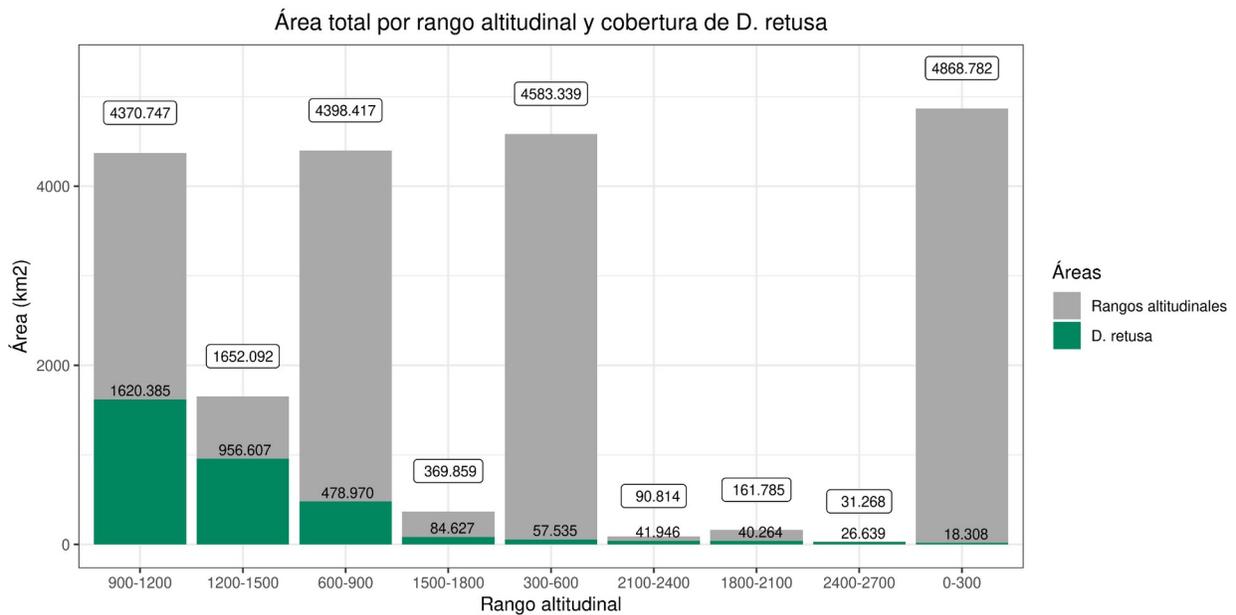
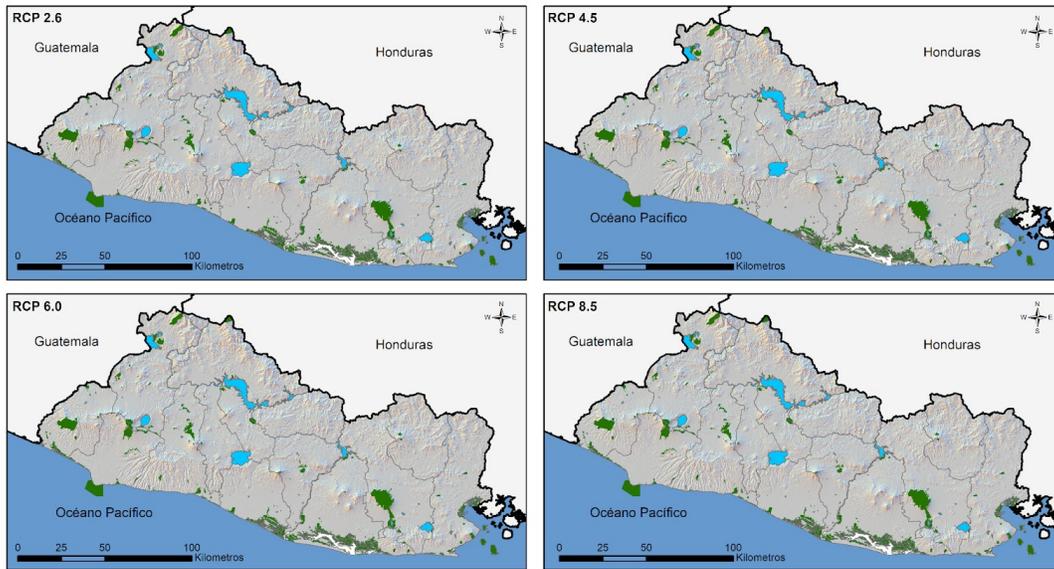


Figura 12. Área total y de distribución potencial por rango altitudinal.

