

**Distribución potencial y efecto del cambio climático de especies del género *Eurema*
(Lepidoptera: Papilionoidea: Pieridae) en paisajes fragmentados de la región nororiental
colombiana**

Yeferson Jesús Álvarez Gómez

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Biología
Pamplona, Colombia
2019

**Distribución potencial y efecto del cambio climático de especies del género *Eurema*
(Lepidoptera: Papilionoidea: Pieridae) en paisajes fragmentados de la región nororiental
colombiana**

Estudiante:

Yeferson Jesús Álvarez Gómez

Director:

B.Sc. M.Sc. Diego Armando Carrero Sarmiento
Universidad de Pamplona

Codirector:

B.Sc. Ph.D(e) Mónica María Albornoz Espinel
Pontificia Universidad Católica de Chile

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Biología
Pamplona, Colombia
2019

TRABAJO DE GRADO REALIZADO CON EL FIN DE OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGO DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

Dedicatoria

A la mujer que soñó, Deicy.

Mi ángel más grande, mi maestra eterna, madre, fuiste, eres y serás mi más grande amor.

A mi madre.

Edilma, por confiar plenamente en mí, sembrar la tranquilidad que necesité a lo largo de este proceso, los valores que me formaron como persona y despertar en mí la pasión por descubrir el mundo.

A mi otra madre.

Benigna, por enseñarme que un verdadero profesional debe caracterizarse por la humildad y la bondad, que se debe brillar con luz propia y seguir adelante sin importar qué.

A mi padre, mi verdadero padre.

Me enseñaste a luchar, a ser resiliente y que un padre va mucho más allá de un lazo de sangre, gracias por tanto, me gusta pensar que desde algún lugar miras mis triunfos y estás orgulloso de ellos.

*Mi abuela Rosa, mi casi hermana Emelly, mis hermosos primos Andrés, Johanna, Nicolle.
Por su apoyo sincero e incondicional, por motivarme a luchar, a leer, a investigar, a luchar para ser un ejemplo a seguir.*

Agradecimientos

A mi amigo, mi confidente.

Carlos Vargas, por motivarme, darme una nueva perspectiva de la vida y por vivir momentos de alegría y felicidad durante todo este trayecto.

A mis compañeros de vida, mis amigos.

En especial a Lizeth B., Mercedes V., Camila S. los seres que compartieron conmigo sus enseñanzas, vivieron conmigo este proceso, y me dieron voces de aliento en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi familia, mis tías.

Aquellos que confiaron en mi potencial y a los que no, me enseñaron a luchar, a seguir pese a las adversidades.

A todos mis amigos, compañeros, personas importantes.

Duván G., Juliana G., Carlos M., que aportaron un granito de arena en este proceso arduo.

Maestros.

Diego C., Mónica A., Aldemar A., Camilo O. por la paciencia, sus regaños, sus halagos, por tomarse el trabajo de transmitir sus conocimientos, por encaminarme en el camino correcto y fomentar en mí un espíritu investigativo.

Al laboratorio de entomología por ser mi segundo hogar, el lugar de mis alegrías y mis llantos, la cuna de mi espíritu investigativo, a la Universidad de Pamplona por ayudarme en este arduo proceso, y a todos aquellos que aportaron un granito de arena en este proceso, su presencia prevalecerá en mí.

Al Instituto de Investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, a la colección entomológica de la Universidad Industrial de Santander, al Museo de Historia Natural “Francisco Luis Gallego” de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por colaborar en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA..... | 14 |
| 2.1 Generalidades sobre mariposas..... | 14 |
| 2.2 Superfamilia Papilionoidea..... | 15 |
| 2.3 Familia Pieridae | 16 |
| 2.3.1 Género <i>Eurema</i> (Hübner, 1819) | 17 |
| 2.4 Coberturas vegetales..... | 17 |
| 2.5 Metodología CORINE land cover | 17 |
| 2.6 El cambio climático | 18 |
| 2.7 Efecto del cambio climático sobre las poblaciones de mariposas | 19 |
| 2.8 Distribución actual y potencial de especies. | 20 |
| 2.9 Modelamiento de nicho..... | 21 |
| 3. OBJETIVOS | 25 |
| 3.1 Objetivo general..... | 25 |
| 3.2 Objetivos específicos | 25 |
| 4. METODOLOGÍA | 26 |
| 4.1 Analizar la riqueza y representatividad del género <i>Eurema</i> | 26 |
| 4.1.1 Área de estudio..... | 26 |
| 4.1.2 Obtención de los datos | 27 |
| 4.1.3 Diversidad de <i>Eurema</i> en el nororiente colombiano | 29 |
| 4.2 Determinar distribución potencial actual | 30 |
| 4.2.1 Obtención y procesamiento de datos climáticos | 30 |
| 4.3 Modelado del efecto del cambio climático..... | 34 |
| 4.3.1 Selección de las variables ambientales | 34 |
| 4.3.2 Modelo de distribución actual y potencial de las especies en un escenario de cambio climático..... | 35 |
| 4.3.2.1 Modelos lineales generalizados (GLM) | 36 |
| 4.3.2.2 Modelos aditivos generalizados (GAM) | 37 |
| 4.3.2.3 Modelo de máxima entropía (MaxEnt) | 38 |
| 4.3.2.4 Árboles de clasificación (Random Forest) | 39 |
| 4.4 Importancia de las variables ambientales | 40 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.5 | Evaluación del desempeño de los algoritmos | 40 |
| 5. | RESULTADOS | 41 |
| 5.1 | Riqueza y representatividad del género <i>eurema</i> en el nororiente colombiano | 41 |
| 5.1.1 | Composición del ensamblaje de mariposas | 41 |
| 5.1.2 | Registros de presencia/puntos de fondo | 44 |
| 5.2 | Determinar la distribución potencial actual | 45 |
| 5.2.1 | Selección de las variables ambientales | 45 |
| 5.2.1.1 | Variables para la distribución actual | 45 |
| 5.2.1.2 | Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2050 | 51 |
| | Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2050. | 52 |
| 5.2.1.3 | Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2050 | 56 |
| 5.2.1.4 | Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2070 | 61 |
| 5.2.1.5 | Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2070 | 66 |
| 5.2.2 | Modelos de distribución de especies | 71 |
| 5.2.2.1 | <i>Eurema elathea</i> | 71 |
| 5.2.2.2 | <i>Eurema albula</i> | 78 |
| 5.2.2.3 | <i>Eurema daira</i> | 83 |
| 6. | DISCUSIÓN | 89 |
| 6.1 | Composición del ensamblaje de mariposas | 89 |
| 6.2 | Desempeño de los algoritmos | 90 |
| 6.3 | Modelos de distribución | 91 |
| 7. | CONCLUSIONES | 95 |
| 8. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 96 |
| | Royle, J., Chandler, R., Yackulic, C., Nichols, N. (2012). Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. <i>British ecological society</i> , 3(3). Recuperado en: https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-210x.2011.00182.x.117 | |
| 9. | ANEXOS | 123 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Variables bioclimáticas utilizadas para determinar la distribución potencial actual de las especies del género <i>Eurema</i> en el nororiente colombiano. Obtenidas desde ENVIREM. 2019. ... | 30 |
| Tabla 2. Variables bioclimáticas utilizadas para determinar la distribución potencial futura de las especies del género <i>Eurema</i> en el nororiente colombiano. Obtenidas desde Worldclim2. 2019.. | 33 |
| Tabla 3. Completitud del muestreo. n: abundancia; S.obs: Riqueza observada; S.esp: Riqueza esperada; SC: completitud del muestreo; f1: singletons; f2: doubletons. | 41 |
| Tabla 4. Diversidad de especies en números efectivos, mostrando los valores observados y esperados para cada cobertura vegetal estudiada. | 43 |
| Tabla 5. Análisis de correlación de Pearson para las variables de distribución actual. | 46 |
| Tabla 6. Análisis VIF de las variables ambientales para la distribución actual | 50 |
| Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2050. | 52 |
| Tabla 8. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050. | 55 |
| Tabla 9. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2050 | 57 |
| Tabla 10. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050. | 60 |
| Tabla 11. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2070 | 62 |
| Tabla 12. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050. | 65 |
| Tabla 13. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2070 | 67 |
| Tabla 14. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070. | 70 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplar de una mariposa de la superfamilia Papilionoidea (<i>Eurema daira</i>). Tomado de García-Robledo et al., 2002. | 15 |
| Figura 2. Ejemplar de una mariposa de la superfamilia Pieridae (<i>Eurema salome</i>). Tomado de Suarez, 2014 | 16 |
| Figura 3. Ubicación del área de estudio, Departamentos Norte de Santander y Santander en el nororiente Colombiano, 2019. | 27 |
| Figura 4. Curva de distribución de las especies del género <i>Eurema</i> en los cuatro tipos de coberturas vegetales del estudio. <i>Eurema elathea</i> (Ee), <i>Eurema arbela</i> (Ear), <i>Eurema albula</i> (Eal), <i>Eurema daira</i> (Ed), <i>Eurema phiale</i> (Ep). | 42 |
| Figura 5. Perfiles de diversidad alfa de mariposas del género <i>Eurema</i> en los distintos tipos de coberturas vegetales. Se indica riqueza de especies (0D), exponencial de Shannon ($^1D = \exp H'$) y especies abundantes (2D) o inverso de Simpson. (Jost, 2007). | 43 |
| Figura 6. Registros de presencia de las especies del género <i>Eurema</i> en el nororiente colombiano posterior a la depuración de los datos. | 45 |
| Figura 7. Correlograma de las variables ambientales para la distribución actual. | 48 |
| Figura 8. Dendrograma de las variables ambientales para la distribución actual. | 49 |
| Figura 9. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050. | 53 |
| Figura 10. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050. | 54 |
| Figura 11. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050. | 58 |
| Figura 12. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050. | 59 |
| Figura 13. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2070. | 63 |
| Figura 14. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2070. | 64 |
| Figura 15. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070. | 68 |
| Figura 16. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070. | 69 |
| Figura 17. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema elathea</i> utilizando el algoritmo GLM. | 72 |
| Figura 18. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema elathea</i> utilizando el algoritmo GAM. | 74 |
| Figura 19. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema elathea</i> utilizando el algoritmo MaxEnt. | 76 |
| Figura 20. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema elathea</i> utilizando el algoritmo Random Forest. | 77 |
| Figura 21. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema albula</i> utilizando el algoritmo GLM. | 79 |
| Figura 22. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema albula</i> utilizando el algoritmo GAM. | 80 |
| Figura 23. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema albula</i> utilizando el algoritmo MaxEnt. | 81 |
| Figura 24. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema albula</i> utilizando el algoritmo Random Forest. | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 25. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema daira</i> utilizando el algoritmo GLM..... | 84 |
| Figura 26. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema daira</i> utilizando el algoritmo GAM..... | 85 |
| Figura 27. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema daira</i> utilizando el algoritmo MaxEnt. | 86 |
| Figura 28. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie <i>Eurema daira</i> utilizando el algoritmo Random Forest..... | 88 |

1. INTRODUCCIÓN

La región nororiental colombiana cuenta con una amplia heterogeneidad de paisajes, los cuales se encuentran en alto grado de amenaza debido al acelerado calentamiento de la superficie terrestre y a los procesos antrópicos que alteran la composición original, poniendo en riesgo la diversidad biológica presente, afectando la estructura y composición de las especies asociadas a estos paisajes (Casas-Pinilla et al., 2017).

El cambio climático se define como una modificación persistente e identificable del estado del clima por efecto de la actividad humana o por variabilidad natural, actualmente se usa este término para referirse al acelerado calentamiento que se viene produciendo en la superficie terrestre como resultado de la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Vargas, 2009). Este aumento en la temperatura de la superficie de la tierra, modifica los patrones de precipitación, afectando la distribución, tamaño y estructura en las poblaciones de las especies (Botero, 2015), siendo más afectadas aquellas especies que poseen una dependencia hacia umbrales climáticos específicos (Romo et al., 2015; García, 2018), en este contexto, las especies deberán enfrentar cambios drásticos en el ambiente, responder en tiempos relativamente cortos y su permanencia en el hábitat dependerá de la habilidad que posean para adaptarse o migrar a lugares que tengan condiciones climáticas óptimas (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Las mariposas diurnas comprenden un grupo importante para el estudio y monitoreo de la diversidad, debido a que presentan ciclos de vida cortos, una alta sensibilidad a la deforestación, poseen estrecha afinidad con los principales grupos de plantas y responden a las alteraciones ambientales de manera rápida, por tanto, la presencia de ciertos taxones puede indicar la continuidad de comunidades, y su ausencia, una fragmentación o alteración de la integridad del paisaje (Boom-urueta et al., 2013). El conocimiento avanzado sobre las mariposas, su ubicuidad,

abundancia y la fácil recolección e identificación, ha contribuido a que sean consideradas un grupo indicador de diversidad, ya que presentan cambios en su composición dependiendo del grado de perturbación en su ecosistema, es así como las actividades humanas (la agricultura, ganadería, minería y contaminación) generan cambios drásticos en la cobertura vegetal y la composición de este grupo de individuos, por lo que es importante contribuir al desarrollo del conocimiento de sus comunidades (Álvarez, Ibarra y Escalante, 2016; Olarte-Quiñonez, 2016).

Los valores altos de abundancia y riqueza de lepidópteros en zonas de vegetación conservada, destacan la importancia del mantenimiento de las coberturas vegetales originales, ya que pueden estar relacionados con la oferta de recursos óptimos para el desarrollo del ciclo de vida de las especies (Carrero et al., 2013; Montero y Ortiz-Pérez, 2013), así mismo, el análisis de los factores que condicionan su distribución geográfica constituye una herramienta útil para comprender las tendencias de la diversidad biológica a gran escala (Romo, Sanabria y García, 2013).

La distribución de las mariposas diurnas está condicionada por múltiples factores, ya sean climáticos, ambientales o bióticos (p.ej. competencia y depredación), por ende, el conocimiento preciso de las áreas de distribución de las especies constituye una base para el estudio de su ecología, biogeografía y evolución. Por tal razón es de gran importancia relizar modelos de distribución que permitan extrapolar información puntual a partir de la asociación especie-ambiente, así como cuantificar relaciones que previamente se habían tratado sólo de forma cualitativa, esta cuantificación de las relaciones, representa el núcleo de modelación geográfica predictiva en ecología (Azor y Barro, 2014).

La distribución conocida de una especie es, en la mayoría de los casos incompleta en comparación con la distribución real de la misma, dado el elevado costo y esfuerzo para muestrear mariposas a una escala espacial fina cada vez es de mayor utilidad la aplicación de modelos para determinar

los posibles enclaves donde las especies objeto de estudio pudieran estar presentes. Estas áreas “potenciales” son muy útiles para el desarrollo de políticas de conservación, para la protección de las especies o de los hábitats a los que se asocian (Heikkinen et al., 2007; Obregón et al., 2014). Por lo cual, en este estudio se determinó la distribución actual y potencial de especies del género *Eurema* en paisajes fragmentados de la región nororiental de Colombia, ya que este tipo de estudios genera información de la respuesta de las especies a largo plazo en diferentes escenarios de cambio climático, en especial, especies potencialmente indicadoras como lo son los piéridos, que poseen una gran diversidad de especies, son relativamente comunes y poseen una amplia distribución.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Generalidades sobre mariposas

Las mariposas diurnas (Lepidoptera), son los insectos mejor descritos y conocidos taxonómicamente, poseen una estrecha relación con las plantas y su abundancia, diversidad y facilidad de observación las convierten en excelentes indicadores biológicos, por ser fieles a los microhábitats y especialistas sobre un taxón de planta que utilizan como alimento en su estado larval (Vásquez et al., 2017).

En Colombia, se registran 3274 especies de las cuales 350 son endémicas, su gran diversidad es producto del posicionamiento geográfico, la topografía, el mosaico de climas, suelos, fisiología e historia geológica, además, estos insectos pueden ser influenciados por condiciones de heterogeneidad ambiental e influencia antropogénica (Drewniak et al., 2016; Pérez, Sánchez & Salcedo, 2017).

Los lepidópteros se caracterizan morfológicamente por tres regiones, la cabeza, que posee los principales órganos sensitivos y de nutrición; el tórax, tiene los órganos de locomoción; y el abdomen, dónde se incluyen los órganos de reproducción, asimilación, respiración y circulación. El tamaño de los individuos adultos varía desde tres hasta treinta milímetros, sus alas se encuentran cubiertas por escamas y pelos, característica que le proporciona el nombre al grupo el cuál proviene de las raíces griegas *lepis*: escama y *pteron*: ala (Beutelspacher, 2013; Pérez, 2017). Las formas en que los imagos se alimentan (néctar, savia de las plantas, excremento y jugo de las frutas) brinda a este grupo de insectos una importancia ecológica como polinizadores, favoreciendo la fecundación cruzada entre las especies vegetales (Martínez-Noble et al., 2015; Moreno-M & Acuña-Vargas, 2015).

2.2 Superfamilia Papilionoidea



Figura 1. Ejemplar de una mariposa de la superfamilia Papilionoidea (*Eurema daira*). Tomado de García-Robledo et al., 2002.

La superfamilia Papilionoidea incluye todas las mariposas diurnas, las cuales se caracterizan por poseer ojos poco destacados y antenas insertas cerca una de la otra, comprende ocho familias, Papilionidae, Nymphalidae, Pieridae, Lycaenidae y Riodinidae consideradas como las mariposas verdaderas; Hesperidae o mariposas saltarinas y Hedyliidae conocidas como mariposas parecidas a las polillas. De acuerdo con algunos autores, los mariposas saltarinas (“*skippers*” en inglés) o hespéridos se clasifican en una superfamilia aparte, Hesperioidea (Scott, 1985; Ackery et al., 1999; Warren 2000; Salinas-Gutierrez et al. 2005; Warren et al., 2008), sin embargo, recientes estudios moleculares confirmaron su inclusión en la superfamilia Papilionoidea (De Jong et al., 1996; Lamas, 2008, Regier et al., 2009), de la misma manera, la familia Hedyliidae, la cual posee características compartidas con las mariposas y las polillas, fue integrada dentro de la superfamilia Papilionoidea (Regier et al., 2009; Pérez, 2017).

2.3 Familia Pieridae



Figura 2. Ejemplar de una mariposa de la superfamilia Pieridae (*Eurema salome*). Tomado de Suarez, 2014

La familia Pieridae (Donponchel, 1835) se compone de mariposas de tamaño variado, se caracterizan por poseer colores claros como amarillo, blanco o naranja; con frecuencia, sus alas presentan diferentes diseños de color negro, antenas clavadas, patas delanteras bien desarrolladas para ambos sexos y garras tarsales apendiculadas o bifidas. Además, tienen un fuerte dimorfismo sexual, siendo por lo general las hembras más manchadas que los machos y de colores más oscuros (Andrade, 1990; Peña & Ugarte, 2006; Jimenez et al., 2009; Bravo-Velasquez, 2018).

La familia Pieridae se divide en cuatro subfamilias: Coliadinae, Dismorphiinae, Pierinae y Pseudopontiinae (está última presente en África con sólo una especie) (De Vries, 1987). Esta familia forma una comunidad con gran diversidad de especies (alrededor de 1200 spp.) en todos los continentes, excepto en la Antártida, siendo mejor representadas en los trópicos (Scoble, 1995). En la región neotropical, los piéridos son altamente distintivos en cuanto a su composición, riqueza y endemismo, representando el nivel más alto de diversidad con aproximadamente 339 especies (Lamas, 2004) y más de dos tercios de los géneros son endémicos de la región (Braby et al., 2006; Bravo-Velasquez, 2018).

2.3.1 Género *Eurema* (Hübner, 1819)

Dentro de los 84 géneros que posee la familia Pieridae se encuentra el género *Eurema*, las mariposas de este género se distribuyen en Asia, África, Australia, Oceanía y el nuevo mundo, existen 58 especies reconocidas, de las cuales 19 se distribuyen en el neotrópico (Lamas, 2004). Se caracterizan por ser de tamaño pequeño (alrededor de 30mm de envergadura), de color amarillo, naranja o blanco con márgenes negros en las alas anteriores (Cordoba-Alfaro & Murillo-Hiller, 2011). Sus especies son abundantes particularmente en zonas de vegetación secundaria o zonas alteradas por la actividad humana, además, se encuentran en zonas de cultivo asociadas como plagas, lo que juega un papel importante a la hora de reconocer la expansión de áreas abiertas y la reducción de la conectividad del paisaje (De Vries, 1987; Cordoba-Alfaro & Murillo-Hiller, 2011; Muriel et al., 2014).

2.4 Coberturas vegetales

Las coberturas vegetales comprenden la vegetación que ocupa un espacio determinado dentro de un ecosistema, cumplen funciones de gran importancia como la captación y almacenamiento de energía, refugio de la fauna, agente antierosivo del suelo, medio regulador del clima local, atenuador y reductor de la contaminación atmosférica y del ruido, fuente de materia prima y bienestar para el hombre (Esquema de Ordenamiento Territorial Miranda-Cauca, (s.f.); Orozco, 2015).

2.5 Metodología CORINE land cover

El programa CORINE (Coordination of Information on the environment) desarrolló el proyecto de cobertura de la tierra “Corine Land Cover” 1990, este proyecto desarrollado en Europa, define una metodología específica para realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos

de la cobertura constituye un soporte a la toma de decisiones en políticas relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial, validada por la Unión Europea, hoy en día se aplica sobre la totalidad del territorio europeo a través del proyecto CLC2000, esta base de datos (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas. (IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA, 2007).

2.6 El cambio climático

El clima en la tierra ha experimentado notables fluctuaciones naturales en relación con diversos episodios biológicos, oceanográficos, geológicos y astronómicos a través del tiempo, sin embargo, en la actualidad, hay pruebas que revelan que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años es atribuible a las actividades antrópicas (IPCC, 2007), por ejemplo, el uso de combustibles fósiles, ha incidido en el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, provocando lo que se denomina calentamiento global (Gutiérrez-Hernández, 2018). El calentamiento global ha registrado una serie de cambios en las tendencias de precipitación y un aumento en la temperatura, estos cambios no son uniformes y afectan la interacción entre las especies, el ciclo de los nutrientes y el funcionamiento, estructura y distribución misma de los ecosistemas, ocasionando lo que se conoce como cambio climático (Alexander et al., 2006; IPCC, 2007).

El cambio climático podría entonces inducir cambios en los ecosistemas y acelerar la pérdida de especies esto conduciría a un posible impacto negativo en los servicios ecosistémicos (Uribe-Botero, 2015). Dada la incertidumbre sobre la dimensión de los posibles efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y la distribución geográfica de las especies, la necesidad de alcanzar una mayor comprensión sobre la dinámica de las especies y sobre la estructura y

funcionamiento de los ecosistemas en un entorno climático cambiante, se convierte en un reto el fortalecimiento de la capacidad de predicción de esos efectos y sus impactos económicos y sociales (Hooper, 2012 citado por Uribe-Botero, 2015).

2.7 Efecto del cambio climático sobre las poblaciones de mariposas

El área de distribución de las especies se ve fuertemente influenciada por las variaciones en el clima, todas las posibles modificaciones que el cambio climático puede estar generando sobre esta área, están en función de los límites de tolerancia fisiológica de las especies, lo que se denomina amplitud de nicho (Broennimann et al., 2006; Maciel-Mata et al., 2015). De manera que cuando las especies conservan su área de distribución original ante el cambio climático, surge una respuesta adaptativa o de aclimatación fisiológica ajustándose de manera rápida al cambio en el clima y el cambio del paisaje (Peterson et al., 2001; Maciel-Mata et al., 2015; Aceves-Rangel, 2017), sin embargo esta adaptación al cambio no siempre ocurre, en algunos casos cuando existe una especie que tiene una extensa amplitud de nicho, su área de distribución puede disminuir si las condiciones cambian en el futuro, o por el contrario, si una especie posee un nicho muy estrecho, el área de distribución puede aumentar si las condiciones en dicha área se vuelven comunes (Broennimann et al., 2006; Vié, Hilton-Taylor & Stuart, 2009; Maciel-Mata et al, 2015). Ahora bien, si las especies no logran adaptarse de manera rápida o si tienen un intervalo de tolerancia restringido, éstas deberán desplazarse en el espacio geográfico para encontrar condiciones ambientales idóneas, dando lugar a un proceso de colonización/extinción (Foden et al, 2007; Maciel-Mata et al., 2015).