6.3. Distribución potencial a futuro.

Para 2050 y 2070, los modelos predicen la inexistencia de hábitats propicios para el desarrollo de *D. retusa* en territorio salvadoreño (ver figura 13). Desde el RCP más optimista (2.6) hasta el más pesimista (8.5), ningún modelo cuenta con áreas que superen el umbral de 0.4, por lo que no existe área propicia para *Dalbergia retusa* en los modelos a futuro.



Proyecciones a futuro año 2050 de *Dalbergia retusa*

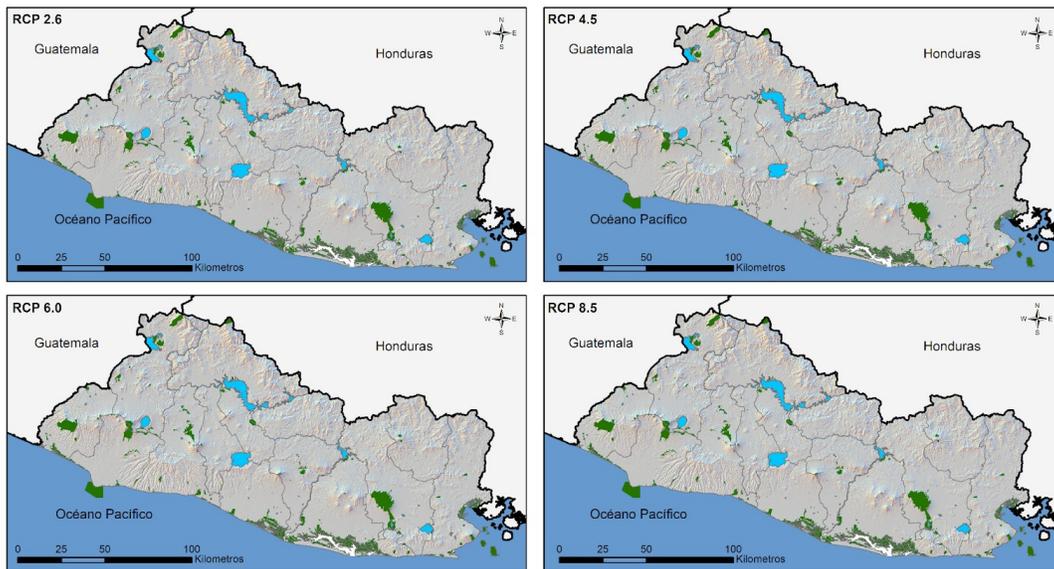
Escenarios Distribución Potencial



RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 6.0 RCP 8.5



Cuerpos de agua Océano Pacífico Áreas Naturales Protegidas



Proyecciones a futuro año 2070 de *Dalbergia retusa*

Escenarios Distribución Potencial



RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 6.0 RCP 8.5



Cuerpos de agua Océano Pacífico Áreas Naturales Protegidas

Figura 13. Distribución potencial a futuro de *D. retusa* en El Salvador.

Tabla 8. Área de distribución potencial de *D. retusa* por departamento

Departamento	Área de <i>D. retusa</i> (km²)	Área apropiada por Departamento.	Área de departamento (km²)	Área del Dpto apropiada para <i>D. retusa</i>	Porcentaje del área nacional cubierta por <i>D. retusa</i>
Ahuachapán	277.446	8.34%	1178.773	23.54%	1.35%
Cabañas	0.000	0.00%	1084.394	0.00%	0.00%
Chalatenango	358.462	10.78%	1959.255	18.30%	1.75%
Cuscatlán	32.570	0.98%	684.242	4.76%	0.16%
La Libertad	625.983	18.82%	1652.223	37.89%	3.05%
La Paz	81.707	2.46%	1178.960	6.93%	0.40%
La Unión	11.405	0.34%	2064.868	0.55%	0.06%
Morazán	19.844	0.60%	1459.032	1.36%	0.10%
San Miguel	116.160	3.49%	2078.186	5.59%	0.57%
San Salvador	361.232	10.86%	859.328	42.04%	1.76%
San Vicente	0.000	0.00%	1172.472	0.00%	0.00%
Santa Ana	770.648	23.18%	1965.964	39.20%	3.75%
Sonsonate	511.749	15.39%	1218.165	42.01%	2.49%
Usulután	158.074	4.75%	1971.241	8.02%	0.77%
Total:	3325.280	100.00%	20527.103	—	16.21%

Tabla 9. Área de distribución potencial de *D. retusa* por rango altitudinal

Rango altitudinal	Área cubierta por <i>D. retusa</i> (km²)	Porcentaje de distribución de <i>D. retusa</i> por rango altitudinal	Área del rango altitudinal (km²)	Área del rango apropiada para <i>D. retusa</i>	Porcentaje del área nacional cubierta por <i>D. retusa</i>
0-300	18.308	0.55%	4868.782	0.38%	0.09%
300-600	57.535	1.73%	4583.339	1.28%	0.28%
600-900	478.970	14.40%	4398.417	10.89%	2.33%
900-1200	1620.385	48.73%	4370.747	37.07%	7.89%
1200-1500	956.607	28.77%	1652.092	57.90%	4.66%
1500-1800	84.627	2.54%	369.859	22.88%	0.41%
1800-2100	40.264	1.21%	161.785	24.89%	0.20%
2100-2400	41.946	1.26%	90.814	46.19%	0.20%
2400-2700	26.639	0.80%	31.268	85.20%	0.13%
Total:	3325.280	100.00%	20527.103	—	16.20%

7. Discusión.

7.1. Resultados de los modelos.

La temperatura media del cuatrimestre más cálido (bio 10) y la temperatura mínima del mes más frío (bio 6) son las variables más importantes en contribución porcentual y en el análisis de permutación, respectivamente. Esto sugiere una posible sensibilidad de la especie a las temperaturas. Debido a que *D. retusa* prefiere temperaturas cálidas entre los 24° y 32° C (Khiem Meyrat, 2017) e incluso germina arriba de los 40° (García & Di Stéfano, 2000), se podría suponer que la sensibilidad es a bajas temperaturas. No obstante, esta suposición no concuerda con lo observado en nuestro modelo. La idoneidad del área aumenta según disminuyen los valores de las variables, como se observa en la figura 14.

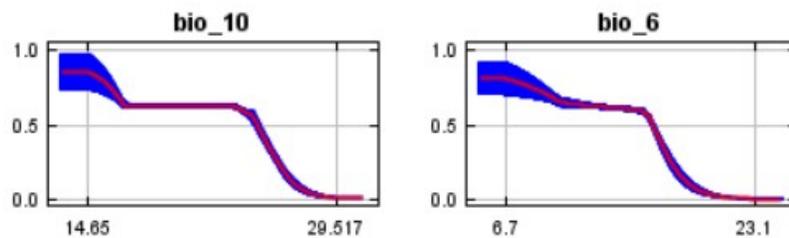


Figura 14. Curvas de respuestas de las variables 10 y 6.

En El Salvador, donde la temperatura varía poco por estación y los cambios de esta dependen más de la altitud (Oliver, 2005), temperaturas entre los 24° y 32° C son comunes entre los 0 y 800 msnm (MARN 2018). Este es el rango sugerido en la literatura (Condit et al., 2010; Khiem Meyrat, 2017) y donde se esperaría encontrar la especie y su distribución potencial. Además tiene sentido ecológico, pues la especie es típica de bosques secos (Leiva et al., 2009; McClellan et al., 2018; Ulate, 2011), con un eficiente manejo del agua (Cernusak et al., 2007; Sinacore et al., 2020). Sin embargo, el modelo muestra que el 77.5% de la distribución potencial de *D. retusa* está entre los 900 y 1,500 msnm, donde la temperatura promedio está entre los 16° y 22° C (MARN 2018). Por debajo de lo esperado.

Es posible que *D. retusa* se encuentre a estas elevaciones, existe un registro de la especie en Nicaragua arriba de los 900 msnm (A. Laguna - 310 - MO). Tampoco se puede descartar que la especie sea escasa a menores altitudes debido a características propias del país, como la extensa deforestación de sus

hábitats, que se remonta a la época pre-colombina (Dull, 2008). Por ejemplo, el bosque seco cubría en 2010 solo el 0.7% de El Salvador (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010). Aunque esto es factible, la vasta distribución potencial a estas altitudes asignada por el modelo no concuerda con la literatura y es probable que esta sea el resultado de algún tipo de sesgo. No es necesario que los datos de presencia utilizados en MaxEnt sean incorrectos para que esto ocurra, basta con concentrar los registros en una sola región (Kramer-Schadt et al., 2013).