Wagner et al. (2003) destaca a los lepidópteros como un grupo de insectos con alta especificidad hacia las plantas de las cuales se alimentan, respondiendo a gradientes de viento, luz humedad y

temperatura, razón por la que constituye un grupo muy sensible a las variaciones climáticas y ecológicas (Carrero et al., 2013).

El aumento de la temperatura de la tierra, ha incidido sobre los patrones climáticos que son importantes para la distribución de los lepidópteros los cuales son ideales para detectar cambios en la distribución, pues se consideran indicadores de la biodiversidad y del estado de conservación de los ecosistemas terrestres (Marquez-León, 2014). El cambio climático, además de afectar la distribución y abundancia de las mariposas, influye también en su metabolismo y desarrollo, ya que estos aspectos dependen fuertemente de las condiciones climáticas, gran parte de las investigaciones han puesto en manifiesto los efectos en los procesos fisiológicos de las especies, por ejemplo, un adelanto en la primera aparición y la fecha media de vuelo de los individuos adultos (Roy & Sparks, 2000; Forister & Shapiro, 2003).

2.8 Distribución actual y potencial de especies.

El área de distribución es aquella fracción del espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa con el ecosistema, dicha distribución involucra procesos y/o patrones verdaderamente complejos, por ejemplo, toda distribución experimenta una contracción y expansión espacial a lo largo del tiempo, dinámica influenciada por la interacción de factores ecológicos, biológicos y biogeográficos (Zunino & Zullini, 2003; Maciel-Mata, 2015).

Identificar los patrones espaciales y temporales de la distribución de los seres vivos sobre el planeta ha sido desde sus inicios el centro de estudio de la biogeografía, es así como las áreas de distribución se convierten en el hilo conductor del conocimiento biogeográfico (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011). El rango geográfico de las especies constituye la unidad básica de la biogeografía y un elemento clave para el entendimiento de su biología y la respuesta de las distintas

especies a las condiciones climáticas y la capacidad de estas para adaptarse a los cambios en su ambiente natural (Torres & Jayat, 2010).

Es una premisa central de la biogeografía que el clima ejerce control sobre la distribución natural de las especies y a su vez, esta distribución está determinada por una jerarquía de factores que actúan a diferentes intensidades, a diferentes escalas (Pearson & Dawson, 2003). Dichos factores incluyen la relación de los organismos con su ambiente (condiciones climáticas y de hábitat) y las interacciones interespecíficas como la depredación, el parasitismo, la competencia, entre otras (Ortíz-Yusty, 2014).

El cambio climático predicho para el próximo siglo suscita numerosas preguntas sobre los efectos sobre los ecosistemas y la potencial extinción o adaptación de las especies a los nuevos ambientes (Araújo et al., 2006; Bell & Collins, 2008). Con el fin de maximizar el conocimiento del rango geográfico de las especies, el uso de modelos de distribución de especies (SDM, por sus siglas en inglés) se ha incrementado en los últimos años (Soberon y Peterson, 2005; Elith et al., 2006; Peterson, 2006; Merow et al., 2013). Estos modelos se basan en las relaciones de la especie con variables ambientales y en sus requerimientos ecológicos para proyectar su distribución potencial y permitir, por ejemplo, evaluar el efecto que podría tener algún cambio en el ambiente sobre dicha distribución (Ortíz-Yusty, 2014).

2.9 Modelamiento de nicho

La distribución de las especies en un espacio geográfico está condicionada por diversos factores ya sean históricos, fisiológicos o ecológicos, que varían a lo largo de la distribución; cuando se someten las especies a diferentes condiciones bióticas y abióticas y se relacionan con dichos factores se desarrolla el concepto de nicho ecológico, alrededor del cual gira y se unifica la teoría ecológica (Milesi & Lopez, 2005; Maciel-Mata, 2015).

Existen diferentes conceptos sobre nicho que se han abordado a lo largo de la historia. Grinnell (1917) se enfatiza en los requerimientos ambientales de las especies, centrándose en aquellos factores que limitan su distribución, de esta manera el nicho se concibe como una característica del medio y no de las especies que lo habitan. En sentido opuesto, Elton (1927) se concentra en el efecto de los organismos sobre el ambiente, relegando los factores ambientales a un segundo plano. (Vásquez, 2005; Botello, Sánchez-Botero y Ortega-Huerta, 2015; Gutiérrez-Hernández et al., 2018).

Hutchinson (1957) define el nicho ecológico como un hiperespacio n-dimensional donde se concentran un conjunto de condiciones ambientales que necesita una especie para persistir y mantener un tamaño poblacional estable, señaló además que al interior de este espacio se distinguen el nicho fundamental y el nicho realizado (Maciel-Mata, 2015). El nicho fundamental se refiere a todas las condiciones ambientales donde una especie puede sobrevivir a largo plazo en ausencia de otras especies (Sabattini et al., 2017; Álvarez-Caballero, 2018), el nicho realizado, por su parte, es un subconjunto del nicho fundamental, en el que las especies se encuentran restringidas gracias a sus interacciones interespecíficas, dicho de otra manera, es aquella región en la cual coinciden los factores bióticos, abióticos y migratorios y dónde la probabilidad de encontrar una especie es alta (Rosas-Montalvo, 2016). De esta manera, una especie puede presentarse en una región donde las condiciones bióticas y abióticas le permitan mantenerse o incrementar su población, esta presencia podrá ser tan amplia como su nicho fundamental lo sea, y su ausencia se presentará cuando la interacción con otras especies le signifique un desplazamiento (Pulliam, 2000; Maciel-Mata, 2015). Abarcando un sentido más amplio, biogeográfico, contemplando los procesos de dispersión, las interacciones bióticas/abióticas, la distribución de las áreas y la historia natural, los organismos están presentes en aquellos espacios que reúnan las condiciones

ambientales compatibles con la supervivencia y reproducción de las especies y que, además, han podido ser colonizados de una manera u otra (Peterson et al., 2011; Gutiérrez-Hernández et al., 2018).

Existe una gran variedad de algoritmos utilizados en la construcción de modelos de distribución, sin embargo, la mayoría sigue un método muy similar: utilizan registros puntuales de presencia/ausencia de una especie e incluyen información de variables de tipo climáticas o ambientales; delimitando el área de distribución con base en la información derivada del área conocida (registros puntuales), es decir, la relación que existe entre los registros y las variables climáticas o ambientales asociadas a dichos puntos, de esta manera, se pueden pronosticar sitios que pueden representar potencialmente la distribución de las especies en estudio (Peterson, 2001; Maciel-Mata, 2015).

Una de las herramientas más difundidas en la actualidad para la estimación de la distribución potencial, son los “modelos de nicho” o “modelos de envoltura climática” (Lobo et al., 2010; Araújo & Peterson, 2012; Gómez, 2015). Estos modelos estiman la distribución potencial, correlacionando información de ocurrencia con predictores ambientales. El modelado del nicho ecológico nos permite analizar los factores ecológicos asociados a distintas poblaciones de determinada especie y que la influyen en distintos grados y modos, información que analizada por distintos tipos de algoritmos nos posibilita proyectar a nivel geográfico el área potencial que ocuparía la especie e identificar los sitios adecuados para la supervivencia de las poblaciones de una especie por medio de la identificación de sus requerimientos ambientales (Phillips, 2006). Dichos modelos, los cuales utilizan el nicho ecológico como base teórica, se convierten en herramientas útiles para resolver preguntas de ecología aplicada, conservación y biogeografía,

debido a las bases ecológicas y evolutivas subyacentes (Guisan y Thuiller 2005; Parra-Curimilma, 2018).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la distribución actual y potencial de especies del género *Eurema* (Lepidoptera:Pieridae) en paisajes fragmentados de los departamentos Santander y Norte de Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la diversidad del género *Eurema* en paisajes fragmentados de los departamentos Santander y Norte de Santander.
- Determinar la distribución potencial de especies del género *Eurema* en paisajes fragmentados de los departamentos Santander y Norte de Santander .
- Modelar el efecto en un escenario de cambio climático sobre la distribución potencial de especies del género *Eurema* en paisajes fragmentados de de los departamentos Santander y Norte de Santander.

4. METODOLOGÍA

4.1 Analizar la riqueza y representatividad del género *Eurema*

4.1.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos departamentos de la región nororiental colombiana (Norte de Santander y Santander) (Fig. 3), la temperatura del área de estudio oscila entre 16°C a 25°C y la actividad productiva principales son la agricultura, destacando los cultivos de tabaco, piña, yuca, plátano, fique, café, entre otros; y la minería destacando la extracción de petróleo y oro (encolombia, s.f.). El departamento Norte de Santander forma parte de la región andina colombiana, tiene una extensión de 22.130 km² que equivale al 1.91% del territorio nacional, el departamento está compuesto por serranías, páramos, mesetas, llanuras y cerros lo que lo hace rico en paisajes y climas, presenta un régimen de lluvias bimodal con dos períodos de lluvia de marzo a junio y de septiembre a noviembre (Gobernación de Norte de Santander, s.f.). Por su parte, el departamento de Santander ubicado al noreste del país cuenta con una superficie de 30.537 km² lo que representa el 2.7% del territorio nacional, su clima se ve afectado por la diversidad de altitud la cual le proporciona pisos térmicos y paisajes diversos, su régimen de lluvias es bimodal con dos períodos de abril a mayo y septiembre a octubre (Colombiamania, s.f.) (Fig. 3). Las coberturas vegetales que predominaron en los dos departamentos estudiados fueron Pastos, cultivos, herbazal y bosque, estas categorías se basaron en los criterios propuestos por la metodología CORINE land cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010)

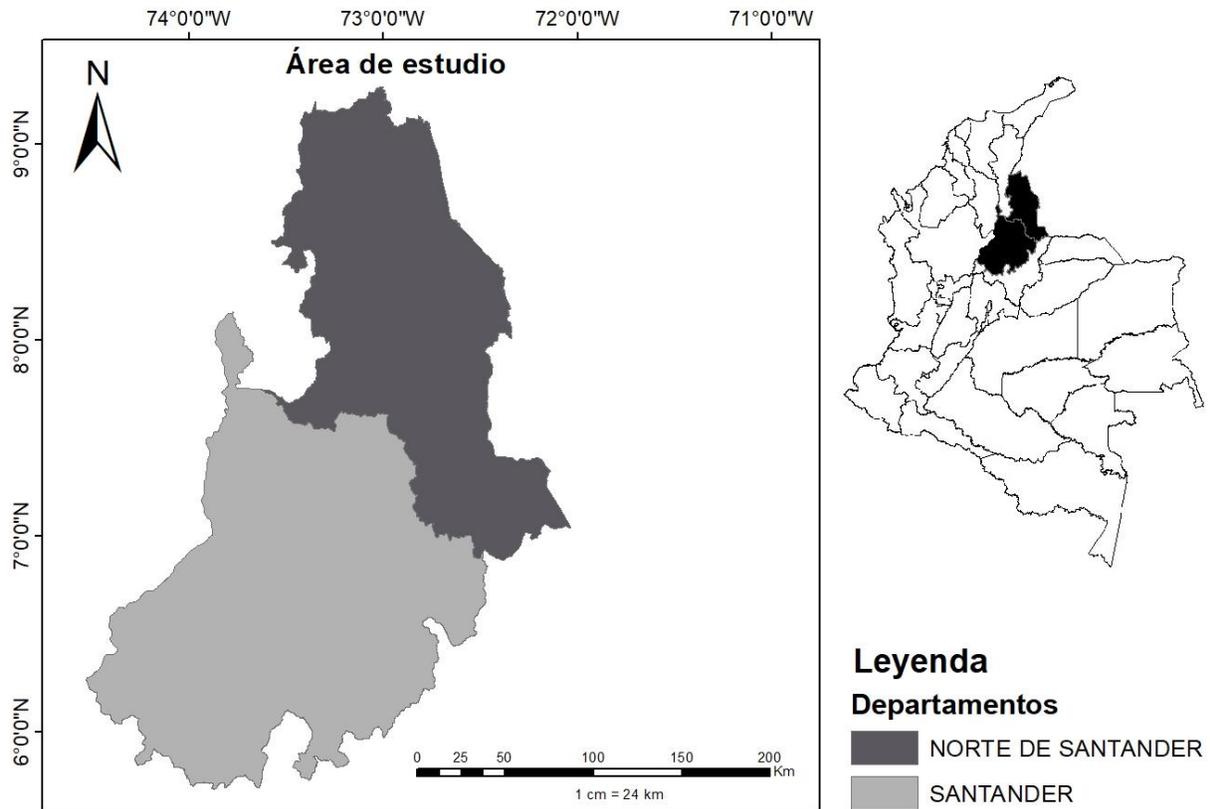


Figura 3. Ubicación del área de estudio, Departamentos Norte de Santander y Santander en el nororiente Colombiano, 2019.

4.1.2 Obtención de los datos

Los píeridos son una familia que se encuentra distribuida ampliamente en la región neotropical, en Colombia se han reportado 102 especies distribuidas en las subfamilias Pierinae, Coliadae y Dismorphiinae (Ospina-López et al., 2010); una de las subfamilias que presenta mayor distribución altitudinal en Colombia es Coliadae la cuál ha evidenciado un rango de distribución desde los 433 a los 3600 msnm (Llorente-Bousquets, 2006). Se revisaron las siguientes colecciones biológicas: la colección entomológica de la Universidad de Pamplona, la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander (MHN-UIS), la colección del museo entomológico Francisco Luis Gallego de la Universidad Nacional de Colombia, sede

Medellín y el Instituto Alexander Von Humboldt. En las colecciones biológicas revisadas el género con más registros dentro de la subfamilia Coliadinae fue el género *Eurema*, lo que lo convirtió en el grupo taxonómico ideal para este estudio.

Para la obtención de datos biológicos se realizó un listado taxonómico de cinco especies de mariposas del género *Eurema* distribuidas en la región nororiental colombiana, posteriormente se realizó una búsqueda de los registros históricos mediante la revisión de publicaciones científicas, libros, revistas, colecciones biológicas como la colección entomológica de la Universidad de Pamplona, la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander (MHN-UIS), la colección del museo entomológico Francisco Luis Gallego de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y el Instituto Alexander Von Humboldt, además, se consultaron bases de datos en línea como GBIF (Global Biodiversity Information Facility; “<http://www.gbif.org/>”), SIB (Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia “<https://www.sibcolombia.net/>”).

Las coordenadas geográficas se registraron en grados decimales, según el sistema de coordenadas WGS 84, después de verificar las coordenadas, se elaboraron tres bases de datos en el programa Excel. La primera base de datos incluía las cinco especies y las coberturas vegetales que estas ocupaban, para utilizarla en el software ArcGis 10.3; la siguiente base de datos incluía las especies y las coordenadas correspondientes y la última base de datos incluye la especie, la latitud y la longitud, esta base de datos se encontraba en un formato delimitado por comas (*.csv) para su posterior análisis.

Para determinar la distribución potencial las bases de datos se sometieron a un análisis para eliminar las presencias duplicadas en celdas de 1km² con el paquete raster (Hijmans et al., 2019) en el software R 3.6.0 y posteriormente para realizar los modelos se escogieron aquellas especies

que especies contaran con al menos cinco registros de la localidad de colecta (Hernández et al., 2006; Pérez-García & Liria, 2013).

4.1.3 Diversidad de *Eurema* en el nororiente colombiano

La diversidad de especies en los sitios de estudio se estimó utilizando los métodos analíticos propuestos por Chao y Jost (2012) utilizando el paquete CRAN Inext para R (Hsieh, Ma, & Chao, 2016; Gaviria-Ortíz y Henao-B, 2015), en los diferentes tipos de cobertura vegetal y establecidas para el sitio de estudio: Pastos, cultivos, herbazal y bosque en un rango temporal 2000-2002; estas categorías se basaron en los criterios propuestos por la metodología CORINE land cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010). Los índices de diversidad se obtuvieron en (números de Hill) (Jost, 2006,2010), diversidad de orden 0 (0D) o riqueza de especies, la cual considera a todas las especies con igual frecuencia; orden 1 (1D), que es el exponencial de la entropía del índice de Shannon y tiene en cuenta las especies típicas, y orden 2 (2D), que es el inverso del índice de Simpson e incluye las especies más abundantes y excluye las especies raras (Calderon-Patrón, Briones-Salas & Moreno, 2013; Cacia-Toledo, Serrano-Cardozo & Ramirez-Pinilla, 2018), todos los órdenes de estas medidas de diversidad presentan diferentes niveles de sensibilidad y la relación de cambio entre cada uno de los índices permite construir un perfil de diversidad donde las comunidades más equitativas presentan un reducido cambio entre cada orden de diversidad (Chao et al., 2014; Cacia-Toledo, Serrano-Cardozo & Ramirez-Pinilla, 2018).

4.2 Determinar distribución potencial actual

4.2.1 Obtención y procesamiento de datos climáticos

Para modelar el efecto del cambio climático sobre la distribución potencial, se obtuvieron 18 variables bioclimáticas globales (Tabla 1), con una resolución de 30 segundos de arco (~1km²), desde la base de datos “ENVIREM” (<http://envirem.github.io/>) para la distribución potencial actual, cada celda de la capa exhibe los valores ambientales interpolados basándose en datos interpolados de los años 1960-1990 (Title & Bemmels, 2018).

Tabla 1. Variables bioclimáticas utilizadas para determinar la distribución potencial actual de las especies del género *Eurema* en el nororiente colombiano. Obtenidas desde ENVIREM. 2019.

| Variables | |
|---------------------------------|---|
| AnnualPET | Evapotranspiración potencial actual |
| AridityIndexThornthwaite | Índice de aridez de Thornthwaite |
| ClimaticMoistureIndex | Una métrica de humedad relativa y aridez |
| Continentality | Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frío |
| EmbergerQ | Cociente pluviométrico de Emberger |
| GrowingDegDays0 | Suma de la temperatura media mensual para los meses con una temperatura media mayor que 0 °C multiplicada por el número de días |
| GrowingDegDays5 | Suma de la temperatura media mensual durante meses con una temperatura media superior a 5 °C multiplicada por el número de días |
| MaxTempColdestMonth | Máxima temperatura del mes más frío |
| MinTempWarmestMonth | Mínima temperatura del mes más cálido |
| MonthCountByTemp10 | Recuento del número de meses con una temperatura media superior a 10°C |

| | |
|--------------------------|--|
| PETColdestQuarter | PET media mensual del trimestre más frío |
| PETDriestQuarter | PET media mensual del trimestre más seco |
| PETseasonality | Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial. |
| PETWarmestQuarter | PET media mensual del trimestre cálido |
| PETWettestQuarter | PET media mensual del trimestre más húmedo |
| Thermind | Índice de termicidad compensada |
| Tri | Índice de rugosidad del terreno |
| TopoWet | Índice de humedad topográfico SAGA-GIS |

En el caso de la distribución potencial en un escenario de cambio climático, existen diversos tipos de Modelos de Circulación General (GCMs, del inglés Global Circulation Models) extrapolados para los años 2050-2070, los cuales se encuentran ligados con cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero llamados Rutas de Concentración Representativas (RCPs, del inglés Representative Concentration Pathways). Las RCPs incluyen desde un escenario de reducción de las emisiones de CO₂ a 450 ppm (RCP2.6), pasando por dos escenarios intermedios a 650 pp, (RCP4.5) y 850 ppm (RCP6.0) y un escenario de altas emisiones a 1350 ppm (RCP 8.5).

Para el análisis se seleccionaron los escenarios RCP4.5 el cual indica que el forzamiento radiativo va a aumentar de manera moderada hasta llegar a estabilizarse (escenario optimista) y el escenario RCP8.5 que indica que los gases de efecto invernadero crecerán exponencialmente en la atmósfera (escenario pesimista) (García-Díaz, 2018). Según estos escenarios, la temperatura superficial global media en 2100 para los escenarios de referencia se situaría entre 0,2 °C y 4,8 °C por encima de la media tomando como referencia 1990, cifra que podría ser aún mayor si incorporamos la

variabilidad de todos los modelos de circulación atmosférica global (Gutiérrez-Hernández, 2018). Los modelos climáticos que se utilizarán representan dos escenarios moderados de concentraciones de emisión para los gases de efecto invernadero indicadores de actividades antrópicas (crecimiento poblacional, contaminación atmosférica, usos del suelo e intensidad energética), ambos escenarios asumen un aumento poblacional que incluye mejoras en la tecnología e intensidad energética, esto conlleva a una demanda alta de energía y aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a largo plazo; teniendo en cuenta la ausencia de políticas de mitigación del cambio climático, el escenario RCP8.5 simboliza emisiones de gases de efecto invernadero más altas en comparación con el RCP4.5 (Van Vuuren et al., 2011; Riahi et al., 2011; IPCC, 2013).

Los Modelos de Circulación General se obtendrán desde la base de datos “WorldClim” (http://www.worldclim.org/cmip5_30s) con una resolución de 30 segundos (equivale a 900m en el ecuador)(Tabla 2). Para este estudio se considerará el modelo NorESM1-M (CMIP5) el cual ha demostrado efectividad en Colombia (Cadavid-Valencia, 2015), bajo los escenarios 4.5 (escenario optimista) y 8.5 (escenario pesimista), determinando la distribución potencial para los años 2050-2070, esto con el fin de comparar un escenario realista en el que el ser humano pueda llegar a disminuir la producción de gases de efecto invernadero a una cantidad moderada que se pueda estabilizar, contra un escenario pesimista en el que los gases de efecto invernadero aumenten en cantidades exponenciales (García-Díaz, 2018).

Tabla 2. Variables bioclimáticas utilizadas para determinar la distribución potencial futura de las especies del género *Eurema* en el nororiente colombiano. Obtenidas desde Worldclim2. 2019..

| Variables | |
|------------------|--|
| Bio1 | Temperatura media anual |
| Bio2 | Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima)) |
| Bio3 | Isotermalidad (bio2/bio7)(*100) |
| Bio4 | Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100) |
| Bio5 | Temperatura máxima de calentamiento mes |
| Bio6 | Temperatura mínima del mes más frío |
| Bio7 | Rango anual de temperatura (bio5-bio6) |
| Bio8 | Temperatura media del trimestre más húmedo |
| Bio9 | Temperatura media del trimestre más seco |
| Bio10 | Temperatura media del trimestre más cálido |
| Bio11 | Temperatura media del trimestre más frío |
| Bio12 | Precipitación anual |
| Bio13 | Precipitación del mes más húmedo |
| Bio14 | Precipitación del mes más seco |
| Bio15 | Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación) |
| Bio16 | Precipitación del trimestre más húmedo |
| Bio17 | Precipitación del trimestre más seco |
| Bio18 | Precipitación del trimestre más cálido |

Teniendo en cuenta que las capas originales cubren la totalidad del planeta, surgió la necesidad de recortarlas por medio de polígonos para el Nororiente Colombiano en ArcGis 10.3.

4.3 Modelado del efecto del cambio climático

4.3.1 Selección de las variables ambientales

Se realizó una evaluación a todas las variables predictivas, usando los paquetes HH y corrplot del software estadístico R 3.6.0 (Hijmans y Elith, 2018; Wei et al., 2017, Heiberger y Holland, 2008). Para estimar que variables se encontraban correlacionadas se realizaron tres análisis: En primer lugar, se realizó un análisis de correlación entre las variables predictoras, los resultados se graficaron en un correlograma el cual permitió identificar en qué grado y dirección las variables se encontraban correlacionadas entre sí (coeficiente de correlación de Pearson $> 0,7$), posteriormente se convirtieron los valores de correlación (+/-) en distancias positivas de similitud entre predictores para conformar un clúster que clasificara los factores en ramas, el análisis clúster se proyectó en un dendograma con las variables agrupadas en ramas de parentesco; se escogieron las variables menos correlacionadas entre sí y una variable por cada rama cortada en el umbral de 0,4 de distancia, esto se realiza porque la multicolinealidad puede violar las suposiciones estadísticas y alterar las predicciones del modelo (Fourcade et al., 2014; Benito et al., 2016; Hill et al., 2017; Gutierrez-Hernandez, 2018). Se efectuó un último análisis para detectar si cada variable seleccionada en el paso anterior constituía una combinación lineal de otras variables, calculando el Variance Inflation Factors (VIF) siguiendo un procedimiento secuencial donde se

excluyeron aquellas variables que tuvieran un VIF superior a 5 (James et al., 2013; Gutierrez-Hernandez, 2018)

4.3.2 Modelo de distribución actual y potencial de las especies en un escenario de cambio climático.

Los modelos de distribución indican la idoneidad del hábitat para el desarrollo de una especie y la precisión de esta idoneidad puede variar dependiendo del algoritmo utilizado para estimarla (Guzman-Yera, 2018). Por esta razón, en este trabajo se emplearon múltiples modelos calculados con distintos algoritmos, seleccionando aquellos modelos más óptimos para cada especie utilizando los valores AUC (cAUC).