Se sabe que MaxEnt es sensible a los vacíos de información debido a que trabaja con datos de presencia (Phillips et al., 2009). Por tanto no es extraño que en la figura 10 la distribución potencial se concentre en el occidente del país, si sabemos que el 81.48% de las observaciones de la especie se hicieron en solo 4 departamentos: Chalatenango (27), La Libertad (33), Santa Ana (11) y Sonsonate (17). Solo 11 observaciones en total se recolectaron en 2 de los 8 departamentos al este de San Salvador (San Miguel y Usulután), cuando esta zona abarca cerca del 56.96% del territorio del país. Aquí es donde se ubican los tres departamentos más extensos de El Salvador y el 64.60% de sus bosques latifoliados (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

La zona oriental es en promedio más caliente y más seca que el resto del país. Hacer un mayor esfuerzo de muestreo en esta zona podría eliminar el sesgo de la distribución potencial de la especie, que influye en las distribuciones a futuro. En nuestras proyecciones a 2050 y 2070 ningún escenario presenta distribución potencial para *D. retusa*. Dado que la temperatura es una variable importante para el modelo, es creíble que el incremento de estas en los modelos a futuro provoque bajas probabilidades en la idoneidad del clima para la especie. Si nuestra suposición del sesgo en la altitud es acertada, corregirlo podría brindar resultados más favorables para la especie a futuro, que estarían en línea con proyecciones similares de otras especies del género *Dalbergia* (Liu et al., 2019; Yuheng et al., 2021).

Una posibilidad es que esta área no se considere apropiada para la especie, sin embargo oriente comparte características climáticas con la vertiente pacífica de Nicaragua (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2015), donde se tienen múltiples registros de *D. retusa* (W. D. Stevens - 9769 - MO, W. D. Stevens - 22261 - MO, R. M. Rueda - 14043 - MO, R. M. Rueda - 7426 - MO).

Estas consideraciones ya fueron hechas por el MARN, donde se encuentran trabajando en mejorar los muestreos, y por tanto los datos utilizados para desarrollar los modelos (Carlos Rivera, comunicación personal). Tomando en cuenta los aciertos y errores cometidos a lo largo de este proceso. De modo que los resultados de la pasantía no son ni concluyentes, ni finales. A pesar de esto, lo cierto es que *D. retusa* es una especie amenazada desde diferentes frentes. La especie es escasa en su hábitat natural (el bosque seco), este es uno de los ecosistemas más deteriorados del planeta y del país, con una larga historia de deforestación (Dull, 2008) y existe una creciente demanda por la madera de la especie, sin importar si esta se produce de forma sostenible.

7.2. Experiencia de pasantía.

A lo largo de la pasantía el estudiante adquirió diferentes conocimientos, además de refinar aquellos con los que ya contaba. Todas las actividades realizadas en la pasantía presentaron retos que debieron superarse aprendiendo algo nuevo. Uno de los más grandes se presentó al inicio de esta. Originalmente se pensaba modelar las distribuciones con Wallace, sin embargo el proceso era muy lento y daba bastantes errores, por lo que se tomó la decisión de modelar las distribuciones con MaxEnt. Aunque este ya está incorporado en Wallace, el proceso es diferente y fue necesario capacitar al estudiante en esta herramienta, lo que llevó un poco más de tiempo.

En otras actividades no hubo necesidad de cambiar la metodología original, sin embargo el pasante siempre mostró iniciativa para automatizar los procesos. Para agilizar la descarga desde *GBIF Occurrences* el estudiante escribió un pequeño script en Python. Powershell, GIT y regex fueron fundamentales para ordenar, limpiar, corregir y concatenar los datos de presencia. Algunos procesos realizados con los resultados de MaxEnt se automatizaron mediante Model Builders y scripts de Python. Por último, con la ayuda de ArcMap y R se produjeron representaciones gráficas de los datos y el análisis de estos. Un resumen de todos los conocimientos adquiridos puede verse en la tabla 10.