Existen dos tipos de registros: de presencia y de presencia-ausencia. Los registros de presencia son incuestionables, pero con los datos de ausencia es más difícil, los procesos de fragmentación del hábitat, las especies invasoras, entre otras cosas pueden afectar a las ausencias, por ello es complicado encontrar bases de datos que contengan registros de ausencia-presencia, debido a esto para este estudio mediante una expresión binaria se le dio un valor de 1 a aquellos puntos georreferenciados asegurando la presencia de la especie y valor 0 a puntos de fondo generados automáticamente en el software estadístico R 3.6.0 (Guzman-Yera, 2018). Los datos de fondo no intentan adivinar los lugares de ausencia sino caracterizar la región de estudio, de esta manera los datos de fondo son los mismos sin importar donde se haya encontrado la especie, así establecerán un dominio ambiental en el estudio mientras que los datos de presencia establecen en qué condiciones es probable que la especie esté presente (Philips et al., 2009; Hijmans & Elith, 2017).

Siguiendo la anterior afirmación, se utilizó una proporción de 5 a 1 de puntos de fondo a puntos de presencia para reducir el sesgo de ajuste excesivo (sobreajuste/over-fitting) y así mantener la capacidad de discriminar entre áreas de presencia y puntos de fondo (Barbet-Massin et al. 2012; Smith et al. al.2013; Bunn et al., 2015; Castro-Llanos, 2019). Se escogió esa proporción ya que se poseían pocos puntos de ocurrencia para cada especie.

Una vez creado el dataset se seleccionaron cuatro algoritmos: GLM (modelos lineales generalizados) (Nelder & Wedderburn, 1972) y GAM (Modelos aditivos generalizados) (Hastie & Tibshirani, 1986), MaxEnt (Philips et al., 2006) y Random Forest (Breiman, 2001). En este caso, como no se cuenta con datos de ausencia, se utilizaron puntos de fondo generados a través del paquete *dismo* (Hijmans et al., 2007) en el software estadístico R, aplicando la distribución Poisson para los algoritmos GLM y GAM. Los algoritmos utilizados emplearon datos de entrenamiento (75%) y datos de evaluación o datos de prueba (25%) en todas las especies y posteriormente los mapas se convirtieron en binarios con valores de presencia-ausencia. Todos los procedimientos mencionados se generaron a través del paquete *dismo* (Hijmans et al., 2007) en el software estadístico R.

4.3.2.1 Modelos lineales generalizados (GLM)

Los modelos lineales generalizados (GLM por sus siglas en inglés) (Nelder & Wedderburn, 1972) son una extensión de los modelos lineales que permiten utilizar distribuciones no normales de los errores (binomiales, Poisson, gamma, etc) y varianzas no constantes. En particular, los GLM pueden servir para generar distribuciones predictivas de especies, además de mostrar ventajas sobre los modelos de estadística paramétrica (Iloldi et al., 2002).

Los modelos lineales generalizados poseen tres componentes: una componente aleatoria formada por el vector aleatorio observable $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)'$ tal que sus elementos son independientes e idénticamente distribuidos (distribución de las especies); una componente sistemática que está dada por el predictor lineal (variables predictoras) y una función de enlace que relaciona el predictor lineal con el valor esperado de la variable de respuesta, de esta manera, los GLM permitirán modelar variables respuestas continuas y categóricas (Nelder & Wedderburn, 1972; Cayuela, 2010).

4.3.2.2 Modelos aditivos generalizados (GAM)

Los modelos aditivos generalizados (GAM por sus siglas en inglés) (Hastie & Tibshirani, 1986) permiten modelar directamente respuestas no lineales mediante un suavizado (smoothing) de las variables predictivas. Es un método de regresión no lineal y no paramétrico, pues, trabaja con valores suavizados de cada una de las variables, las cuales, en conjunto, pueden adoptar una respuesta no lineal, es decir, el modelo de ajusta así mismo empíricamente generando múltiples curvas denominadas splines (Austin, 2002; Guisan y Edwards, 2002; Gutierrez-Hernández et al., 2018). Estas funciones de suavizamiento son estimadas usando diagramas de dispersión suavizados, en un procedimiento iterativo llamado algoritmo de puntaje local, que generaliza el procedimiento usual del puntaje de Fisher por computar estimativos de máxima probabilidad; una de las ventajas del algoritmo de puntaje local es que a diferencia del suavizamiento multidimensional, pasan de la regresión multivariada a una secuencia de regresiones univariadas, siendo más fácil de calcular (Kauermann y Opsomer, 2002) y sus funciones de suavizamiento pueden ser usadas como una descripción de los datos, para predicción, o para sugerir

transformaciones de covariables (Gomez-Lemos, 2011). Los GAM han demostrado una eficiencia para modelizar la distribución de las especies. (Austin, 2002; Guisan & Edwards, 2002).

4.3.2.3 Modelo de máxima entropía (MaxEnt)

MaxEnt fue elegido por tratarse de uno de los métodos de mayor poder predictivo cuando se modela con solo datos de presencia y porque funciona relativamente bien con pocos datos de ocurrencia (Elith et al., 2006; Phillips et al., 2006; Pearson et al., 2007; Ready et al., 2010; Jones et al., 2012; Svendsen, 2013), sin embargo, los métodos que utilizan sólo datos de presencia, tienden a realizar estimaciones sesgadas de la distribución si el esfuerzo de observación está desbalanceado alrededor del área de estudio. Una forma de disminuir considerablemente este sesgo es eliminando las presencias repetidas (Stockwell & Peterson, 2002).

El método de Máxima Entropía (MaxEnt), posee un fundamento matemático conciso y algoritmos deterministas eficientes que convergen a la distribución de probabilidad óptima (máxima entropía) donde se observará la especie, el algoritmo determinará cuáles variables ambientales se intersectan en el punto de referencia, estimando una probabilidad para cada variable ambiental que se intersecta en cada uno de los puntos de ocurrencia sometidos en el análisis, calculando la idoneidad de hábitat para cada especie muestreada. Su enfoque se basa en la segunda ley de la termodinámica enfocada a procesos ecológicos, la cual postula que en un sistema sin influencias externas se mueven procesos en dirección a la máxima entropía, es decir que la distribución espacial de una especie tenderá hacia la distribución más uniforme de una superficie geográfica, debido a la restricción de los valores esperados de las variables predictoras (ambientales) bajo la distribución estimada que coincide con su promedio empírico, es decir, valores promedio para el conjunto de

registros de presencia solamente o datos de ocurrencia (Phillips et al. 2006, Pearman et al. 2008, Elith et al. 2011; Pulido-Herrera et al., 2015).

4.3.2.4 Árboles de clasificación (Random Forest)

Los árboles de decisión o clasificación son un enfoque simple de regresión no paramétrico que sondea y explora datos con el objetivo de identificar la combinación de variables que puedan predecir con gran precisión la presencia de especies, pues, segmenta la muestra en grupos homogéneos respecto a la variable respuesta (Strobl et al. 2009). Por otro lado, el algoritmo de estimación de los parámetros y segmentación de los árboles de clasificación basado en Random Forest, es un tipo de método de partición desarrollado para trabajar con muestras (n) pequeñas y problemas grandes p . Involucran un ensamblaje (*ak: set*) de árboles de clasificación que son calculados en subconjuntos aleatorios de datos, usando un subconjunto aleatoriamente restringido y predictores seleccionados para cada uno de los nodos. De esta manera, Random Forest es capaz de examinar mejor la contribución y el comportamiento que cada predictor tiene, aun cuando el efecto de un predictor debería ser usualmente dominado por competidores más significativos en modelos más simples (Strobl et al. 2009). Además, este algoritmo es robusto a la colinealidad de las variables predictoras y el resultado es la probabilidad de ocurrencia de la especie (basado en una función logística). Las salidas se presentan en valores de probabilidad, los cuales varían entre cero (0) y uno (1), donde 0 indica menos probabilidad de presencia y 1 mayor probabilidad (Liaw y Wiener 2002).

4.4 Importancia de las variables ambientales

Para establecer la importancia de las variables se utilizaron distintos métodos, para los GLM y GAM se utilizó el p valor de cada variable, para MaxEnt se estableció utilizando la función response del paquete dismo (Hijmans et al., 2017) y para Random Forest se utilizó el Mean Decrease Gini (Louppe et al., 2013), estas funciones indican las variables más importantes en cada uno de los modelos generados.

4.5 Evaluación del desempeño de los algoritmos

El rendimiento de los modelos se evaluará calculando los errores de comisión y omisión en el área bajo la curva (AUC) de la curva ROC (“Característica operada por el receptor”), estos se evaluarán con los valores del área bajo la curva (AUC) la cual varía de 0 a 1, entre más cercano sea el valor de AUC a 1, mejor será el desempeño del modelo, pero, si el valor está cercano o por debajo de 0.5, el modelo no aporta más información que la obtenida por el azar y, en general se considera que los valores por encima de 0,70 indican un buen ajuste del modelo (Anderson et al., 2003 ; Lobo, Jiménez-Valverde & Real, 2008; Peterson, Papes & Soberón, 2008).

Algunas investigaciones han criticado el uso de las AUC en la evaluación de los MDS, pues, los valores de la AUC varían con la extensión espacial utilizada para seleccionar puntos de fondo, es decir, cuanto mayor sea esta extensión, mayor será el valor AUC, esto genera valores sesgados que no se pueden comparar directamente. Basándose en la investigación de Hijmans (2012) se eliminará el “sesgo de clasificación espacial” creando un cAUC a través de un “muestreo de distancia puntual” con el paquete dismo en el software estadístico R 3.6.0.

5. RESULTADOS

5.1 Riqueza y representatividad del género *eurema* en el nororiente colombiano

5.1.1 Composición del ensamblaje de mariposas

Se obtuvo un total de 219 registros, pertenecientes a cinco especies de mariposas del género *Eurema*, divididos de la siguiente manera: *Eurema elathea* con 35 registros, *Eurema daira* con 21 registros, *Eurema albula* con 89 registros, *Eurema arbela* con 60 registros y *Eurema phiale* con 14 registros. La completitud del muestreo de los registros correspondientes al género evidenció valores de 100% para las coberturas pastos, cultivos y bosque, seguida de herbazal el cual obtuvo un valor del 94%, estos porcentajes indican una proporción representativa de las especies reales en las distintas coberturas vegetales. Realizando una comparación entre las coberturas vegetales, se encontró que pastos y herbazal representaron la mayor riqueza observada con cinco especies cada una, seguida de bosque con cuatro y por último cultivos con tres especies (Tabla 3).

Tabla 3. Completitud del muestreo. n: abundancia; S.obs: Riqueza observada; S.esp: Riqueza esperada; SC: completitud del muestreo; f1: singletons; f2: doubletons.

| Cobertura vegetal | N | S.obs | S.esp | SC | f1 | f2 |
|-------------------|-----|-------|-------|--------|----|----|
| Pastos | 139 | 5 | 5 | 1.00 | 0 | 0 |
| Cultivos | 48 | 3 | 3 | 1.00 | 0 | 1 |
| Bosque | 18 | 4 | 4 | 1.00 | 0 | 0 |
| Herbazal | 14 | 5 | 5.23 | 0.9454 | 1 | 2 |

La curva de distribución de abundancia evidenció que la especie más abundante en las coberturas vegetales de bosque y herbazal fue *Eurema elathea*, en la cobertura de pastos la especie más abundante fue *Eurema arbela* y por último en cultivos la especie más abundante fue *Eurema albula* (Ver Fig. 4).

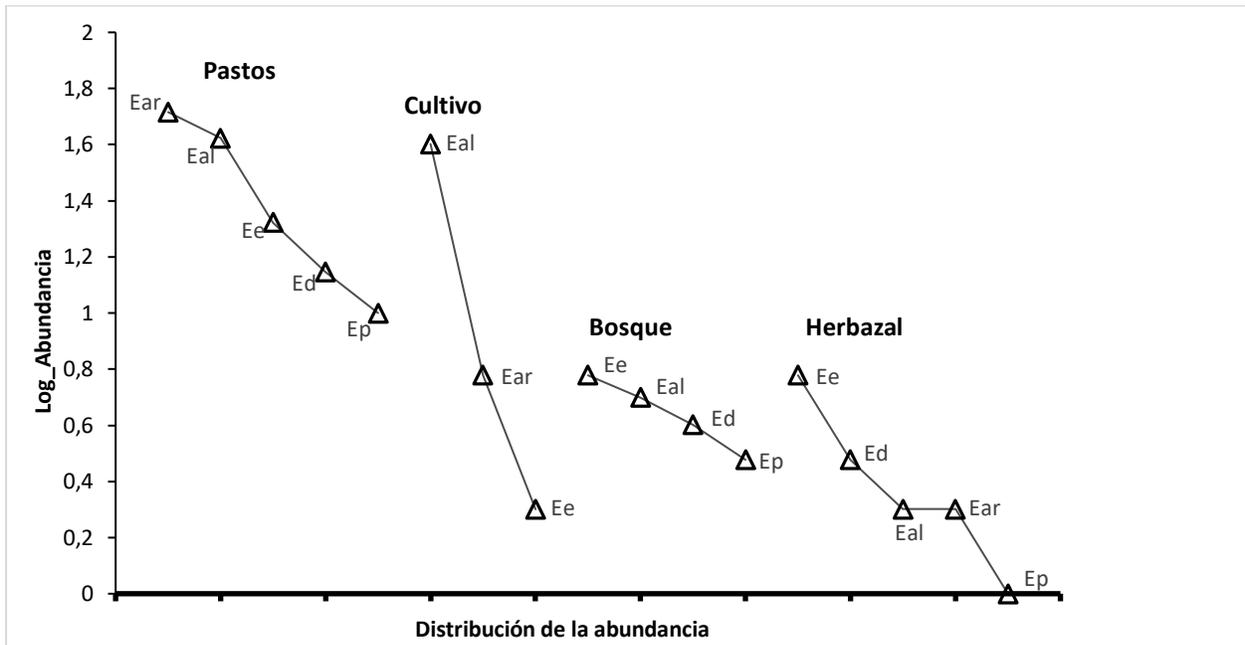


Figura 4. Curva de distribución de las especies del género *Eurema* en los cuatro tipos de coberturas vegetales del estudio. *Eurema elathea* (Ee), *Eurema arbela* (Ear), *Eurema albula* (Eal), *Eurema daira* (Ed), *Eurema phiale* (Ep).

Basados en las diversidades observadas y esperadas calculadas en el orden 0D , 1D , 2D (Tabla 4) para las cuatro coberturas vegetales estudiadas, la diversidad de orden 0D con valores de cinco especies efectivas en la cobertura pastos y herbazal, seguida de bosque con cuatro especies efectivas y cultivos con tres, indica que hay mayor riqueza de especies en zonas de pastos y herbazal. La diversidad de orden 1D es de 4.21 especies efectivas en herbazal, 4.20 en pastos, 3.88 en bosque y 1.72 en cultivos, esto indica que pastos y herbazal poseen la mayor cantidad de especies comunes en la zona de estudio y cultivos presenta la menor cantidad. Finalmente, para la

diversidad de orden 2D se observó que la cobertura con mayor cantidad de especies abundantes fue bosque con 3.77, seguido de pastos y herbazal con 3.71 y 3.63 respectivamente, la cobertura que tuvo el menos valor es cultivos con 1.40 especies efectivas (Ver Fig. 5).

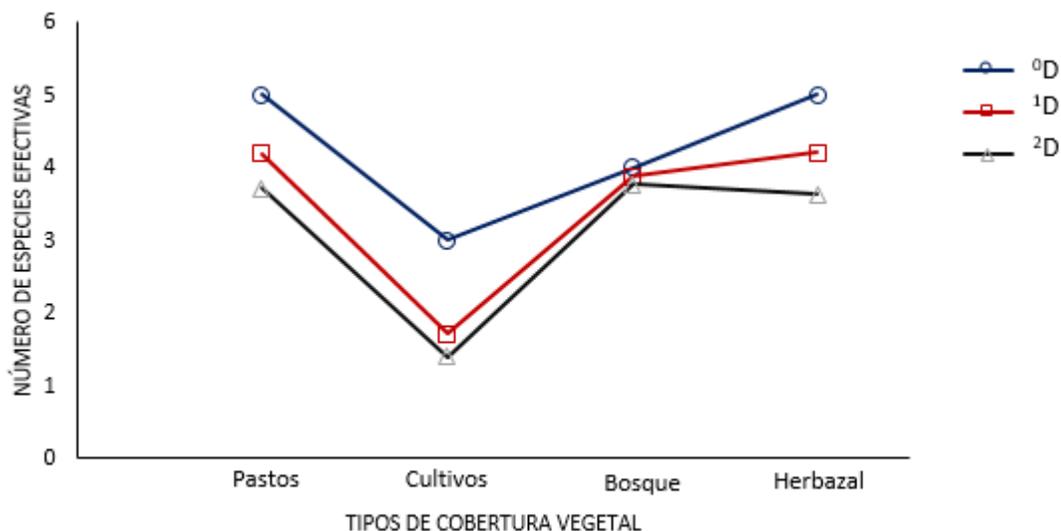


Figura 5. Perfiles de diversidad alfa de mariposas del género *Eurema* en los distintos tipos de coberturas vegetales. Se indica riqueza de especies 0D , exponencial de Shannon ($^1D = \exp H'$) y especies abundantes (2D) o inverso de Simpson. (Jost, 2007)

Para las diversidades observadas y esperadas los valores de diversidad de orden 0D mostraron que se colectaron el 100% de las especies esperadas en todas las coberturas esperadas, la diversidad de orden 1D y 2D lo recolectado representó el 93% y 89%. Para cada tipo de cobertura vegetal, se observó que los valores de riqueza 1D oscilan entre 84-98% y los valores de orden 2D varían entre 80-98% (Tabla 4).

Tabla 4. Diversidad de especies en números efectivos, mostrando los valores observados y esperados para cada cobertura vegetal estudiada.

| Cobertura | Diversidades observadas | | | Diversidades esperadas | | |
|-----------|-------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
| | 0D | 1D | 2D | 0D | 1D | 2D |
| Pastos | 5.00 | 4.20 | 3.71 | 5.00 | 4.26 | 3.79 |

| | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| Cultivos | 3.00 | 1.72 | 1.40 | 3.00 | 1.76 | 1.42 |
| Bosque | 4.00 | 3.88 | 3.77 | 4.00 | 4.23 | 4.50 |
| Herbazal | 5.00 | 4.21 | 3.63 | 5.00 | 4.99 | 4.55 |

5.1.2 Registros de presencia/puntos de fondo

Del total de los 219 registros pertenecientes a cinco especies de mariposas, se eliminaron los registros duplicados y aquellos registros que se encontraran en un rango de 1km² para cada especie, de esta manera se obtuvieron 59 registros geográficos correspondientes a las especies *Eurema elathea* (20 registros), *Eurema daira* (13 registros), *Eurema albula* (13 registros) y *Eurema arbela* (13 registros). Con las localidades georreferenciadas se generaron las áreas de distribución potencial para las especies en los departamentos Santander y Norte de Santander (Ver Fig. 6), estas especies fueron seleccionadas porque contaban con al menos cinco registros de la localidad de colecta.

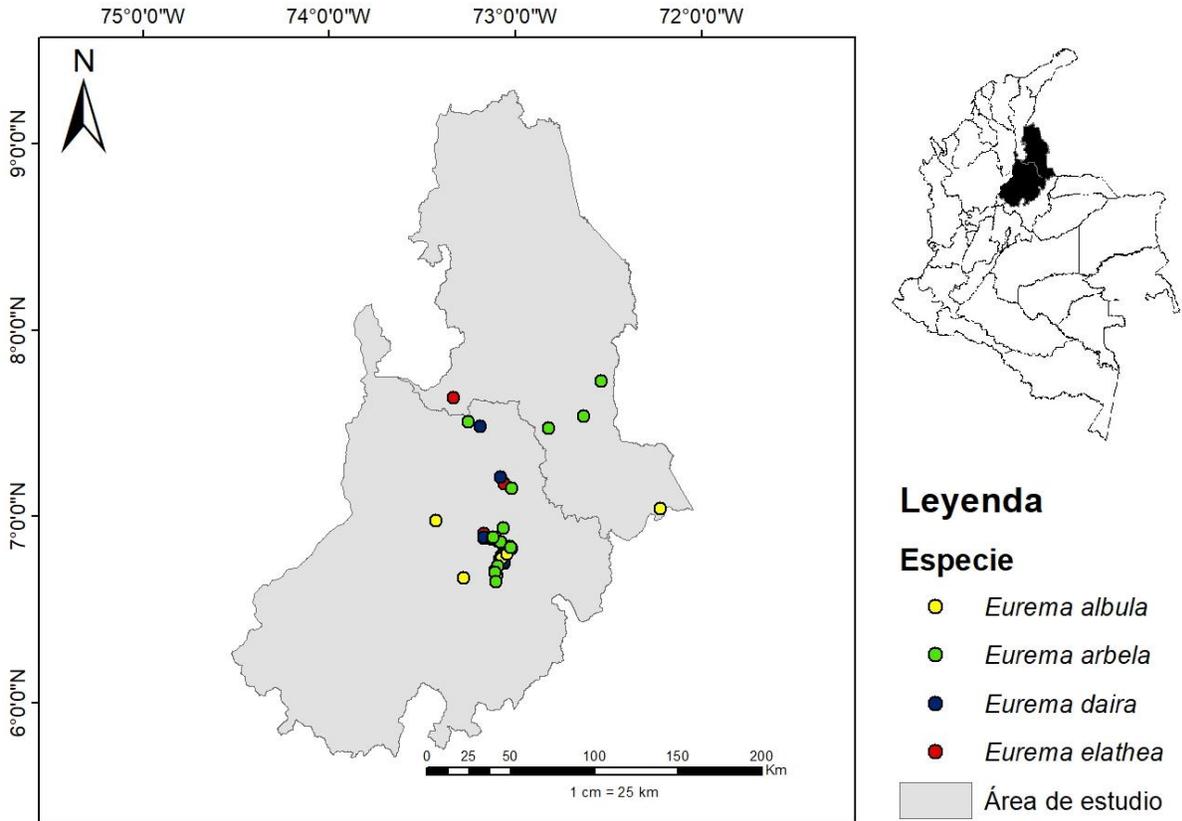


Figura 6. Registros de presencia de las especies del género *Eurema* en el nororiente colombiano posterior a la depuración de los datos.

5.2 Determinar la distribución potencial actual

5.2.1 Selección de las variables ambientales

5.2.1.1 Variables para la distribución actual

Tabla 5. Análisis de correlación de Pearson para las variables de distribución actual.

| | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | L | m | N | o | p | q | r |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| a | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| b | -0,17 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| c | 0,21 | -0,48 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| d | 0,001 | 0,31 | -0,35 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| e | 0,6 | -0,51 | 0,83 | -0,37 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| f | 0,98 | -0,17 | 0,2 | -0,03 | 0,62 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| g | 0,98 | -0,17 | 0,2 | -0,02 | 0,62 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | |
| h | 0,98 | -0,17 | 0,21 | -0,03 | 0,62 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | |
| i | 0,96 | -0,15 | 0,18 | -0,01 | 0,61 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 1 | | | | | | | | | |
| j | 0,59 | -0,2 | -0,09 | -0,08 | 0,24 | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 0,56 | 1 | | | | | | | | |
| k | 0,97 | -0,19 | 0,28 | -0,07 | 0,64 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,93 | 0,58 | 1 | | | | | | | |
| l | 0,97 | -0,12 | 0,22 | 0,06 | 0,57 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,93 | 0,54 | 0,95 | 1 | | | | | | |
| m | 0,64 | 0,08 | -0,03 | 0,53 | 0,11 | 0,57 | 0,56 | 0,58 | 0,56 | 0,28 | 0,55 | 0,67 | 1 | | | | | |
| n | 0,99 | -0,15 | 0,21 | 0,04 | 0,57 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,94 | 0,57 | 0,96 | 0,98 | 0,68 | 1 | | | | |
| o | 0,98 | -0,18 | 0,19 | -0,007 | 0,57 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,95 | 0,6 | 0,96 | 0,95 | 0,61 | 0,98 | 1 | | | |
| p | 0,98 | -0,17 | 0,2 | -0,03 | 0,62 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,58 | 0,95 | 0,95 | 0,56 | 0,96 | 0,96 | 1 | | |
| q | 0,67 | 0,12 | 0,29 | -0,02 | 0,51 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,17 | 0,68 | 0,66 | 0,33 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 1 | |
| r | -0,62 | 0,12 | -0,29 | 0,05 | -0,48 | -0,62 | -0,61 | -0,62 | -0,61 | -0,13 | -0,64 | -0,61 | -0,32 | -0,61 | -0,61 | -0,62 | -0,82 | 1 |

Inicialmente se detectó una correlación mayor a 0,7 entre las variables relacionadas con la evapotranspiración, temperatura, termicidad y rugosidad del terreno (Tabla 5). Las variables maxTempColdest (Máxima temperatura del mes más frío), minTempWarmest (Mínima temperatura del mes más cálido), growingDegdays5 (Suma de la temperatura media mensual durante meses con una temperatura media superior a 5°C multiplicada por el número de días), growingDegDays0 (Suma de la temperatura media mensual para los meses con una temperatura media mayor a 0°C multiplicada por el número de días), thermind (Indice de termicidad compensada), PETDriestQuarter (PET media mensual del trimestre más seco), PETColdesQuarter (PET media mensual del trimestre más frío), PETWettestQuarter (PET media mensual del trimestre más húmedo), annualPET (Evapotranspiración potencial actual), PETWarmestQuarter (PET media mensual del trimestre cálido) fueron las que mostraron una correlación elevada mayor a >0,7, las variables topoWet (Indice de humedad topográfico SAGA-GIS) y tri (Indice de rugosidad del terreno) presentaron una correlación negativa (> -0,7) (Ver Fig. 7).