Tabla 10. Conocimientos adquiridos

Nombre	Uso	Conocimiento adquirido
ArcMap	Análisis y preparación de material cartográfico de los modelos de distribución potencial de <i>D. retusa</i> .	Preparación de mapas, utilización de herramientas como <i>Extract by mask</i> , <i>ModelBuilder</i> , <i>Reclassify</i> , <i>Zonal Statistics as Table</i> , entre otros.
MaxEnt	Modelación de distribución de <i>D. retusa</i> .	Lógica tras los modelos de distribución de especies.
Powershell	Limpieza de datos y automatización del proceso.	<i>Scripting</i> , <i>Piping</i> , redacción de funciones, entre otras.
Regex	Limpieza y ordenamiento de texto.	Familiaridad con el lenguaje.
GIT	Mantener diferentes versiones de los <i>scripts</i> de Powershell, documentar cada cambio a estos.	Familiaridad con el ambiente y sus comandos más utilizados (git log, git branch, git add, git commit, etc.)
GPS	Toma de puntos georeferenciados para observaciones de <i>D. retusa</i> .	Uso de GPS.

8. Conclusiones.

1. Según el modelo, la especie es sumamente susceptible al aumento de la temperatura media del cuatrimestre más cálido y de la temperatura mínima del mes más frío.
2. Según el modelo, la mayoría de la distribución potencial actual de *D. retusa* en territorio salvadoreño está arriba de los 900 msnm, por encima de las altitudes esperadas entre 0 - 700 msnm.
3. Sin importar el año o el RCP, las proyecciones pronostican la extirpación de *D. retusa* de El Salvador en el futuro.

9. Recomendaciones.

1. Continuar los monitoreos de especies en todo el país.
2. Centrar los nuevos monitoreos de *D. retusa* en los departamentos que no fueron muestreados.
3. Plantear un flujo de trabajo para el procesamiento de los datos.
4. Consultar con otras naciones centroamericanas sus experiencias y conocimientos de la especie.

10. Bibliografía.

- Austin, M. P., & Van Niel, K. P. (2011). Improving species distribution models for climate change studies: Variable selection and scale. *Journal of Biogeography*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02416.x>
- Aquino, A. (2020). Informe final de levantamiento de tres parcelas de muestreo permanente en *Dalbergia* spp. en El Salvador.
- Berendsohn, W. G., Gruber, A. K., & Monterrosa Salomón, J. (2009). *Nova Silva Cuscatlanica*. Parte 1: Angiospermae -Familias A a L (1ª ed., Vol. 1).
- Cernusak, L. A., Aranda, J., Marshall, J. D., & Winter, K. (2007). Large variation in whole-plant water-use efficiency among tropical tree species. *New Phytologist*, 173(2), 294–305. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01913.x>
- CITES trade statistics derived from the CITES Trade Database, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK." UNEP-WCMC and the CITES Secretariat would appreciate receiving copies of any products or reports produced using data derived from the CITES Trade Database.
- Condit, R., Pérez, R., & Daguerre, N. (2010). *Trees of Panama and Costa Rica*. Princeton University Press.
- Constitución de la República de El Salvador [Const.] Art. 117. 15 de diciembre de 1983. (El Salvador)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL. (2015). *Cambio Climático en Centroamérica: Impactos potenciales y opciones de política pública*. CEPAL.
- Dobson A, Wolters V, Xenopoulos MA. (2005). Biodiversity across Scenarios. En: *Millennium Ecosystem Assessment*. New York: Island press.

- Dull, R. A. (2008). Unpacking El Salvador's ecological predicament: Theoretical templates and "long-view" ecologies. *Global Environmental Change*, 18(2), 319–329.
- Esri. (s. f.). Vista general de la caja de herramientas de 3D Analyst—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Recuperado 18 de diciembre de 2021, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/an-overview-of-the-3d-analyst-toolbox.htm>
- Friedl, J. E. F. (2006). *Mastering Regular Expressions* (Third edition). O'Reilly Media.
- García, E. G., & Di Stéfano, J. F. (2000). Temperatura y germinación de las semillas de *Dalbergia retusa* (Papilionaceae), árbol en peligro de extinción. *Revista de Biología Tropical*, 48(1), 43–45.
- GBIF.org (15 Abril 2021) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.cjphj>
- Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., & Elith, J. (2014). Maxent is not a presence–absence method: A comment on Thibaud et al. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1192–1197. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12252>
- Imbach P, Chou SC, Lyra A, Rodrigues D, Rodriguez D, Latinovic D, Siqueira G, Silva A, Garofolo L, Georgiou S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLOS ONE*. 13(4):e0193570.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jones, D., & Hicks, J. (2016). *Learn Windows PowerShell in a Month of Lunches, Third Edition* (3^a ed.).
- Khiem Meyrat, A. (2017). *Biología y Silvicultura de las especies de Dalbergia en América Central*.
- Kramer-Schadt, S., Niedballa, J., Pilgrim, J. D., Schröder, B., Lindenborn, J., Reinfelder, V., Stillfried,

M., Heckmann, I., Scharf, A. K., Augeri, D. M., Cheyne, S. M., Hearn, A. J., Ross, J., Macdonald, D. W., Mathai, J., Eaton, J., Marshall, A. J., Semiadi, G., Rustom, R., ... Wilting, A. (2013). The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. *Diversity and Distributions*, 19(11), 1366–1379.