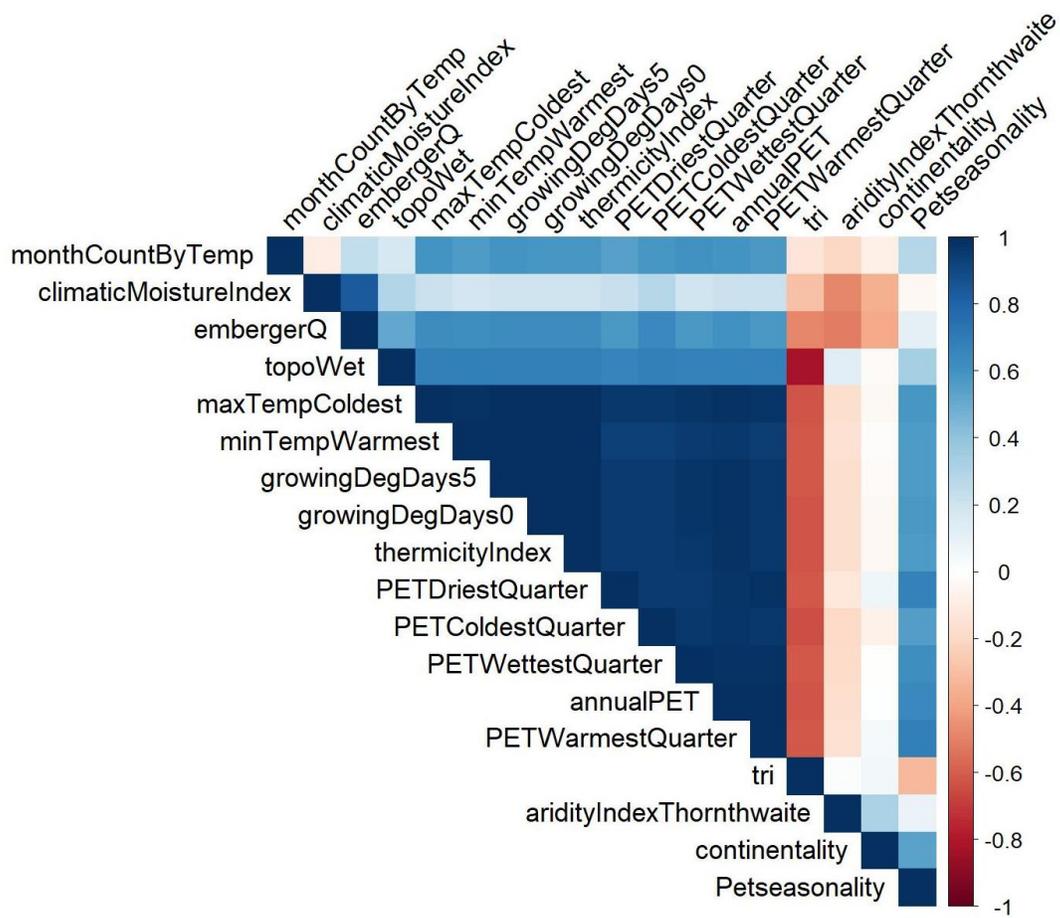


Figura 7. Correlograma de las variables ambientales para la distribución actual.

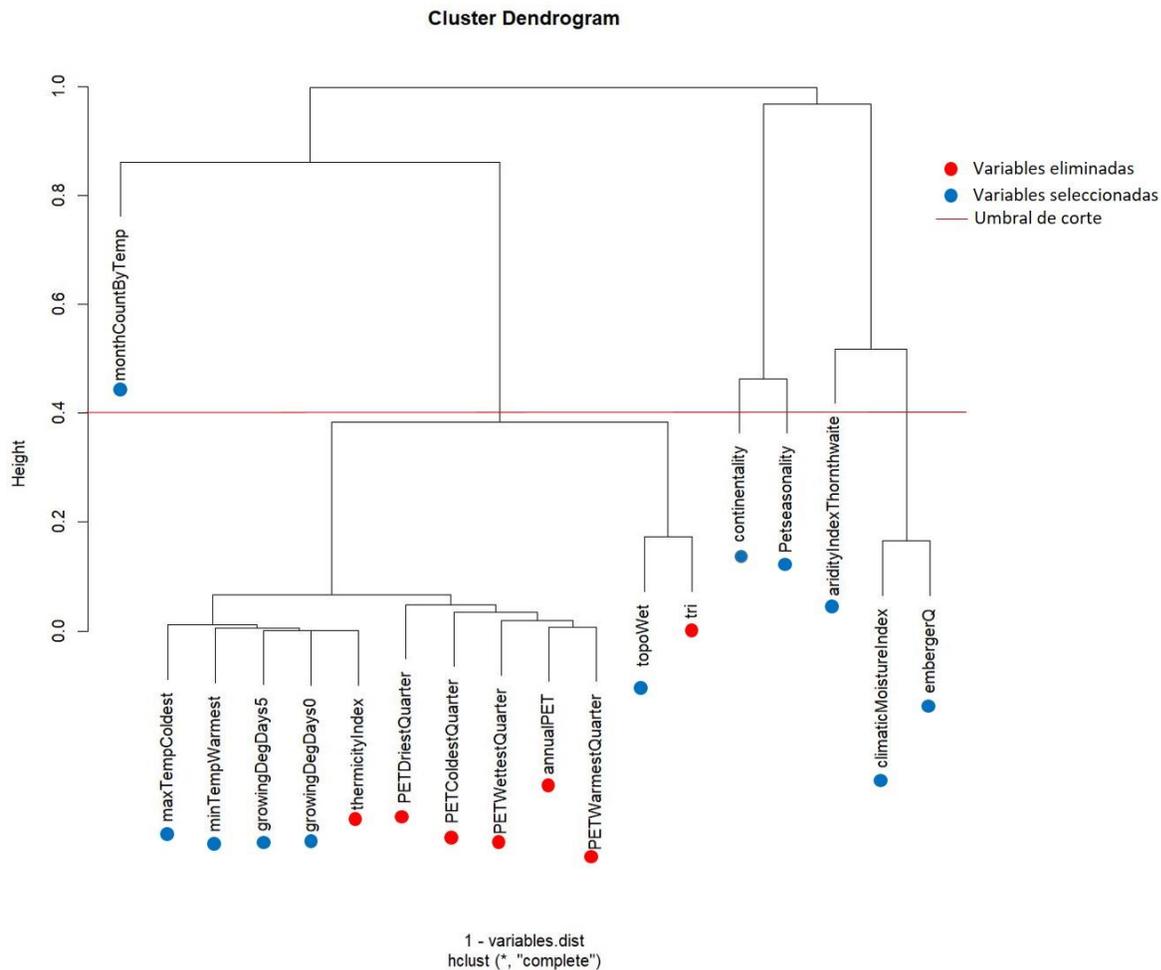


Figura 8. Dendrograma de las variables ambientales para la distribución actual.

El análisis clúster, representado como dendrograma (Ver Fig. 8) confirmó el alto grado de asociación entre las variables de evapotranspiración y temperatura, dentro de estas variables se escogieron las variables maxTempColdest (Máxima temperatura del mes más frío), minTempWarmest (Mínima temperatura del mes más cálido), growingDegdays5 (Suma de la temperatura media mensual durante meses con una temperatura media superior a 5 °C multiplicada por el número de días, growingDegDays0 (Suma de la temperatura media mensual para los meses con una temperatura media mayor que 0 °C multiplicada por el número de días) ya que al ser variables relacionadas con la temperatura influyen en la distribución de las mariposas, además las

variables monthCountByTemp (Recuento del número de meses con una temperatura media superior a 10°C), topoWet (Índice de humedad topográfico SAGA-GIS), climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez), embergerQ (Cociente pluviométrico de Emberger), continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frio), Petseasonality (Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial) y aridityIndexThorntwaite (Índice de aridez de Thorntwaite) fueron seleccionadas por poseer un índice bajo de correlación en el correlograma (>0.7). El resto de predictores no correlacionados se situaron en ramas con una gran distancia de similaridad. Finalmente, para eliminar todo indicio de multicolinealidad se calculó el VIF para las variables seleccionadas en el paso anterior, que como se indicó en la metodología también podría estar provocada por la combinación lineal de varias variables (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis VIF de las variables ambientales para la distribución actual

| Variable | VIF (1 ^{er} análisis) | VIF(2 ^{do} análisis) |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| climaticMoistureIndex | 12.257443 | 1.924043 |
| embergerQ | 20.401052 | ----- |
| aridityIndexThorntwaite | 2.073933 | 1.706120 |
| Continentality | 2.506946 | 1.974175 |
| monthCountByTemp | 2.349202 | 1.428124 |
| Petseasonality | 4.412592 | 2.003578 |
| topoWet | 3.078319 | 1.508038 |
| growingDegDays5 | 431.932370 | ----- |
| growingDegDays0 | 886.587868 | ----- |
| maxTempColdest | 167.532927 | ----- |
| minTemWarmest | 258.806836 | ----- |

Los valores VIF detectaron una alta linealidad en variables relacionadas con la temperatura, las variables maxTempColdest (Máxima temperatura del mes más frío), minTempWarmest (Máxima temperatura del mes más frío), growingDegDays0 (Suma de la temperatura media mensual para los meses con una temperatura media mayor que 0 °C multiplicada por el número de días), growingDegdays5 (Suma de la temperatura media mensual durante meses con una temperatura media superior a 5 °C multiplicada por el número de días) y embergerQ (Cociente pluviométrico de Emberger) fueron excluidas por presentar valores VIF demasiado altos (160-880), después de eliminadas se realizó un segundo análisis para observar la colinealidad de las variables nuevamente, los valores disminuyeron en todas las variables restantes (Tabla 5).

5.2.1.2 Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2050

Inicialmente se detectó una correlación mayor a 0,7 entre las variables relacionadas con la temperatura y la precipitación (Tabla 7). Las variables bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), bio5 (Temperatura máxima de calentamiento mes), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio1 (Temperatura media anual), bio10 (Temperatura media del trimestre más cálido), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio12 (Precipitación anual) fueron las variables que mostraron una correlación elevada ($>0,7$) (Ver Fig. 9).

Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2050.

| | bio1 | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 | bio2 | bio3 | bio4 | bio5 | bio6 | bio7 | bio8 | bio9 | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|--|
| bio1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio10 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio11 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio12 | 0,58 | 0,58 | 0,58 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio13 | 0,58 | 0,58 | 0,57 | 0,93 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio14 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 0,6 | 0,7 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| bio15 | -0,12 | -0,12 | -0,13 | -0,32 | -0,11 | -0,11 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| bio16 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,98 | 0,93 | 0,57 | -0,27 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| bio17 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,8 | 0,83 | 0,87 | -0,38 | 0,76 | 1 | | | | | | | | | | | |
| bio18 | 0,17 | 0,17 | 0,16 | 0,34 | 0,55 | 0,74 | 0,2 | 0,33 | 0,54 | 1 | | | | | | | | | | |
| bio19 | 0,42 | 0,42 | 0,43 | 0,75 | 0,52 | 0,12 | -0,55 | 0,75 | 0,46 | -0,21 | 1 | | | | | | | | | |
| bio2 | 0,35 | 0,36 | 0,34 | 0,33 | 0,39 | 0,28 | 0,19 | 0,34 | 0,27 | 0,14 | 0,05 | 1 | | | | | | | | |
| bio3 | 0,72 | 0,71 | 0,73 | 0,43 | 0,41 | 0,37 | -0,15 | 0,41 | 0,42 | 0,05 | 0,35 | 0,26 | 1 | | | | | | | |
| bio4 | 0,22 | 0,23 | 0,19 | 0,06 | 0,19 | 0,25 | 0,31 | 0,06 | 0,11 | 0,29 | -0,18 | 0,34 | - | 1 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,24 | | | | | | | |
| bio5 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,6 | 0,59 | 0,43 | -0,13 | 0,57 | 0,5 | 0,14 | 0,45 | 0,41 | 0,7 | 0,24 | 1 | | | | | |
| bio6 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,58 | 0,56 | 0,42 | -0,16 | 0,55 | 0,49 | 0,12 | 0,46 | 0,29 | 0,74 | 0,16 | 0,98 | 1 | | | | |
| bio7 | -0,18 | -0,17 | -0,19 | 0,01 | 0,07 | -0 | 0,27 | 0,02 | -0,04 | 0,09 | -0,19 | 0,73 | - | 0,47 | -0,1 | - | 1 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,45 | | 0,25 | | | | | |
| bio8 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,57 | 0,57 | 0,45 | -0,1 | 0,54 | 0,49 | 0,19 | 0,39 | 0,36 | 0,72 | 0,23 | 0,99 | 0,99 | -0,16 | 1 | | |
| bio9 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,59 | 0,58 | 0,42 | -0,15 | 0,56 | 0,5 | 0,13 | 0,46 | 0,35 | 0,72 | 0,2 | 0,99 | 0,99 | -0,18 | 0,99 | 1 | |

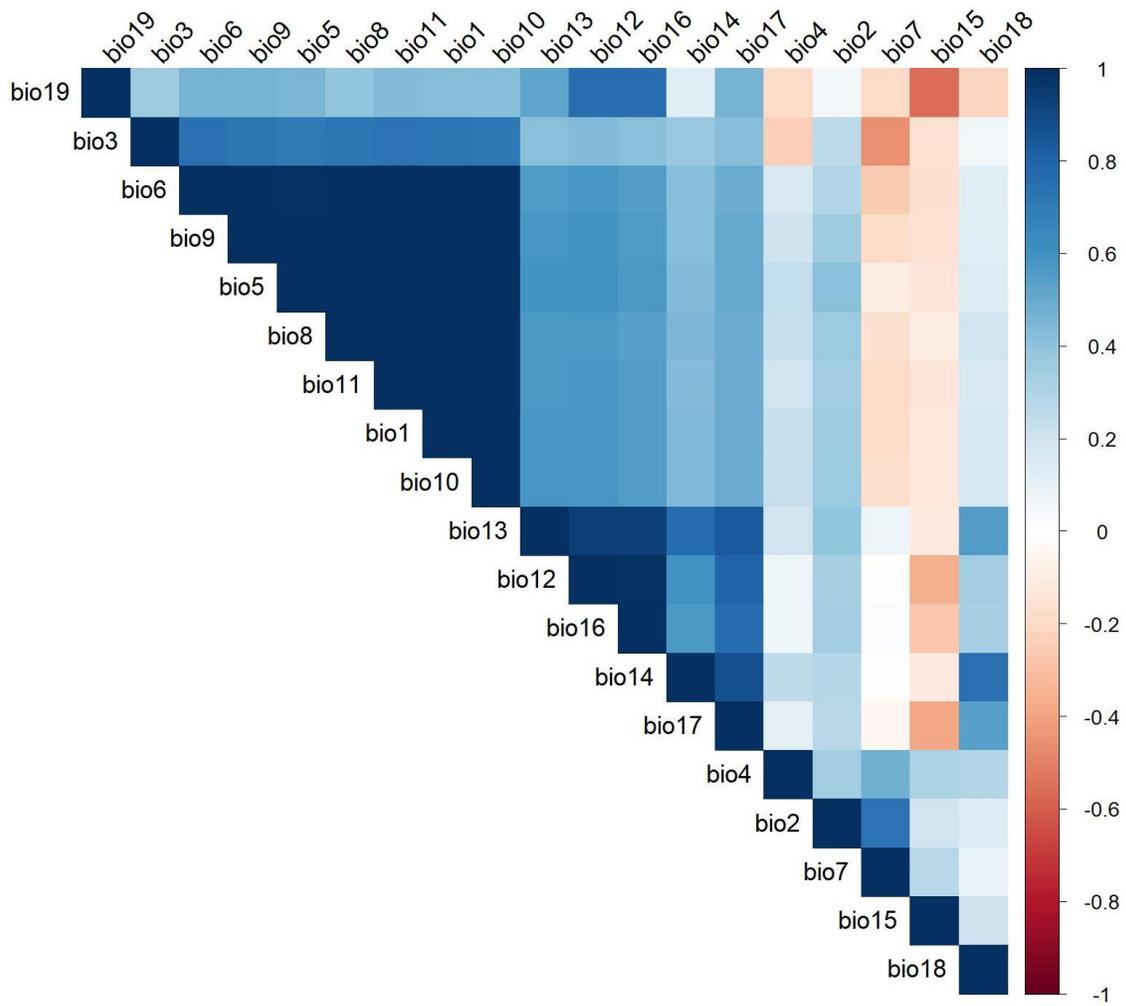


Figura 9. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050.

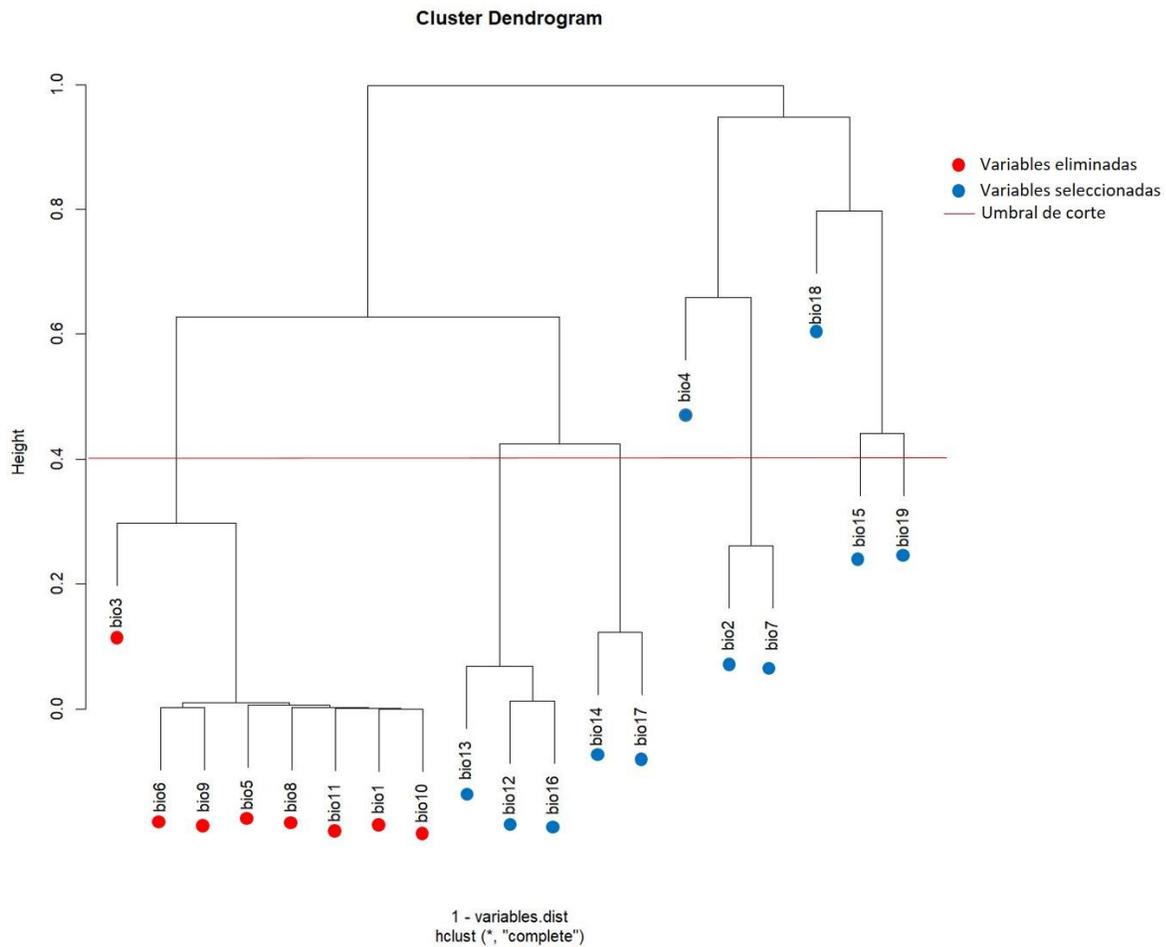


Figura 10. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050.

El análisis clúster, representado como un dendrograma (Ver Fig. 10) confirmó el alto grado de asociación entre las variables de precipitación y temperatura ya observadas en el correlograma, dentro de estas variables se escogieron las variables bio 13 (Precipitación del mes más húmedo), bio12 (Precipitación anual), bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo), bio14 (Precipitación del mes más seco), bio17 (Precipitación del trimestre más seco), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio19 (Precipitación del trimestre

más frío), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido) por poseer un índice bajo de correlación en el correlograma. El resto de predictores no correlacionados se situaron en ramas con una gran distancia de similitud. Finalmente, para eliminar todo indicio de multicolinealidad se calculó el VIF para las variables seleccionadas en el paso anterior, que como se indicó en la metodología también podría estar provocada por la combinación lineal de varias variables (Tabla 8).

Tabla 8. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2050.

| Variable | VIF (1 ^{er} análisis) | VIF(2 ^{do} análisis) |
|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Bio2 | 4.135305 | 3.477383 |
| Bio4 | 1.657878 | 1.581587 |
| Bio7 | 3.796902 | 3.578532 |
| Bio12 | 97.662323 | ----- |
| Bio13 | 44.930364 | ----- |
| Bio14 | 13.542982 | 4.152811 |
| Bio15 | 4.408503 | 1.889833 |
| Bio16 | 81.658273 | ----- |
| Bio17 | 12.577673 | ----- |
| Bio18 | 4.828308 | 3.393882 |
| Bio19 | 11.981479 | 1.727603 |

Los valores VIF detectaron una alta linealidad en variables relacionadas con la precipitación, las variables bio12 (Precipitación anual), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo) y bio17 (Precipitación del trimestre más seco) fueron excluidas por presentar valores VIF demasiado altos (97-12), después de eliminadas se realizó un

segundo análisis para observar la colinealidad de las variables nuevamente, los valores disminuyeron en todas las variables restantes (Tabla 6).

5.2.1.3 Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2050

Inicialmente se detectó una correlación mayor a 0.7 entre las variables relacionadas con la temperatura y la precipitación (Tabla 9) . Las variables bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), bio11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), bio5 (Temperatura máxima de calentamiento mes), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio1 (Temperatura media anual), bio10 (Temperatura media del trimestre más cálido), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio12 (Precipitación anual), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo) fueron las variables que mostraron una correlación elevada ($>0,7$)(Ver Fig. 11).

Tabla 9. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2050

| | bio1 | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 | bio2 | bio3 | bio4 | bio5 | bio6 | bio7 | bio8 | bio9 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|
| bio1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio10 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio11 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio12 | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio13 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,95 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| bio14 | 0,45 | 0,46 | 0,44 | 0,54 | 0,66 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| bio15 | -0,42 | -0,42 | -0,42 | -0,43 | -0,33 | -0,59 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| bio16 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,98 | 0,94 | 0,46 | -0,31 | 1 | | | | | | | | | | | |
| bio17 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,77 | 0,82 | 0,91 | -0,63 | 0,69 | 1 | | | | | | | | | | |
| bio18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,35 | 0,49 | 0,67 | -0,15 | 0,33 | 0,55 | 1 | | | | | | | | | |
| bio19 | 0,39 | 0,39 | 0,4 | 0,81 | 0,69 | 0,1 | -0,23 | 0,84 | 0,39 | -0,09 | 1 | | | | | | | | |
| bio2 | 0,37 | 0,39 | 0,37 | 0,36 | 0,39 | 0,27 | -0,02 | 0,35 | 0,32 | 0,35 | 0,13 | 1 | | | | | | | |
| bio3 | 0,67 | 0,67 | 0,69 | 0,42 | 0,4 | 0,29 | -0,28 | 0,38 | 0,37 | 0,09 | 0,41 | 0,22 | 1 | | | | | | |
| bio4 | 0,05 | 0,07 | 0,01 | -0,04 | 0,02 | 0,26 | -0,04 | -0,08 | 0,14 | 0,23 | -0,31 | 0,35 | - | 1 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,49 | | | | | | |
| bio5 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,58 | 0,56 | 0,45 | -0,4 | 0,48 | 0,53 | 0,18 | 0,41 | 0,44 | 0,65 | 0,08 | 1 | | | | |
| bio6 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,56 | 0,54 | 0,43 | -0,42 | 0,47 | 0,51 | 0,14 | 0,43 | 0,32 | 0,71 | - | 0,98 | 1 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 0,01 | | | | | |
| bio7 | -0,13 | -0,12 | -0,15 | 0,02 | 0,06 | 0,04 | 0,17 | 0,03 | 0,02 | 0,24 | -0,17 | 0,73 | - | 0,66 | -0,06 | -0,2 | 1 | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,49 | | | | | | |
| bio8 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,54 | 0,53 | 0,46 | -0,42 | 0,44 | 0,52 | 0,2 | 0,36 | 0,38 | 0,67 | 0,07 | 0,99 | 0,99 | -0,12 | 1 | |
| bio9 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,58 | 0,56 | 0,43 | -0,42 | 0,49 | 0,52 | 0,15 | 0,44 | 0,37 | 0,69 | 0,02 | 0,99 | 0,99 | -0,14 | 0,99 | 1 |

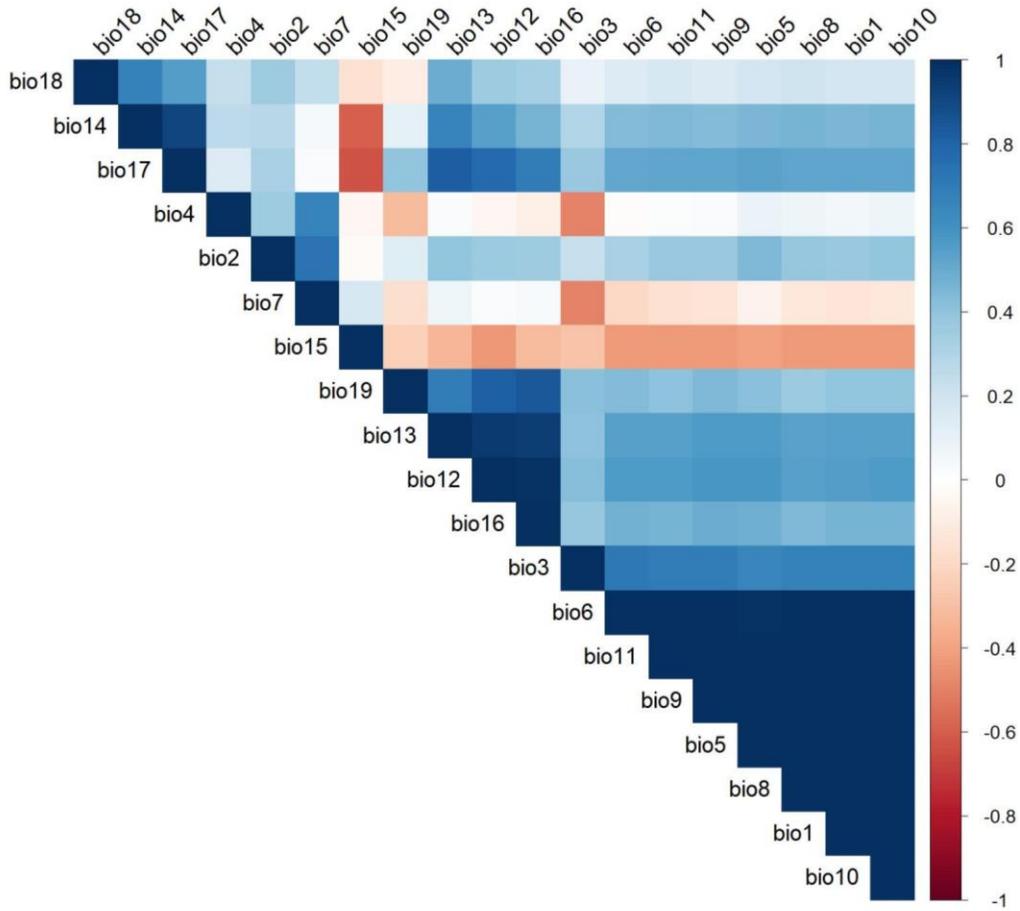


Figura 11. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050.

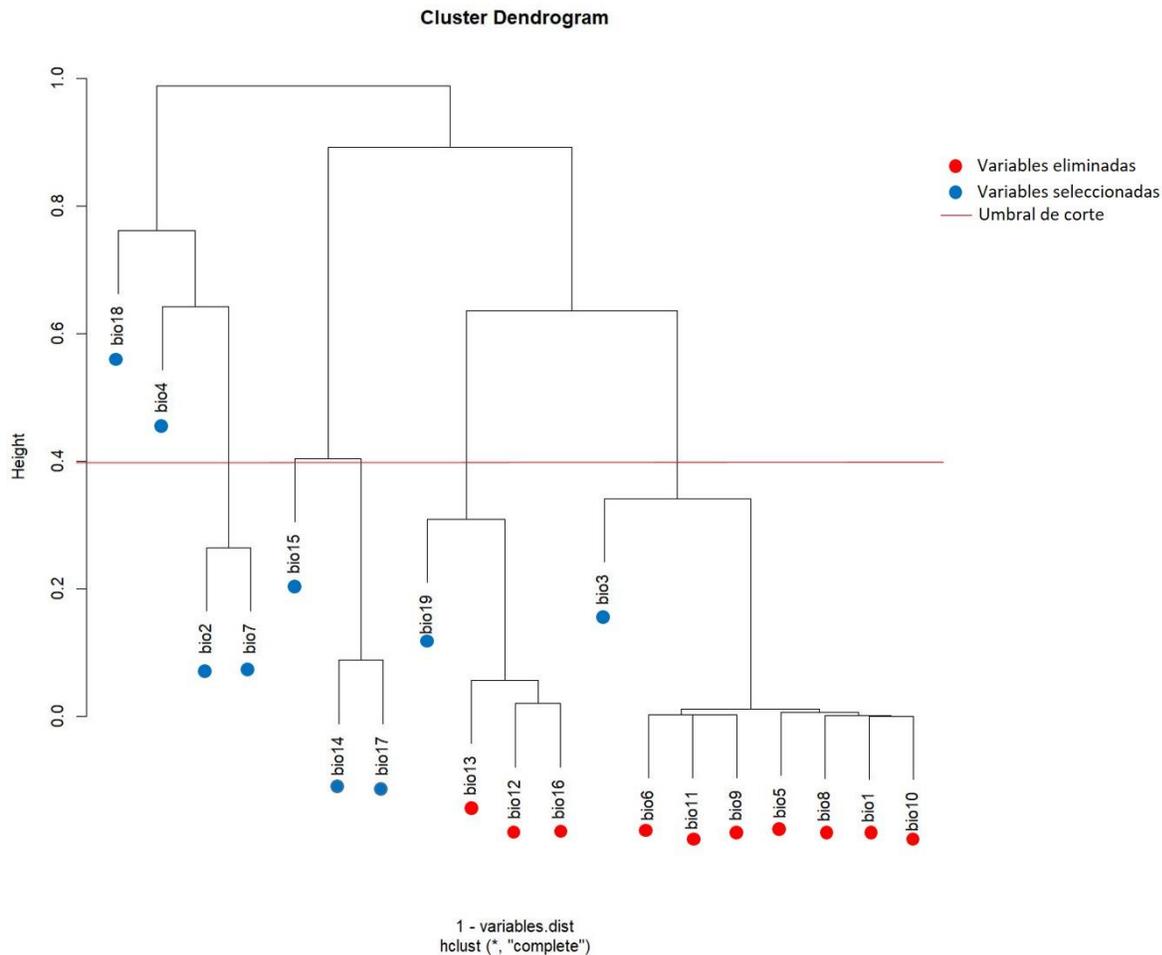


Figura 12. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050.

El análisis clúster, representado como un dendrograma (Ver Fig. 12) confirmó el alto grado de asociación entre las variables de precipitación y temperatura observadas en el correlograma, dentro de estas variables se escogieron las variables bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio2 (Rango diario medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio14 (Precipitación del mes más seco), bio17 (Precipitación del trimestre más seco), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)) por poseer un índice bajo de correlación en el

correlograma. Finalmente, para eliminar todo indicio de multicolinealidad se calculó el VIF para las variables seleccionadas en el paso anterior, que como se indicó en la metodología también podría estar provocada por la combinación lineal de varias variables (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050.

| Variable | VIF (1 ^{er} análisis) | VIF(2 ^{do} análisis) |
|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Bio2 | 190.617359 | 1.400457 |
| Bio3 | 114.696318 | ----- |
| Bio4 | 2.714455 | 1.454924 |
| Bio7 | 236.181614 | 5.08 |
| Bio14 | 14.253839 | 3.503098 |
| Bio15 | 2.045472 | 1.924619 |
| Bio17 | 14.384339 | ----- |
| Bio18 | 2.458668 | 2.355614 |
| Bio19 | 2.491465 | 1.363897 |

Los valores VIF detectaron una alta linealidad en variables relacionadas con la precipitación e isothermalidad, las variables bio3 (Isothermalidad (bio2/bio7)(*100)) y bio17 (Precipitación del trimestre más seco) fueron excluidas por presentar valores VIF demasiado altos (14-114), después de eliminadas se realizó un segundo análisis para observar la colinealidad de las variables nuevamente, los valores disminuyeron en todas las variables restantes (Tabla 7).

5.2.1.4 Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2070

Inicialmente se detectó una correlación mayor a 0,7 entre las variables relacionadas con la temperatura y la precipitación (Tabla 11). Las variables bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), bio11 (Temperatura media del trimestre más seco), bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), bio5 (Temperatura máxima de calentamiento mes), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio1 (Temperatura media anual), bio10 (Temperatura media del trimestre más cálido), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio12 (Precipitación anual), bio16 (Precipitación del trimestre más húmedo) mostraron una correlación elevada ($>0,7$) (Ver Fig. 13).

Tabla 11. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 4.5 – 2070

| | bio1 | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 | bio2 | bio3 | bio4 | bio5 | bio6 | bio7 | bio8 | bio9 | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|--|
| bio1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio10 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio11 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio12 | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio13 | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 0,97 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio14 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,65 | 0,66 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| bio15 | -0,28 | -0,28 | -0,29 | -0,42 | -0,3 | -0,59 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| bio16 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,98 | 0,98 | 0,63 | -0,33 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| bio17 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,81 | 0,8 | 0,91 | -0,6 | 0,77 | 1 | | | | | | | | | | | |
| bio18 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,43 | 0,47 | 0,59 | -0,15 | 0,46 | 0,55 | 1 | | | | | | | | | | |
| bio19 | 0,45 | 0,45 | 0,46 | 0,84 | 0,77 | 0,31 | -0,37 | 0,81 | 0,52 | 0,14 | 1 | | | | | | | | | |
| bio2 | 0,36 | 0,36 | 0,35 | 0,28 | 0,35 | 0,23 | 0,14 | 0,33 | 0,24 | 0,18 | 0,05 | 1 | | | | | | | | |
| bio3 | 0,67 | 0,66 | 0,68 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | -0,28 | 0,36 | 0,37 | 0,21 | 0,42 | 0,19 | 1 | | | | | | | |
| bio4 | 0,18 | 0,19 | 0,15 | 0,05 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,08 | 0,11 | - | -0,12 | 0,37 | - | 1 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 0,006 | | | 0,37 | | | | | | | |
| bio5 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,55 | 0,55 | 0,43 | -0,25 | 0,53 | 0,5 | 0,13 | 0,46 | 0,43 | 0,64 | 0,22 | 1 | | | | | |
| bio6 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,54 | 0,54 | 0,43 | -0,3 | 0,51 | 0,5 | 0,12 | 0,49 | 0,3 | 0,7 | 0,13 | 0,98 | 1 | | | | |
| bio7 | -0,12 | -0,11 | -0,14 | -0,01 | 0,04 | -0,04 | 0,32 | 0,04 | -0,04 | 0,01 | -0,23 | 0,75 | - | 0,57 | -0,05 | -0,2 | 1 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,48 | | | | | | | |
| bio8 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,52 | 0,52 | 0,45 | -0,28 | 0,49 | 0,5 | 0,15 | 0,42 | 0,37 | 0,66 | 0,19 | 0,99 | 0,99 | -0,11 | 1 | | |
| bio9 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,55 | 0,55 | 0,43 | -0,29 | 0,53 | 0,51 | 0,13 | 0,49 | 0,36 | 0,68 | 0,17 | 0,99 | 0,99 | -0,14 | 0,99 | 1 | |

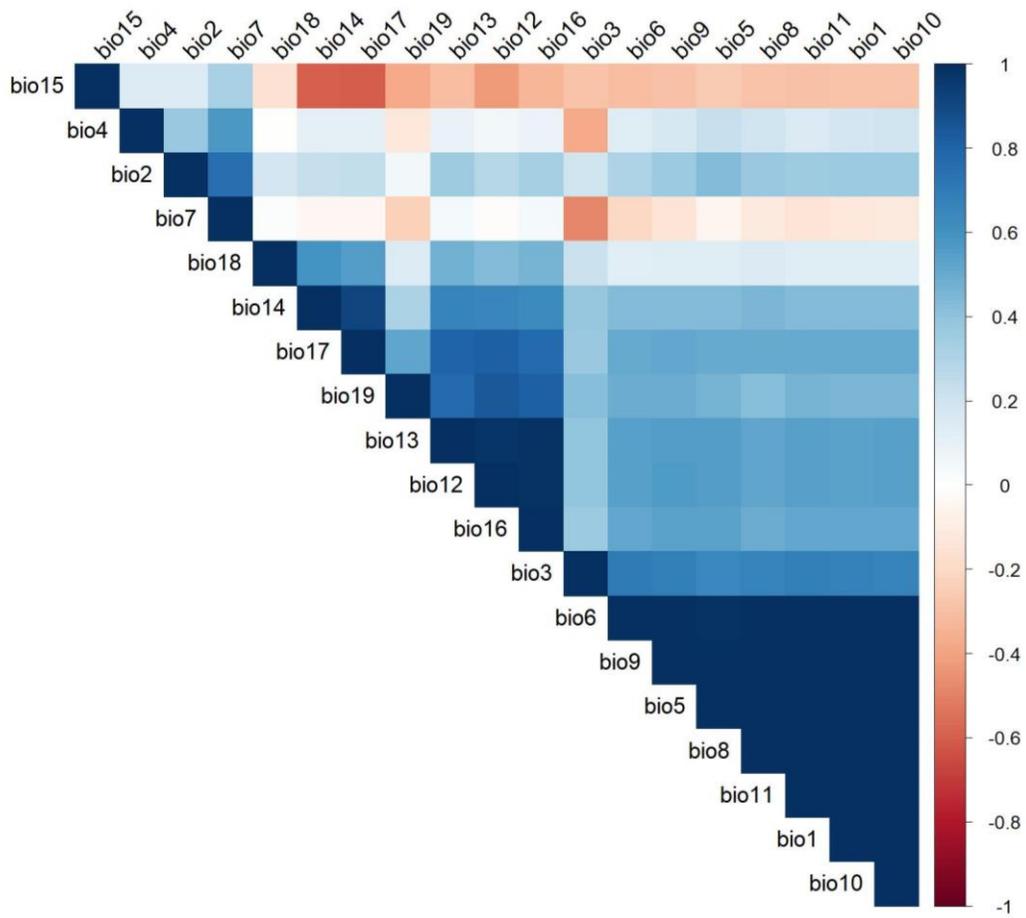


Figura 13. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2070.

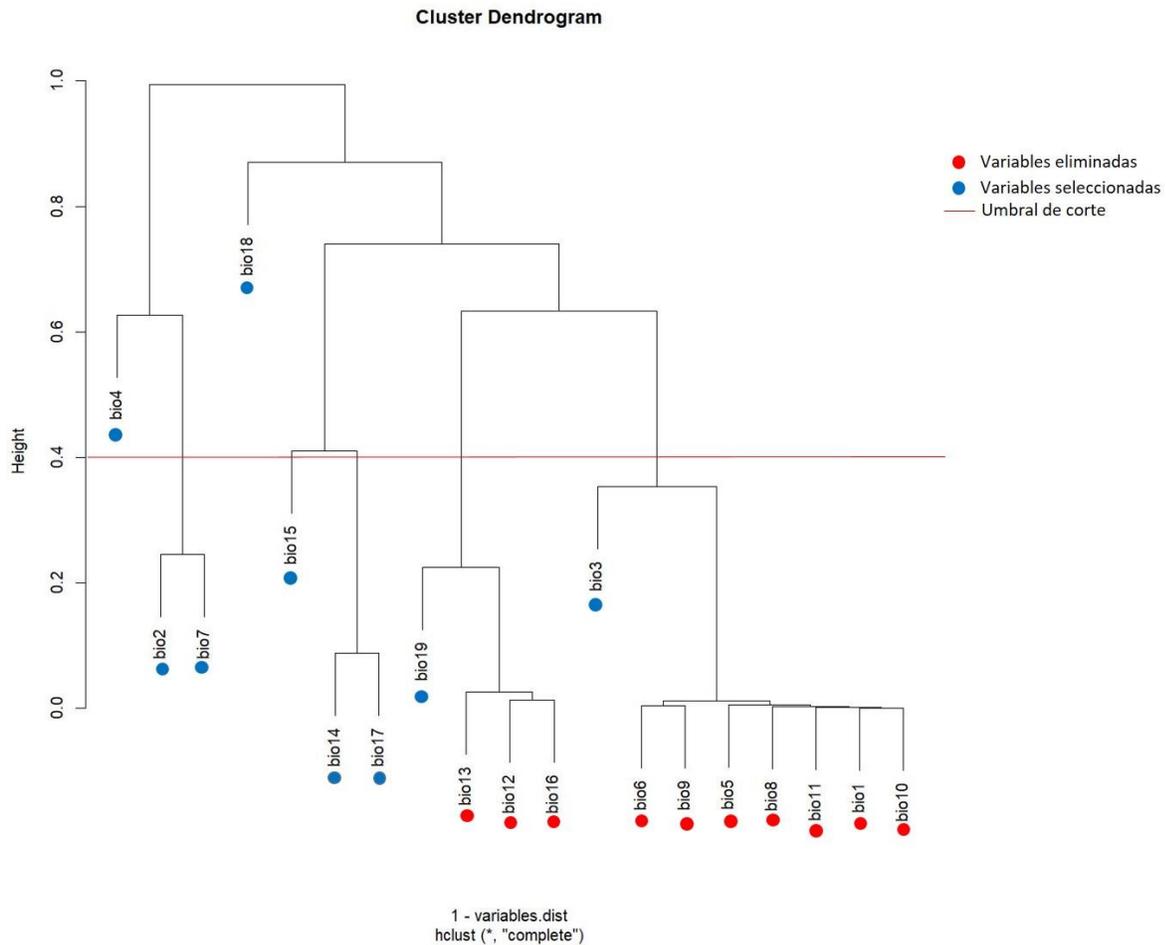


Figura 14. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP4.5-2070.

El análisis clúster, representado como un dendrograma (Fig. 14) confirmó el alto grado de asociación entre las variables de precipitación y temperatura, dentro de estas variables se escogieron las variables bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio14 (Precipitación del mes más seco), bio17 (Precipitación del mes más seco), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)) por poseer un índice bajo de correlación en el correlograma.

Finalmente, para eliminar todo indicio de multicolinealidad se calculó el VIF para las variables seleccionadas en el paso anterior, que como se indicó en la metodología también podría estar provocada por la combinación lineal de varias variables (Tabla 12).

Tabla 12. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2050.

| Variable | VIF (1 ^{er} análisis) | VIF(2 ^{do} análisis) |
|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Bio2 | 193.460484 | 1.522610 |
| Bio3 | 109.540350 | 1.880124 |
| Bio4 | 1.750259 | 1.729449 |
| Bio7 | 241.548643 | ----- |
| Bio14 | 9.213891 | 3.384561 |
| Bio15 | 2.221430 | 2.159427 |
| Bio17 | 10.158729 | ----- |
| Bio18 | 1.841299 | 1.799069 |
| Bio19 | 2.085646 | 1.343337 |

Los valores VIF detectaron una alta linealidad en variables relacionadas con la precipitación y temperatura, las variables bio7 y bio17 fueron excluidas por presentar valores VIF demasiado altos (10-241), después de eliminadas se realizó un segundo análisis para observar la colinealidad de las variables nuevamente, los valores disminuyeron en todas las variables restantes (Tabla 8).

5.2.1.5 Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2070

Inicialmente se detectó una correlación mayor a 0,7 entre las variables relacionadas con la temperatura y la precipitación (Tabla 13). Las variables bio5 (Temperatura máxima de calentamiento mes), bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), bio11 (Temperatura media del trimestre más frío), bio1 (Temperatura media anual), bio10 (Temperatura media anual), bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), bio13 (Precipitación del mes más húmedo) y bio12 (Precipitación anual) mostraron una correlación elevada ($>0,7$) (Ver Fig. 15).