Kruschke, J. K. (2015). *Doing Bayesian Data Analysis: A Tutorial with R, JAGS and Stan* (2^a ed.). Academic Press.

Law, M., & Collins, A. (2021). *Getting to Know ArcGIS Desktop 10.8* (6th edition). Esri Press.

Leiva, J. A., Rocha, O. J., Mata, R., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical*, 57(3), 817–836.

Ley de Áreas Naturales Protegidas. 2015. *Diario Oficial de la República de El Salvador, América Central* TOMO No. 366, San Salvador, 15 de febrero de 2005.

Liu, Y., Huang, P., Lin, F., Yang, W., Gaisberger, H., Christopher, K., & Zheng, Y. (2019). MaxEnt modelling for predicting the potential distribution of a near threatened rosewood species (*Dalbergia cultrata* Graham ex Benth). *Ecological Engineering*, 141, 105612. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105612>

Mantyka-Pringle CS, Visconti P, Di Marco M, Martin TG, Rondinini C, Rhodes JR. 2015. Climate change modifies risk of global biodiversity loss due to land-cover change. *Biological*

Matloff, N. (2011). *Art of R Programming: A Tour of Statistical Software Design* (1^a ed.). NoStarchPress.

McClellan, M., Montgomery, R., Nelson, K., & Becknell, J. (2018). Comparing forest structure and biodiversity on private and public land: Secondary tropical dry forests in Costa Rica. *Biotropica*, 50(3), 510–519.

- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Acuerdo N° 74. Listado oficial de especies de vida silvestre amenazadas o en peligro de extinción | CIDOC Virtual.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). Modelos de simulación y escenarios climáticos para El Salvador. <http://rcc.marn.gob.sv/xmlui/handle/123456789/34>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Inventario nacional de bosques de El Salvador. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/inventario-nacional-de-bosques-de-el-salvador/>
- NOAA Global Monitoring Laboratory. (2021). NOAA Global Monitoring Laboratory—THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI). <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
- Oliver, J. E. (Ed.). (2005). *Encyclopedia of World Climatology* (2005. Corr. 2nd edition). Springer.
- Payette, B., & Siddaway, R. (2017). *Windows PowerShell in Action, Third Edition* (3^a ed.). <https://www.manning.com/books/windows-powershell-in-action-third-edition>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19(1), 181–197. <https://doi.org/10.1890/07-2153.1>
- Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, 143(1), 144–155.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020>

R Core Team. (2019). R: What is R? <https://www.r-project.org/about.html>

Rivera, C. G., Funes Hernández, K. T., Merino Villalta, J. F., & Beltrán Sánchez, A. V. (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 Minerva*, 4(2), 125–142.

Sinacore, K., Asbjornsen, H., Hernandez-Santana, V., & Hall, J. S. (2020). Differential and dynamic water regulation responses to El Niño for monospecific and mixed species planted forests. *Ecohydrology*, 13(7), e2238.

Tilman M., D. (2016). *The Book of R: A First Course in Programming and Statistics* (1^a ed.). NoStarchPress.

Ulate, G. V. (2011). Estudio Cartográfico De Los Cambios De La Vegetación De Sabana En El Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica, 1985 – 2009. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47), 71–95.

Umali, R. (2015). *Learn Git in a Month of Lunches* (1^a ed.). <https://www.manning.com/books/learn-git-in-a-month-of-lunches>

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **109**, 5 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

What is GBIF? (s. f.). Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://www.gbif.org/what-is-gbif>

Wenbin, H., & Xiufang, S. (2013). Tropical Hardwood Flows in China—Forest Trends. <https://www.forest-trends.org/publications/tropical-hardwood-flows-in-china/>

Wickham, H. (2011). Ggplot2. *WIREs Computational Statistics*, 3(2), 180–185.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd ed. 2016 edition). Springer.

Yuheng C., Shuangfei L. U., & Lingfeng M. a. O. (2021). Prediction of future changes in suitable distribution area for rare tree species of *Dalbergia*. *浙江农林大学学报*, 38(4), 837–845.
<https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20200522>