Tabla 13. Análisis de correlación de Pearson para la Ruta de concentración representativa (RCP) 8.5 – 2070

| | bio1 | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 | bio2 | bio3 | bio4 | bio5 | bio6 | bio7 | bio8 | bio9 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| bio1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio10 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio11 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio12 | 0,52 | 0,52 | 0,53 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio13 | 0,62 | 0,62 | 0,61 | 0,9 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| bio14 | 0,42 | 0,43 | 0,42 | 0,69 | 0,76 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| bio15 | 0,005 | 0,007 | -0,01 | -0,31 | -0,02 | -0,33 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| bio16 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,97 | 0,95 | 0,68 | -0,16 | 1 | | | | | | | | | | | |
| bio17 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,81 | 0,83 | 0,92 | -0,35 | 0,8 | 1 | | | | | | | | | | |
| bio18 | 0,26 | 0,26 | 0,24 | 0,38 | 0,61 | 0,63 | 0,24 | 0,46 | 0,56 | 1 | | | | | | | | | |
| bio19 | 0,41 | 0,4 | 0,43 | 0,85 | 0,64 | 0,36 | -0,4 | 0,82 | 0,54 | 0,009 | 1 | | | | | | | | |
| bio2 | 0,37 | 0,38 | 0,36 | 0,36 | 0,4 | 0,27 | 0,18 | 0,38 | 0,3 | 0,32 | 0,16 | 1 | | | | | | | |
| bio3 | 0,36 | 0,34 | 0,39 | 0,35 | 0,21 | 0,16 | -0,33 | 0,31 | 0,2 | -0,13 | 0,49 | 0,09 | 1 | | | | | | |
| bio4 | 0,08 | 0,1 | 0,03 | -0,15 | 0,08 | 0,09 | 0,44 | -0,07 | 0,04 | 0,39 | -0,4 | 0,28 | - | 1 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | 0,76 | | | | | | |
| bio5 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,53 | 0,63 | 0,43 | 0,02 | 0,57 | 0,47 | 0,28 | 0,4 | 0,44 | 0,32 | 0,13 | 1 | | | | |
| bio6 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,53 | 0,61 | 0,41 | -0,03 | 0,56 | 0,46 | 0,22 | 0,45 | 0,32 | 0,43 | 0,001 | 0,98 | 1 | | | |
| bio7 | 0,06 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 0,16 | 0,1 | 0,37 | 0,07 | 0,1 | 0,35 | -0,22 | 0,72 | -0,6 | 0,76 | 0,14 | - | 1 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 0,02 | | | |
| bio8 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,49 | 0,61 | 0,43 | 0,03 | 0,54 | 0,46 | 0,29 | 0,36 | 0,38 | 0,32 | 0,13 | 0,99 | 0,98 | 0,1 | 1 | |
| bio9 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,55 | 0,63 | 0,42 | -0,02 | 0,58 | 0,47 | 0,23 | 0,46 | 0,37 | 0,4 | 0,03 | 0,99 | 0,99 | 0,03 | 0,98 | 1 |

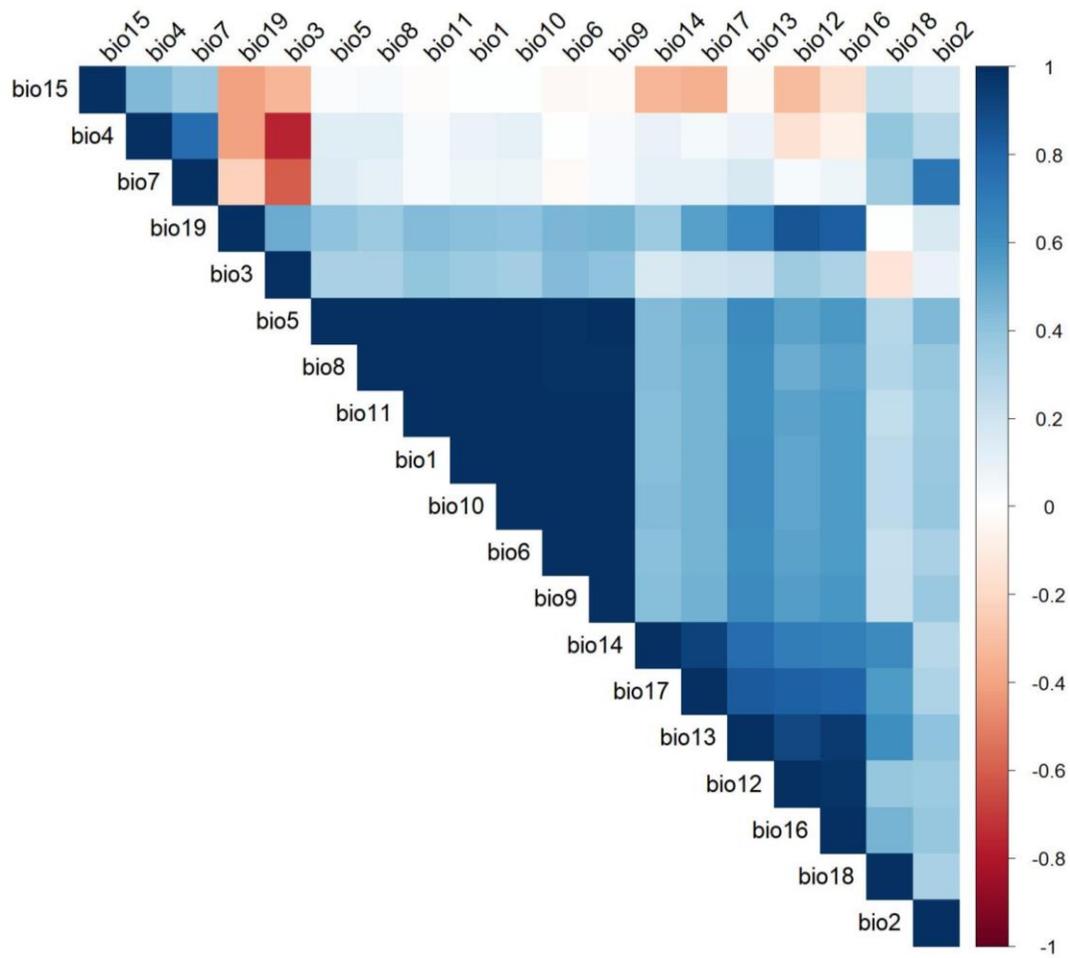


Figura 15. Correlograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070.

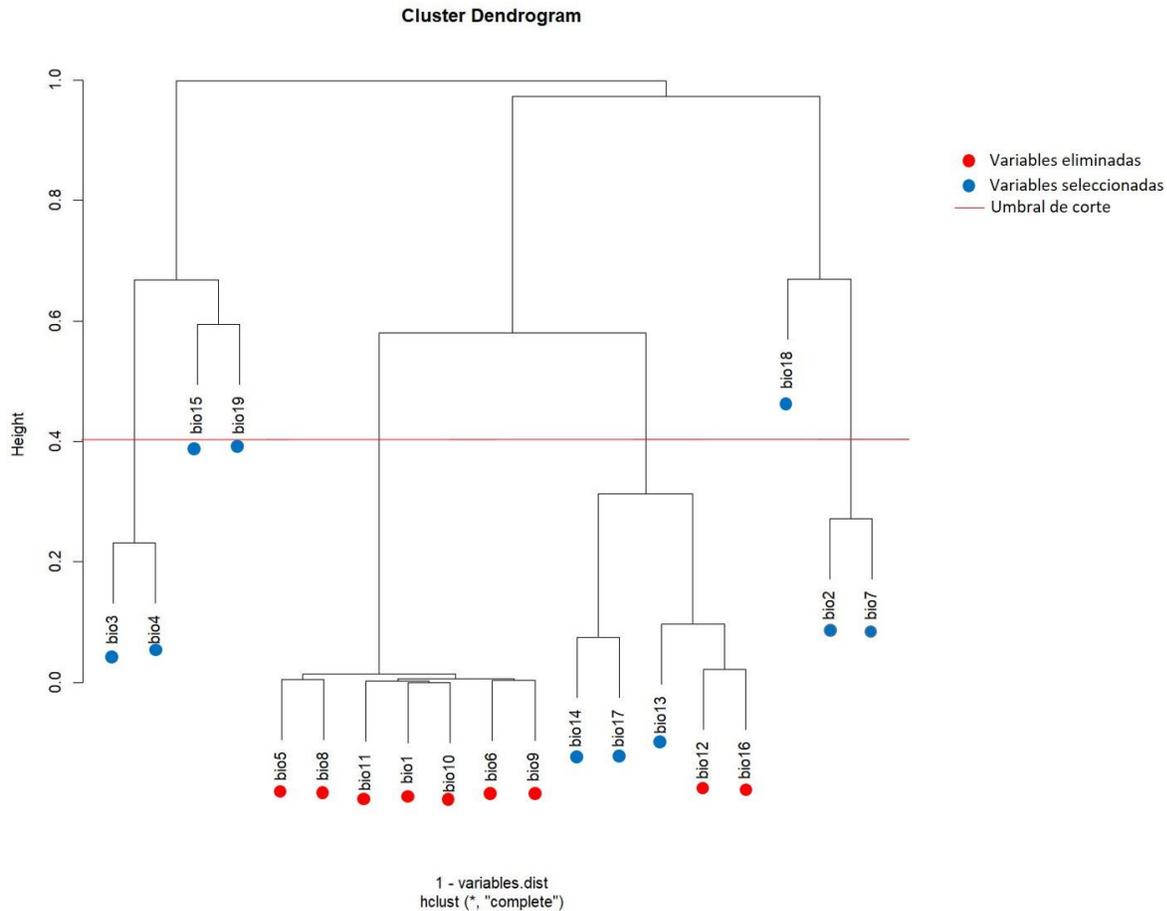


Figura 16. Dendrograma de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070.

El análisis clúster, representado como un dendrograma (Ver Fig. 16) confirmó el alto grado de asociación entre las variables de precipitación y temperatura, dentro de estas variables se escogieron las variables bio3 (Isotermalidad $(\text{bio2}/\text{bio7}) \cdot 100$), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar $\cdot 100$)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio14 (Precipitación del mes más seco), bio17 (Precipitación del trimestre más seco), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)) por poseer un índice bajo de correlación en el correlograma. Finalmente, para eliminar todo indicio de

multicolinealidad se calculó el VIF para las variables seleccionadas en el paso anterior, que como se indicó en la metodología también podría estar provocada por la combinación lineal de varias variables (Tabla 14).

Tabla 14. Análisis VIF de las variables ambientales para el escenario RCP8.5-2070.

| Variable | VIF (1 ^{er} análisis) | VIF(2 ^{do} análisis) |
|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Bio2 | 159.307257 | 1.565061 |
| Bio3 | 109.853864 | 3.775269 |
| Bio4 | 5.168936 | 4.619866 |
| Bio7 | 255.126083 | ----- |
| Bio15 | 3.533718 | 2.239306 |
| Bio18 | 3.120440 | 2.872517 |
| Bio19 | 5.198906 | 1.645911 |
| Bio14 | 11.418890 | ----- |
| Bio17 | 12.742143 | ----- |

Los valores VIF detectaron una alta linealidad en variables relacionadas con la precipitación y temperatura, las variables bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)), bio14 (Precipitación del mes más seco) y bio17 (Precipitación del trimestre más seco) fueron excluidas por presentar valores VIF demasiado altos (11-255), después de eliminadas se realizó un segundo análisis para observar la colinealidad de las variables nuevamente, los valores disminuyeron en todas las variables restantes (Tabla 9).

Excluidas todas las variables que presentaran multicolinealidad, se usaron todas las demás variables que no estuvieron correlacionadas para construir los modelos, se trata de que cada variable no correlacionada muestre una faceta mínimamente redundante y diferente de la respuesta de la variable dependiente que se intenta modelizar (Gutiérrez-Hernández, 2018).

5.2.2 Modelos de distribución de especies

Para determinar la distribución potencial se modelaron cuatro especies y 59 registros distribuidos de la siguiente manera: *Eurema elathea* poseía 20 registros, *Eurema daira* 13 registros, *Eurema albula* 13 registros y *Eurema arbela* 13 registros, estas especies fueron seleccionadas por contar con más de cinco registros de ocurrencia. La mayoría de los modelos seleccionados poseían una capacidad de predicción útil ($AUC > 0,7$), en general se obtuvieron 60 modelos (actuales y futuros) para las tres especies en estudio con valores ROC entre 0,7 y 1, de estos, tres modelos poseían valores ROC de 0,66 después de la eliminación del sesgo de clasificación espacial (cAUC). En el estudio se descartó la especie *Eurema arbela* por poseer el valor ROC inferior a 0,7 en los cuatro algoritmos utilizados.

5.2.2.1 *Eurema elathea*

5.2.2.1.1 Modelo lineal generalizado (GLM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio2 (Rango diario medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)) y bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y en el escenario RCP8.5

las variables fueron bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y bio2 (Rango diario medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó fue bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información (Anexo2). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.93-0.98. de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.81-1 (Anexo1). Los modelos evidencian un aumento en la distribución de la especie en el departamento Norte de Santander y una disminución en la distribución en el departamento de Santander en ambos escenarios (optimista y pesimista) para el año 2050, por otro lado se observó una disminución en la distribución de la especie para el año 2070 notándose aún más en el escenario pesimista (Ver Fig. 17).

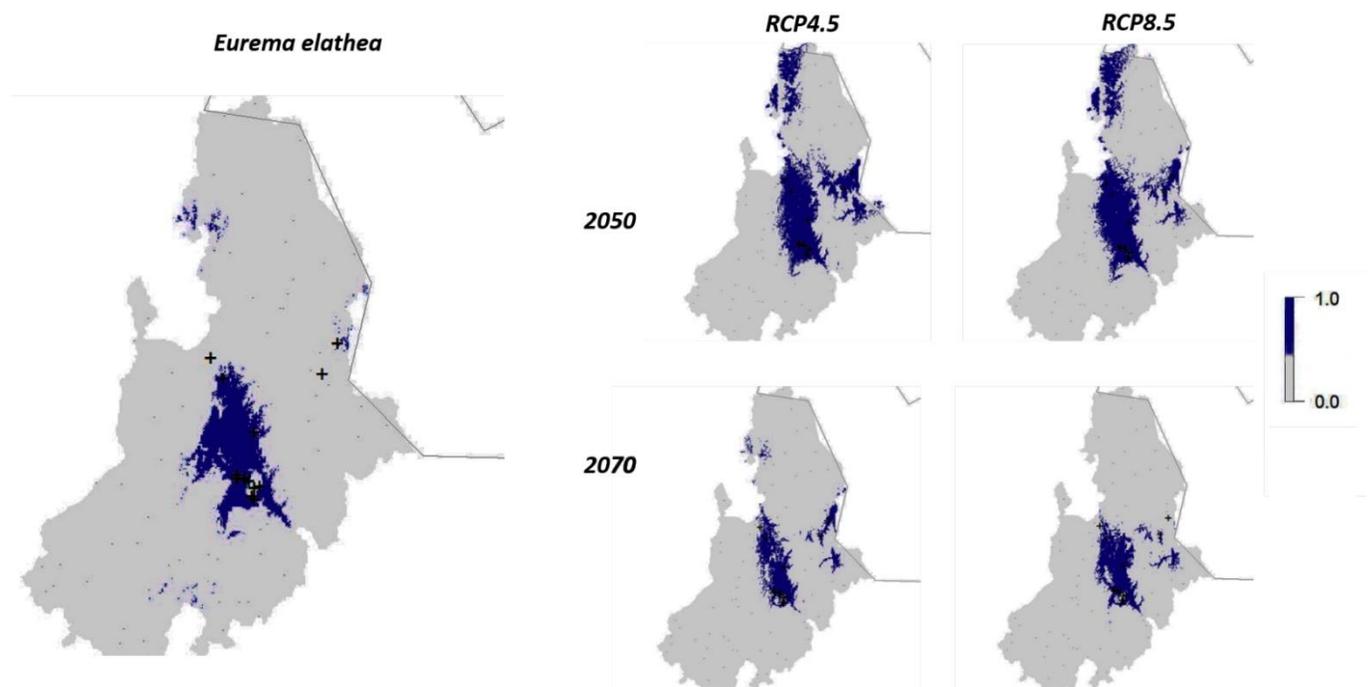


Figura 17. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema elathea* utilizando el algoritmo GLM.

5.2.2.1.2 Modelo aditivo generalizado (GAM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio2 (Rango diario medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)) y bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio19 y bio2; para el año 2070 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó fue bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información(Anexo2). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.93-0.98. de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.81-1 (Anexo1). Los modelos evidencian un aumento en la distribución de la especie en el departamento Norte de Santander y una disminución de la población para el departamento de Santander en el escenario optimista para el año 2050, se observa un aumento en la población para ambos departamentos en el escenario pesimista del mismo año. Para el año 2070 en el escenario optimista la población de mariposas aumenta en el departamento Norte de Santander y disminuye en el departamento de Santander, esta distribución de la especie aumentó en el departamento de Santander y disminuyó en el departamento Norte de Santander para el año 2070 (Ver Fig. 18).

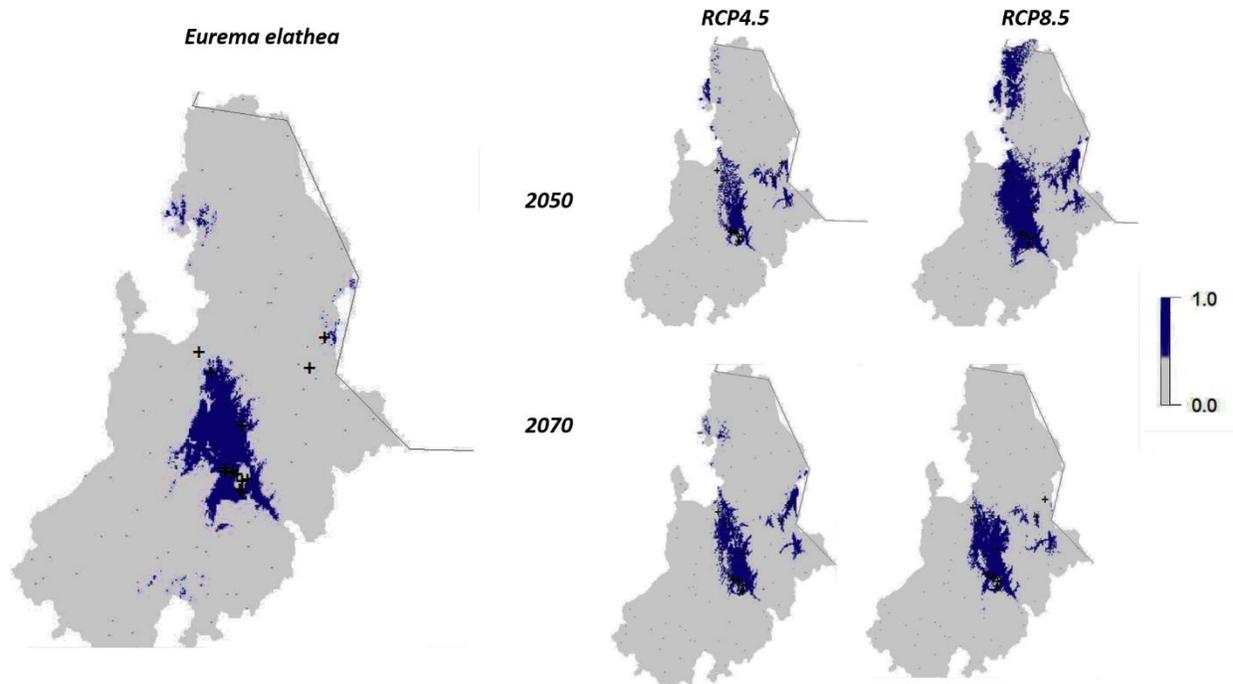


Figura 18. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema elathea* utilizando el algoritmo GAM.

5.2.2.1.3 Modelo de máxima entropía (MaxEnt)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frio). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)) y bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura

máxima – temperatura mínima))) y bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó fue bio3 (Isotermalidad $(\text{bio2}/\text{bio7})(*100)$), bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio14 (Precipitación del mes más seco) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Isotermalidad $(\text{bio2}/\text{bio7})(*100)$) y bio13 (Precipitación del mes más húmedo) (Anexo2). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.96-0.98. de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.87-1 (Anexo1). La distribución de la especie en el escenario optimista disminuyó en ambos departamentos en el escenario optimista y aumentó en el escenario pesimista para el año 2050 . En el año 2070 la distribución de la especie disminuyó en ambos escenarios para el departamento de Santander, sin embargo, en el escenario optimista se ve un aumento en la distribución de la especie para el departamento Norte de Santander (Ver Fig. 19).

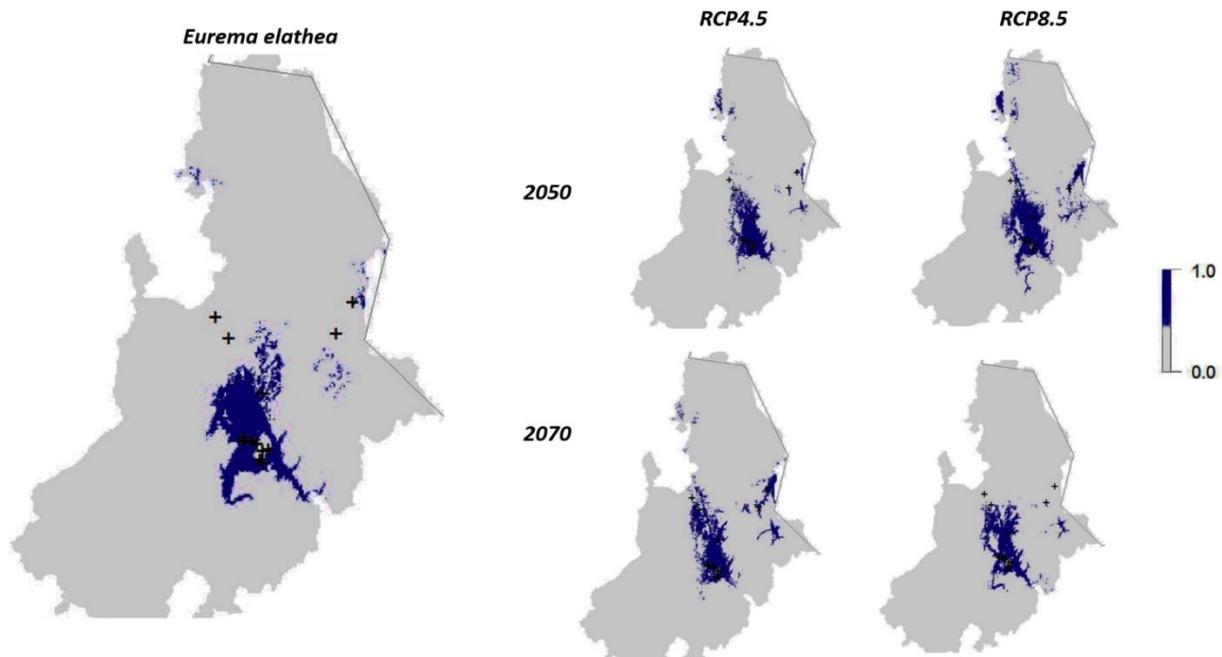


Figura 19. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema elathea* utilizando el algoritmo MaxEnt.

5.2.2.1.4 Árboles de clasificación (Random Forest)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frio). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio7 (Rango anual de temperatura (bio5-bio6)) y bio19 (Precipitación del trimestre más frío); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron fueron bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18

(Precipitación del trimestre más cálido) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Precipitación del mes más húmedo), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) y bio18 (Precipitación del trimestre más cálido) (Anexo2). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.93-0.98. de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.87-1 (Anexo1).

La distribución de la especie para el año 2050 disminuyó en ambos escenarios en los dos departamentos estudiados, sin embargo, la distribución es menor en el escenario pesimista. Para el año 2070 la distribución disminuyó en ambos escenarios viéndose más reflejada en el escenario pesimista donde la especie redujo su distribución a una pequeña proporción del departamento de Santander (Ver Fig. 20).

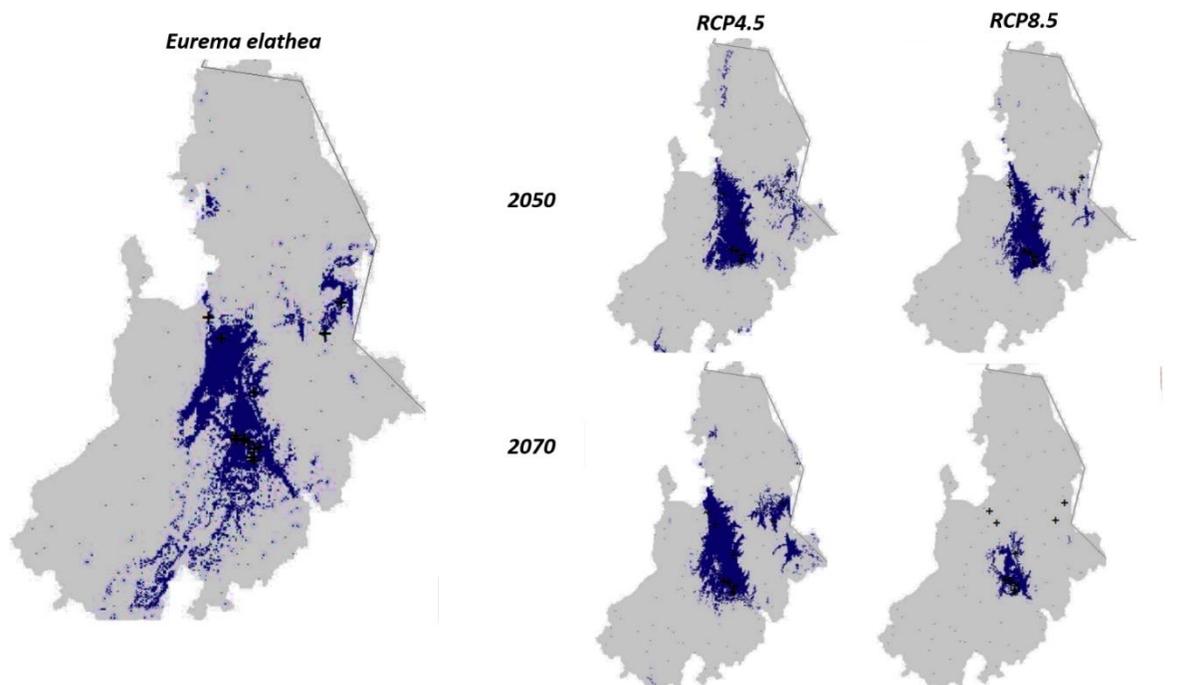


Figura 20. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema elathea* utilizando el algoritmo Random Forest.

5.2.2.2 *Eurema albula*

5.2.2.2.1 Modelo lineal generalizado (GLM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó al modelo fue bio2 y en el escenario RCP8.5 la variable fue bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 ninguna variable aportó información significativa y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información (Anexo3). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.79-0.92, los valores cAUC tuvieron un rendimiento regular con valores 0.66-1 (Anexo1). La distribución de la especie disminuyó de manera significativa en ambos departamentos en ambos escenarios, en el escenario optimista la distribución disminuye en ambos departamentos viéndose más afectado el departamento Norte de Santander, en el escenario pesimista la especie reduce más su distribución sobre todo en el departamento de Santander. Para el año 2070 en el escenario optimista la distribución se ve afectada en ambos departamentos, sin embargo, en el escenario pesimista la distribución se redujo de manera significativa en ambos departamentos (Ver Fig. 21).

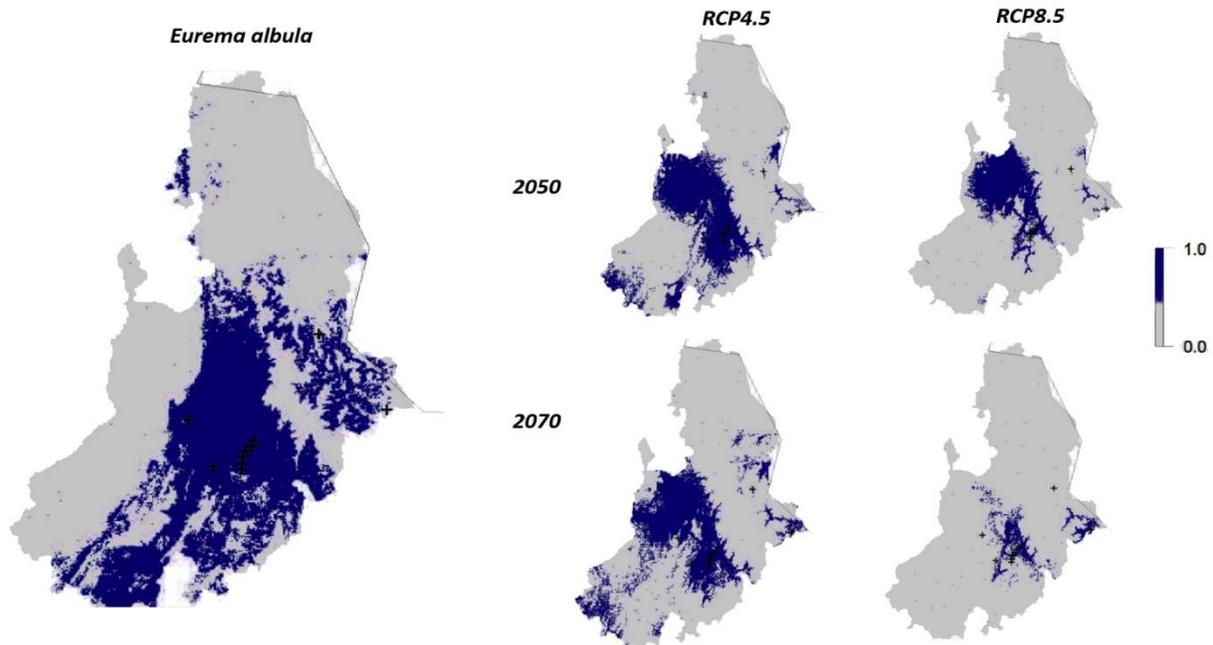


Figura 21. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema albula* utilizando el algoritmo GLM.

5.2.2.2.2 Modelo aditivo generalizado (GAM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó al modelo fue bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))) y en el escenario RCP8.5 la variable fue bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 ninguna variable aportó información significativa y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información (Anexo3). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.79-0.92, los valores cAUC tuvieron un rendimiento regular con valores 0.66-1 (Anexo1). La distribución de la especie disminuyó de manera significativa en ambos departamentos en ambos escenarios, en el escenario optimista la distribución disminuye en ambos departamentos viéndose más afectado el departamento Norte de Santander, en el escenario pesimista la especie reduce más su distribución

sobre todo en el departamento de Santander. Para el año 2070 en el escenario optimista la distribución se ve afectada en ambos departamentos, sin embargo, en el escenario pesimista la distribución se redujo de manera significativa en ambos departamentos (Ver Fig. 22).

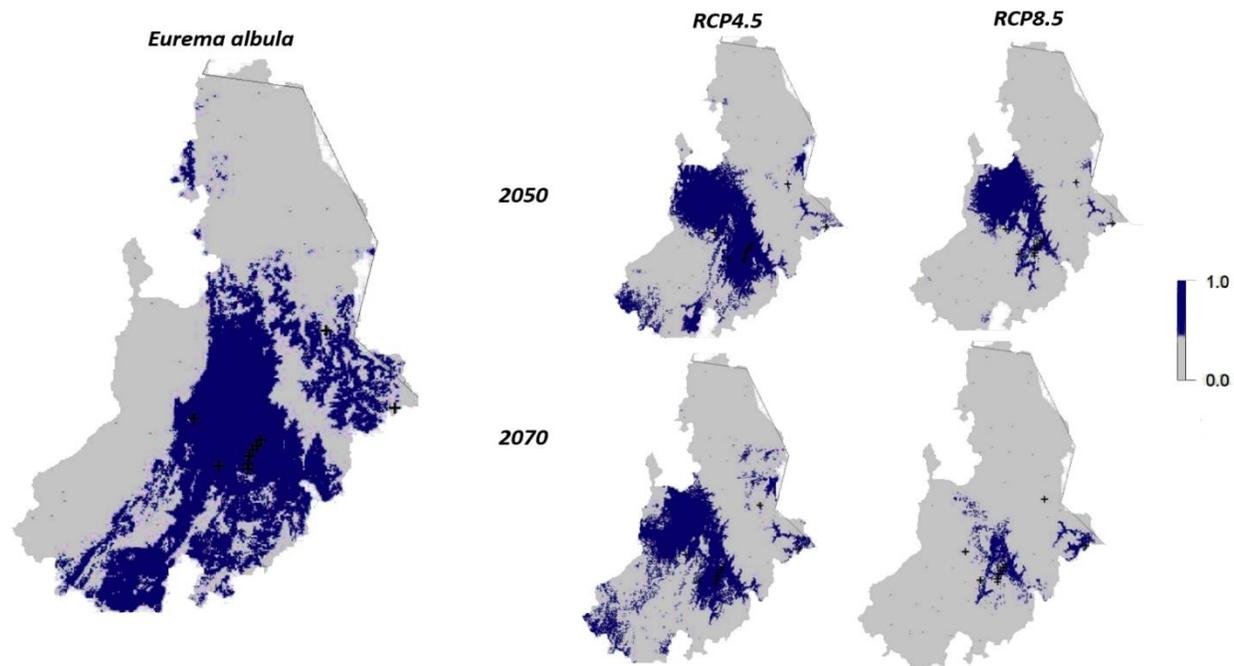


Figura 22. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema albula* utilizando el algoritmo GAM.

5.2.2.2.3 Modelo de máxima entropía (MaxEnt)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frio). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio18 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron fueron bio3

(Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)), bio13 (Precipitación del mes más húmedo) y bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) (Anexo3). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.74-0.87, de igual manera los valores cAUC tuvieron un mediano rendimiento 0.66-1 (Anexo1). Para el año 2050 la distribución disminuyó drásticamente quedando solo una proporción en el departamento de Santander, sin embargo, en el escenario pesimista la distribución aunque disminuyó lo hizo en menor proporción. Para el año 2070 la distribución se ve afectada en ambos escenarios, sin embargo, en el escenario pesimista se ve una menor distribución (Ver Fig. 23).

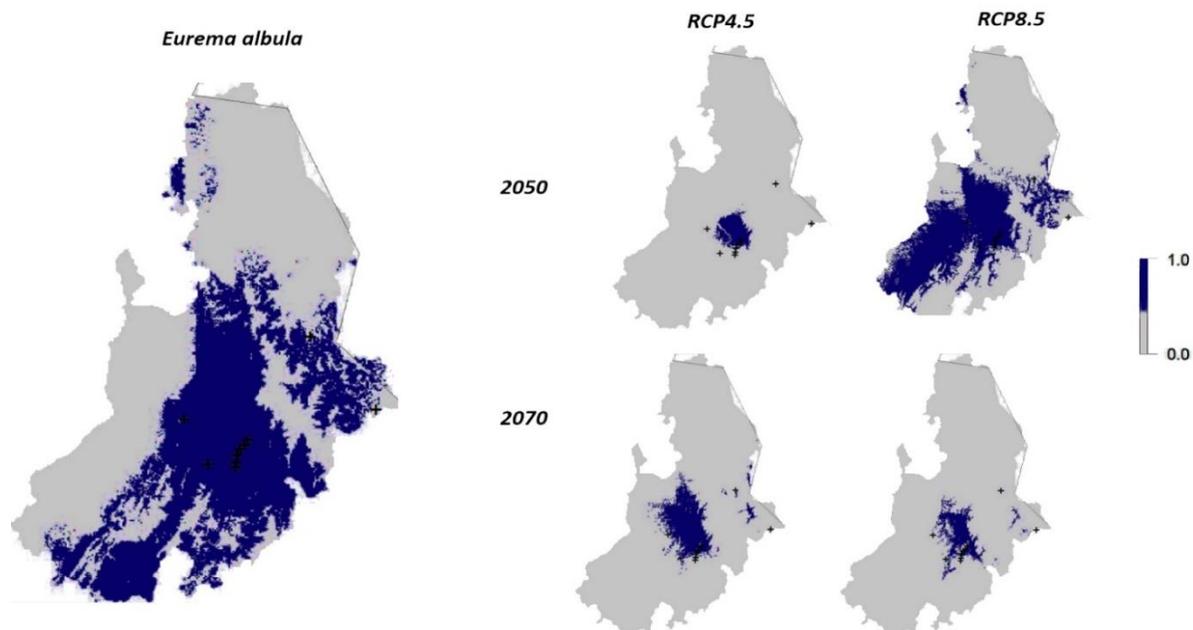


Figura 23. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema albula* utilizando el algoritmo MaxEnt.

5.2.2.2.4 Árboles de clasificación (Random Forest)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y Petseasonality (Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio18 (Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio18 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron fueron bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio3 (Isotermalidad ($\text{bio2/bio7} \cdot 100$)) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Isotermalidad ($\text{bio2/bio7} \cdot 100$)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)) (Anexo3). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.79-0.92, de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.88-1 (Anexo1). El modelo observado para el año 2050 en el escenario pesimista parece presentar una sobrepredicción, en el la distribución aumenta de manera significativa en ambos departamentos, contrario a esto, la distribución de la especie disminuye en el escenario optimista. Para el año 2070 en el escenario optimista la distribución de la especie aumentó en ambos departamentos pero disminuyó de manera significativa en el escenario pesimista en el que solo se ve reflejado una pequeña parte de la distribución de la especie en el departamento de Santander (Ver Fig. 24).

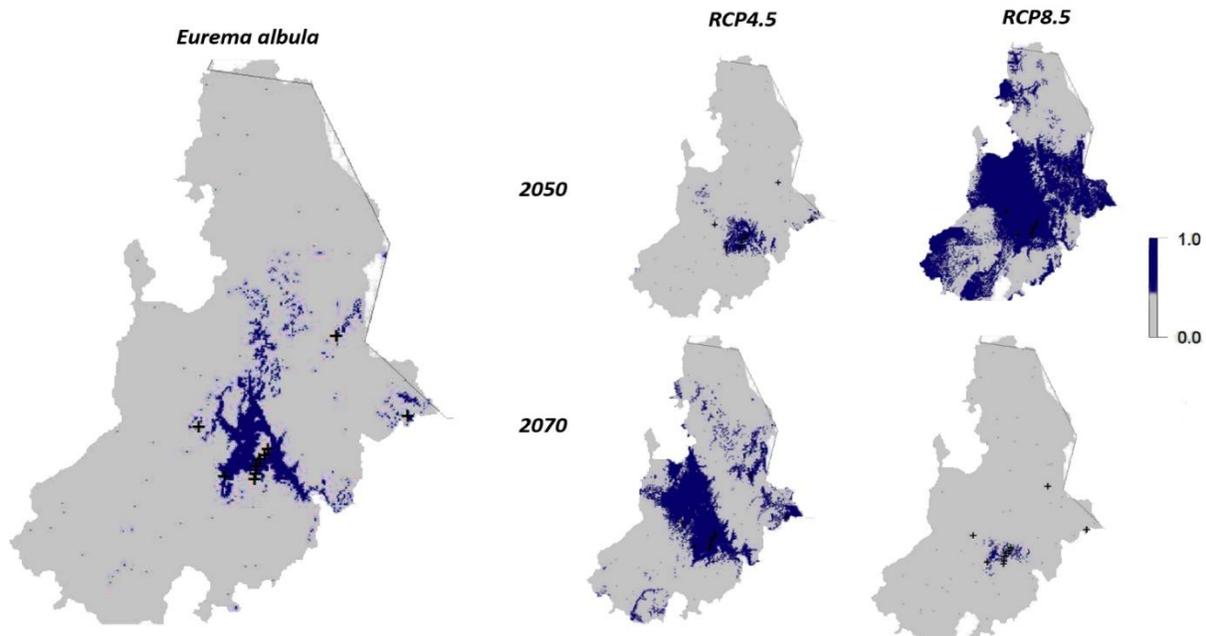


Figura 24. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema albula* utilizando el algoritmo Random Forest.

5.2.2.3 *Eurema daira*

5.2.2.3.1 Modelo lineal generalizado (GLM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó al modelo fue bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))) y en el escenario RCP8.5 ninguna variable aportó información significativa; para el año 2070 en el escenario RCP4.5 no hubo variables que aportaran información y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información (Anexo4). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.89-1, de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.77-1 (Anexo1). La distribución de la especie aumentó en el escenario optimista en ambos departamentos, sin embargo, en el escenario pesimista la especie disminuyó su distribución en el departamento Norte de Santander. Para el año 2070 la especie aumentó su distribución en ambos departamentos,

aunque en el departamento Norte de Santander se vió afectada disminuyendo su distribución (Ver Fig. 25).

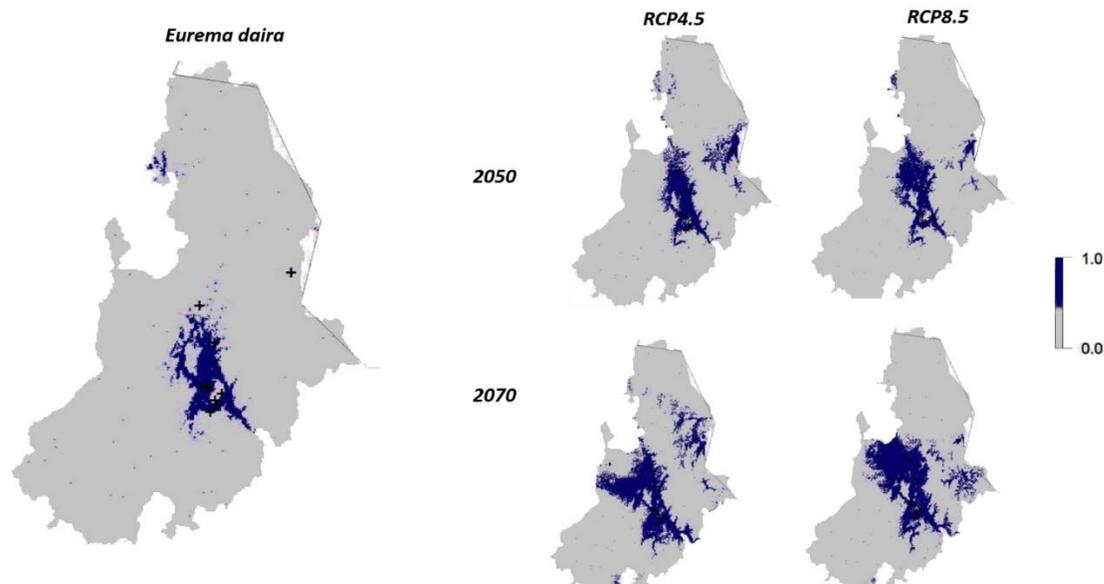


Figura 25. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema daira* utilizando el algoritmo GLM.

5.2.2.3.2 Modelo aditivo generalizado (GAM)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que la variable que aportó más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó al modelo fue bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))) y en el escenario RCP8.5 ninguna variable aportó información significativa; para el año 2070 en el escenario RCP4.5 no hubo variables que aportaran información y RCP8.5 ninguna variable aportó mayor información (Anexo4). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.89-1, de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.77-1 (Anexo1). La distribución de la especie aumentó en el escenario optimista en ambos departamentos, sin embargo, en el escenario pesimista la especie disminuyó su distribución en el departamento Norte de Santander. Para el año 2070 la especie aumentó su distribución en ambos departamentos,

aunque en el departamento Norte de Santander se vio afectada disminuyendo su distribución (Ver Fig. 26).

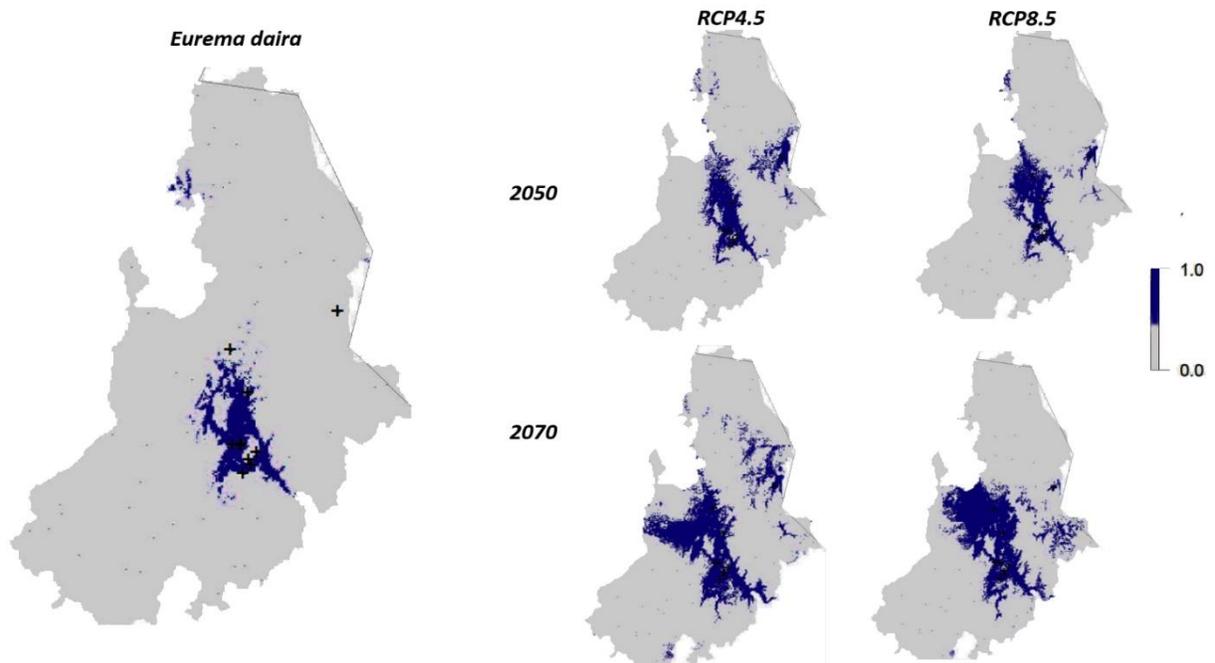


Figura 26. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema daira* utilizando el algoritmo GAM.

5.2.2.3.3 Modelo de máxima entropía (MaxEnt)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frío). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio19 (Precipitación del trimestre más frío), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio2 (Rango diurno medio

(Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima)); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 la variable que más aportó fue bio3 (Isotermalidad $(bio2/bio7)(*100)$), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Isotermalidad $(bio2/bio7)(*100)$), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio19 (Precipitación del trimestre más frío)(Anexo4). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.89-1, de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento 0.88-1 (Anexo1). La distribución de la especie para el año 2050 en el escenario optimista aumentó en algunas zonas del departamento Norte de Santander, en el escenario pesimista la distribución disminuyó en el departamento de Santander. Para el año 2070 la distribución aumentó en ambos escenarios, sin embargo, disminuyó en el departamento Norte de Santander en el escenario pesimista (Ver Fig. 27).

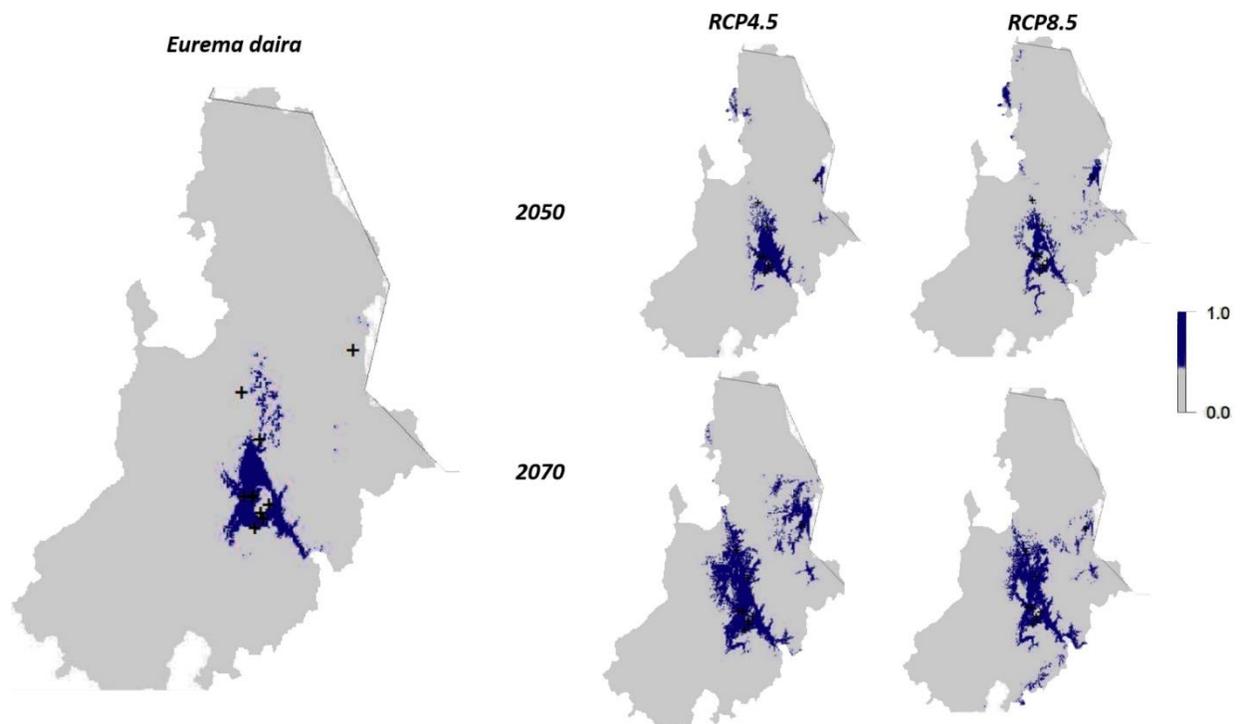


Figura 27. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema daira* utilizando el algoritmo MaxEnt.

5.2.2.3.4 Árboles de clasificación (Random Forest)

El modelo de distribución potencial actual para la especie evidenció que las variables que aportaron más información fue climaticMoistureIndex (Una métrica de humedad relativa y aridez) y continentality (Temperatura media del mes más calido – temperatura media del mes más frío). Para el año 2050 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron al modelo fueron bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio19 (Precipitación del trimestre más frío) y en el escenario RCP8.5 las variables fueron bio18 (Precipitación del trimestre más cálido), bio4 (Temporalidad de la temperatura (desviación estándar *100)), bio19 (Precipitación del trimestre más frío); para el año 2070 en el escenario RCP4.5 las variables que más aportaron fueron bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)), bio18 (Precipitación del trimestre más cálido) y en el escenario RCP8.5 bio3 (Isotermalidad (bio2/bio7)(*100)), bio13 (Precipitación del mes más húmedo), bio15 (Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)) y bio18 (Precipitación del trimestre más cálido) (Anexo4). Los valores AUC evidenciaron que los modelos tuvieron un alto rendimiento con valores 0.89-1, de igual manera los valores cAUC tuvieron un alto rendimiento con valores 1 (Anexo1). La distribución de la especie para el año 2050 disminuyó significativamente en ambos escenarios, desapareciendo la especie en el departamento Norte de Santander, en el escenario pesimista la distribución disminuyó aún más. Para el año 2070 la distribución disminuyó en el escenario optimista pero no de manera tan drástica como en el año 2050, de la misma manera en el escenario pesimista la distribución disminuyó desapareciendo la población de la especie en el departamento de Norte de Santander y reduciéndola en el departamento de Santander (Ver Fig. 28).

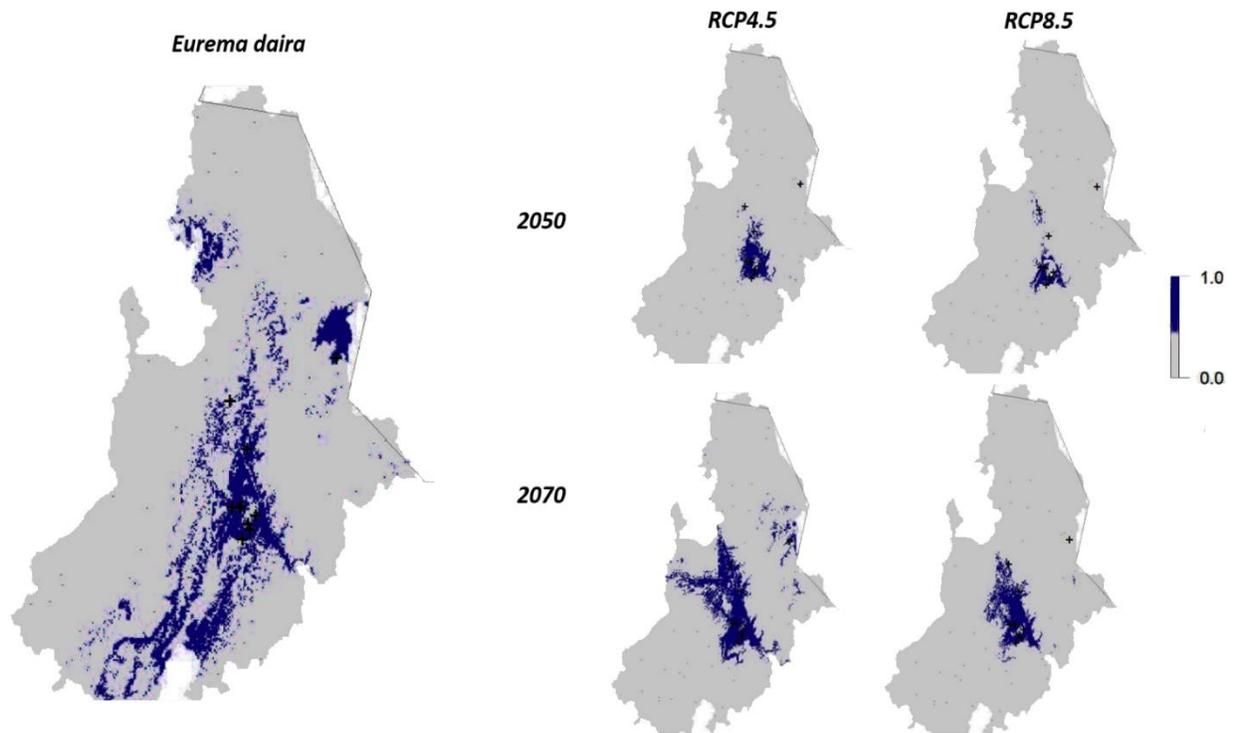


Figura 28. Modelos binarios de la distribución potencial actual y futura de la especie *Eurema daira* utilizando el algoritmo Random Forest.

6. DISCUSIÓN

6.1 Composición del ensamblaje de mariposas

La representatividad del muestreo en este estudio fue alta detectando un porcentaje significativo de las especies reales para las zonas de estudio, esta alta representatividad puede radicar en el alto grado de especies comunes, lo cual ayuda a elevar este valor (Chao y Jost, 2012; Olarte-Quiñonez, 2016), en este caso, las coberturas que presentaron los valores más altos de riqueza fueron las áreas abiertas donde las especies del género son muy frecuentes y de fácil detección (Le Crom et al., 2004; Casas-Pinilla et al., 2017).

La distribución de las abundancias de mariposas a nivel de coberturas vegetales, muestra a *Eurema arbela*, *Eurema albula* y *Eurema elathea* como las especies más dominantes en las coberturas estudiadas, indicando que estas aprovechan mejor los recursos disponibles en el entorno (Camero y Calderón, 2007; Olarte-Quiñonez, 2016).

Basados en los órdenes de diversidad, las diversidades observadas y esperadas calculadas en el orden 0D , 1D y 2D (Tabla 5) para las cuatro coberturas vegetales, la diversidad de orden 0D con valores de cinco especies efectivas para pastos y herbazal, cuatro especies para bosque y tres especies para cultivos indican que se presenta mayor riqueza de especies en las áreas abiertas como pastos y herbazal. La diversidad de orden 1D es de 4.21 y 4.20 para herbazal y pastos respectivamente, 3.88 para bosque y 1.72 para cultivos, indicando la mayor cantidad de especies típicas en herbazal y pastos. La diversidad de orden 2D es de 3.77 para bosque, 3.71 y 3.63 para pastos y herbazal, esto demuestra que hay una similaridad de especies comunes y muy abundantes en las tres coberturas con mayor riqueza, estos resultados indican que las especies han logrado adaptarse a los diferentes cambios de cobertura vegetal, debido a esto, resulta muy importante estudiar y conocer los patrones de diversidad en paisajes intervenidos como estrategia para

restaurar los ambientes naturales y conservar las especies de mariposas que habitan en ellos (Casas-Pinilla et al., 2017).

6.2 Desempeño de los algoritmos

Los resultados obtenidos representan la primera estimación de cambios en la distribución potencial actual y futura de tres especies del género *Eurema* en el nororiente colombiano ante escenarios de cambio climático.

Los algoritmos que mejores resultados arrojaron fueron MaxEnt y Random Forest para todas las especies estudiadas, posiblemente porque en este estudio no se utilizaron ausencias reales. El rendimiento de cada algoritmo utilizado fue evaluado a partir de la respuesta que este tenía al interactuar con las variables predictivas y no por los valores AUC. Debe resaltarse el hecho de que la predicción está influenciada por la forma en que cada algoritmo interacciona con las variables y el error heredado de los registros presencia/ausencia, cada predicción se hace en términos de aproximación, porque no se controlan todos los parámetros que determinan la distribución real de la especie (Gutiérrez-Hernández et al., 2018), de esta manera se obtiene una representación cartográfica de la capacidad de espacio que existe para que ocurra la presencia de una especie en función de las variables que se emplean para generar dicha representación (Aceves-Rangel, 2017). Este resultado ha sido detectado también por otros autores, Gutiérrez-Hernández et al. (2018) afirman que los métodos de regresión pueden dar lugar a una sobrepredicción del área de distribución potencial de la especie en comparación con los métodos de aprendizaje automático.

Respecto a los modelos generados a partir de los diferentes algoritmos, por motivos prácticos y por ser uno de los algoritmos que mejor rendimiento obtuvo, se realizó el análisis únicamente con el algoritmo Random Forest, este resultado también ha sido sugerido por diversos autores donde

se afirma que este algoritmo tiene potencial para aplicaciones en ecología y biogeografía, así como aplicaciones en conservación, especialmente en aquellas áreas donde el muestreo ha sido muy poco, debido a que permite evaluaciones rápidas y robustas (Breiman 2001; Blau 2012).

Quiñonez-Guzmán (2017) afirma que este algoritmo es una efectiva herramienta de predicción, ya que la utilización de la aleatoriedad lo hace muy preciso porque discrimina entre variables sin tomar en cuenta las variables de “ruido” que están presentes en el estudio (Breiman, 2001; Blau, 2012). Investigaciones similares también han encontrado que Random Forest arroja los mejores resultados en comparación con otros algoritmos que predicen la distribución utilizando otras especies, tales como las Grullas (Mi et al., 2016) y en especies forestales (Guzmán-Yera, 2018).

MaxEnt fue descartado a pesar de que existen estudios en los que señalan que este algoritmo es uno de los métodos de mayor poder predictivo y obtuvo un buen desempeño (Philips et al., 2006; Pearson et al., 2007; Ready et al. 2010; Jones et al., 2012, Svendsen, 2013), esto debido a que existen diversos estudios que critican su uso señalando que este algoritmo no produce una estimación de probabilidad de ocurrencia, sino que genera una estimación de un “índice de idoneidad” que está mal definido, de esta manera MaxEnt resulta inadecuado para explicar qué factores influyen en la probabilidad de ocurrencia de una especie (Elith et al., 2011; Royle et al., 2012).

6.3 Modelos de distribución

Los modelos generados para la distribución actual arrojaron que ClimaticMoistureIndex (Humedad relativa y aridez), continentality (Temperatura media del mes más cálido-Temperatura media del mes más frío) y Petseasonality (Variabilidad mensual en la evapotranspiración potencial), en la distribución futura para los años 2050 y 2070 en escenarios optimistas y pesimistas se evidenció que bio19 (Precipitación del trimestre más frío) , bio18 (Precipitación del trimestre

más cálido), bio15 (Estacionalidad de precipitación) y bio2 (Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima) son los predictores más importantes para las especies en estudio, estos factores de precipitación y temperatura influyen en la distribución de las mariposas y su variación puede ocasionar la pérdida en la composición de las especies en los ecosistemas (Romo et al., 2013; Pyrcz et al., 2009; Olarte-Quiñonez, 2016). Las especies de este género han sido relacionadas con estos factores climáticos en diversas investigaciones, estudios como el de Ruszczyk et al., 2004 encontraron una fuerte relación entre la especie y la precipitación mensual, con aumentos en la población seca y reducciones en la estación húmeda, estudios adicionales también relacionan este género con la temperatura detectando picos de población en verano y otoño (Saalfeld y Araujo, 1981; Ruszczyk et al., 2004).

Las especies del género *Eurema* son eurioicas, es decir, especies tolerantes a las variaciones en el medio y al igual que la mayoría de especies de la familia Pieridae son especies muy comunes y de amplia distribución gracias a su poca especialización con respecto a las plantas de las cuales se alimentan en su estado larval, estas especies pueden ser encontradas desde zonas muy perturbadas hasta algunas zonas que se encuentren conservadas ya que poseen complejos mecanismos de termorregulación (Vargas-Fernández et al. 1992; Clench 1996; Ospina-López et al., 2010), sin embargo, en este estudio se reflejó una reducción en la distribución de las especies estudiadas en ambos escenarios de cambio climático y para ambos períodos de tiempo, excepto la especie *Eurema albula*, la cuál aumentó en el escenario pesimista y disminuyó en el escenario optimista, esto se debe a que posiblemente el algoritmo realizó una sobrepredicción en el área de distribución potencial de la especie la cual no se considera coherente, estos resultados han sido encontrados por otros autores donde los modelos de distribución más complejos tienden a sobre-ajustarse a los datos, es decir, predicen muy bien en las zonas con datos disponibles, pero tienen un desempeño

bajo en las zonas no muestreadas, este problema parece estar asociado porque los datos de presencia no son representativos (Guisan & Thuiller, 2005; Randin et al., 2006; Ferrer-Paris, 2008).

A pesar de la plasticidad ecológica de estas especies y su amplio nicho ecológico, los modelos en este estudio reflejaron una drástica disminución de la distribución, en ambos escenarios de cambio climático, especialmente en el escenario pesimista, donde para el año 2070 la distribución de la mariposa se redujo significativamente, esta reducción puede atribuirse a la intensa transformación que está ejerciendo el hombre sobre los ecosistemas naturales aumentando la emisión de gases de invernadero y provocando un aumento en la temperatura en la biósfera particularmente notable en los últimos 100 años (IPCC 2007), estos cambios han reflejado una alteración en la distribución y abundancia de muchas especies presentes en los ecosistemas (Gutiérrez y Trejo, 2013). El calentamiento global parece estar ejerciendo un efecto negativo sobre las tres especies estudiadas, como con otras especies de mariposas (López-Munguira, 2011) y aunque no se puede afirmar una extinción de las especies, se puede realizar una asociación entre este y la gran reducción en la distribución de las poblaciones (Van Swaay et al., 2010; Ashton et al., 2009), de este modo, las especies pueden generar respuestas a las anomalías climáticas: desplazamiento, adaptación (evolutiva o fisiológica) o extinción local (Holt, 1990; Peterson et al. 2001; Gray 2005; Cuesta-Camacho, 2008), todos estos cambios podrían alterar la sustentabilidad de una región gracias a la modificación en la composición de especies presentes en el ecosistema (Ciesla, 1995; Gray, 2005; Walther et al., 2005; Parmesan, 2006; Gutiérrez y Trejo, 2013).

Por otro lado, cabe resaltar que cuando se habla de probabilidad de distribución siempre se hace en términos de aproximación, pues no se pueden controlar todos los parámetros que la determinan, y como toda buena aproximación se debe partir de un muestreo sistemático y balanceado, si es

posible con ausencias fiables, pues un muestreo sesgado y una mala calidad de los datos de ausencia, alejan de una probabilidad de presencia fiable, así aquellas predicciones que no analizan registros con ausencias reales, no informan *sensu stricto* sobre la probabilidad de presencia (Gutiérrez-Hernández, 2018).

7. CONCLUSIONES

Las especies estudiadas demostraron mayor representatividad en áreas abiertas donde fueron muy abundantes, esto demuestra que las especies han logrado adaptarse a los cambios en las coberturas vegetales, lo que resulta importante a la hora de conocer patrones de diversidad en paisajes antropizados como estrategia para restaurar ambientes naturales.

Los resultados de esta investigación sirven como aproximación para reconocer el riesgo que los cambios en el clima de la biósfera están ejerciendo sobre algunas especies, incluso en aquellas que se considera son eurioicas, debe tomarse en cuenta que todas las especies existentes están expuestas a las condiciones climáticas y por tanto pueden verse afectadas.

La pérdida de las poblaciones no debe atribuirse solo al cambio climático, sino también a otros factores asociados que tienen efectos a corto plazo, por consiguiente la pérdida o aumento de las poblaciones de especies del género en estudio puede ser mayor que la proyectada en este trabajo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceves- Rangel, L. (2017). Distribución potencial actual de veinte especies de pinos en México. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México D.F.
- Ackery, P., De Jong, R. y Vane-Wright, R. (1999). The butterflies: Hedyloidea, Hesperoidea and Papilionoidea, En: Kristensen, N. (Ed), *Handbook of Zoology*, 4, 263-300.
- Albornoz, M. (2016). Distribución actual y potencial de los anfibios amenazados de la Cordillera Oriental Colombiana en un escenario de cambio climático: implicaciones en la conservación (tesis de pregrado). Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111.
- Altermatt, F. (2010). Tell me what you eat and I'll tell you when you fly: diet can predict phenological changes in response to climate change. *Ecology letters*, 13(12), 1475-1484.
- Álvarez, H., Ibarra, A., Escalante, P. (2016). Riqueza y distribución altitudinal de las mariposas de la sierra Mazateca, Oaxaca (Lepidoptera: Papilionoidea). *Acta Zoológica Mexicana*, 32(3), 323-347.
- Álvarez, S. (2013). Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) en estados serales de un Bosque Seco en la Garita, Norte de Santander, Colombia (Tesis de pregrado). Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

- Álvarez-Caballero, R. (2018). Nicho ecológico y variables que intervienen en el desempeño de *Swietenia* en México. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos.
- Anderson, R., Lew, D., Peterson, A. (2003). Evaluating predictive model of species distributions. Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162(3), 211-232.
- Andrade, G. (1990). Clave para las familias y subfamilias de Lepidoptera: Rhopalocera de Colombia. *Caldesia*, 16(77), 197-200.
- Andrade, M., Henao, E., Triviño, P. (2013). Técnicas y procesamiento para la recolección, preservación y montaje en estudios de biodiversidad y conservación (Lepidoptera: Hesperioidea: Papilionoidea). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), 311-325.
- Araújo M., Thuiller W., Pearson R. (2006). Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *J Biogeogr.*, 33(10),1712-1728.
- Araujo, M.B., Peterson, A.T. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93(7): 1527-1539.
- Ashton S., Gutierrez, D., Wilson, R. (2009). Effects of temperature and elevation on hábitat use by a rare mountain butterfly: implications for species responses to climate change. *Ecological entomology*, 34, 437-446.
- Austin, M. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157, 101–118.
- Azor, L., Barro, A. (2014). Modelación de la distribución potencial de mariposas endémicas cubanas (Lepidoptera: Papilionoidea). *Revista Cubana de ciencias biológicas*, 3(3), 18-30.
- Barbet-Massin M, Jiguet F, Helene C, Thuiller W (2012) Selecting pseudo-absences for

- species distribution models: how, where and how many 3. United Kingdom: Methods Ecol. Evol.
- Bell G, Collins S. (2008). Adaptation, extinction and global change. *Evol Appl.*,1(1),3-16
- Beutelspacher, B. (2013). *Las mariposas nocturnas del Valle de México*. Instituto de Biología, UNAM. S y G editores. Mexico D.F., 284 p.
- Bivand R. Lewin-Koh N. (2015). maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects. R package version 08.37.
- Blau, G. (2012). Analysis of a Random Forests Model. *Journal of Machine Learning research*, 13, 1063-1095.
- Bollino, M., y Costa, M. (2007). An illustrated annotated check-list of the species of *Catasticta* (s.l.) Butler (Lepidoptera: Pieridae) of Venezuela. *Zootaxa*, 1469, 1-42.
- Boom-Urueta, C., Seña-Ramos, L., Vargas-Zapata, M., Martínez-Hernández, N. (2013). Mariposas Hesperioidea y Papilionoidea (Insecta: Lepidoptera) en un fragmento de Bosque seco Tropical, Atlántico, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos*, 17(1), 149-167.
- Botello, F., Sánchez-Cordero, V., Ortega-Huerta, M. (2015). Disponibilidad de hábitats adecuados para especies de mamíferos a escalas regional (estado de Guerrero) y nacional (México). *Revista Mexicana de biodiversidad*, 86(1), 226-237.
- Braby, M., Trueman, J. (2006). Evolution of larval host plant associations and adaptive radiation in pierid butterflies. *Journal of Evolutionary Biology*. 19, 1677-1690.
- Bravo-Velásquez, C. (2018). Aspectos ecológicos y biológicos de la mariposa endémica *Mathania* nov, sp. (Lepidoptera: Pieridae) en los alrededores de Arequipa, 2014-2017. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5–32.

- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G. O., Midgley, G. F., Alkemade, J. R. M., Guisan, A. (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12(6), 1079-1093.
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G. O., Midgley, G. F., Alkemade, J. R. M., y Guisan, A. (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12(6), 1079-1093
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle-Rivera, O., Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic change*, 129(1-2), 89-101.
- Cadauid-Valencia, S. (2015). Metodología para estimar caudales medios extremos en escenarios de cambio climático. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Calvo-Obando, A. (2017). Biomasa, carbono y CO₂ equivalente acumulado en una cronosecuencia de bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica y el Parque Estadual de Mata Seca, Brasil. (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Camero, E., Calderón, A. Comunidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Rhopalocera) en un gradient altitudinal del cañón del río Combeima-Tolima, Colombia. (2007). *Acta biol. Colomb.* 12(2), 95-110.
- Carrero, D., Sánchez, L., Tobar, D. (2013). Diversidad y distribución de mariposas diurnas en un gradiente altitudinal en la Región Nororiental Andina de Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas*, 17(1), 168–188.
- Casas.Pinilla, L., Mahecha, O., Dumar, J., Ríos-Malaver, I. (2017). Diversidad de mariposas en un paisaje de bosque seco tropical, en la Mesa de los Santos, Santander, Colombia

- (Lepidoptera:Papilionoidea). *SHILAP Revta. lepid.*, 45(177), 83-108.
- Castro, R., Castillo, M., Monterroso, A., Gómez, J., Flores, E., Rebollar, A. (2017). Potential distribution of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in relation to Alternate Hosts in Mexico. *BioOne*, 100, 787-794.
- Castro-Llanos, F., hyman, G., Rubiano, J., Ramirez-Villegas, J., Achicanoy, H. (2019). Climate change favors rice production at higher elevations in Colombia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-30.
- Cayuela, L. (2010). Modelos lineales generalizados (GLM). Universidad de Granada, Granada. Recuperado de: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33538949/3-Modelos_lineales_generalizados.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1552624208&Signature=bNrMDuTaaK82g5EAVpTrVXMrpRg%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DModelos_lineales_generalizados_GLM.pdf
- Chao, A., y Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547.
- Checa M. F., Rodríguez, J., Willmott, K., Liger, B. (2014). Microclimate variability significantly affects the composition, abundance and phenology of butterfly communities in a highly threatened neotropical dry forest. *Florida Entomologist*, 97(1): 1-13.
- Ciesla, W. (1995). Cambio climático, bosques y ordenamiento forestal, una visión de conjunto. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 146.
- Clench, H. (1996). Behavioural thermoregulation in Butterflies. *Ecology*, 47, 1024-1034.
- Cobertura y uso actual de la tierra (s.f.). Esquema de Ordenamiento territorial. Municipio de Miranda, Cauca. Recuperado de:

<http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/miranda/08%20COBERTURA%20Y%20USO.pdf>

Colombiamania (s.f.). Departamento de Santander. Recuperado de:
<http://www.colombiamania.com/departamentos/santander.html>

Cordoba-Alfaro, Jim, & Murillo-Hiller, Luis Ricardo. (2011). Presencia y distribución de dos subespecies de *Eurema agave* (Lepidoptera, Pieridae) en Costa Rica. *Revista Peruana de Biología*, 18(1), 133-134.

Cuesta-Camacho, F., Peralvo, M., Ganzenmüller, A. (2008). Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales. *Ecociencia*. Recuperado de: <http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas/58.pdf>

De Jong, R., Vane-Wright, R. & Ackery, P. (1996). The higher classification of butterflies (Lepidoptera): Problems and prospects. *Entomologica Scandinavica*, 27, 65-101.

De Vries, P. (1987). The Butterflies of Costa Rica and their natural history: Papilionidae, Pieridae and Nymphalidae. New Jersey. Princeton Univ. Press. 327 pp.

Drewniak, M., Zapata, A., Beccacece, H., Ficetti, F. (2016). Mariposas diurnas de la Reserva Natural Urbana General San Martín, Córdoba, Argentina (Lepidoptera: Papilionoidea). *SHILAP Revista. Lepid.*, 44(174), 287-298.

Elith, J., Graham, C., Anderson R., Dudik, M., ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L., Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J., Peterson, A., Philips, S., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R., Soberón, J., William, S., Wisz, M., Zimmerman, N.

- (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129-151.
- Elith, J., Phillips, S., Trevor, H., Dudik, M., Chee Y., Yates, C. (2011). A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions* 17, 43-57.
- Elton, C. (1927). *Animal Ecology*. London: Sedgwick and Jackson.
- Ferrer- Paris, J. (2008). Patrones de distribución y abundancia en mariposas Piérides (Lepidoptera: Pieridae) a diferentes escalas geográficas. (Tesis de doctorado). Instituto Venezolano de Investigaciones científicas, Altos de Pipe, Venezuela.
- Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Fielding, A., Bell, J. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38-49.
- Foden, W., Midgley, G. F., Hughes, G., Bond, W. J., Thuiller, W., Hoffman, M. T., Kaleme, P., Underhill, L. G., Rebelo, A. & Hannah. L. (2007). A changing climate is eroding the geographical range of the Namib Desert tree Aloe through population declines and dispersal lags. *Diversity and Distributions*, 13(5), 645-653.
- Forister, M.L. & Shapiro, A.M. (2003). Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. *Glob. Change Biol.*, 9, 1130-1135.
- Fourcade, Y., Engler, J., Rödder, D., Secondi, J. (2014). Mapping Species distributions with MAXENT Using a geographically biased sample of presence data: A Performance assessment of methods for correcting sampling Bias. *PlosOne*, 9(5). Recuperado de: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0097122>.

- Fox, J. (2005). The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software*, 14(9): 1-42.
- García-Díaz, J. (2018). Posible impacto del cambio climático en la interacción planta-mariposa: Estudio de caso entre *Bravonia brevicornis* y *Acacia cochliacantha*. (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México D.F.
- Gaviria, F. (2015). Distribución potencial de especies del género *Sodalia* (Lepidoptera:Hesperioidea:Hesperiniinae). (Tesis de Maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Gaviria-Ortíz, F., & Henao-Bañol, E. (2015). Diversidad de mariposas diurnas (Hesperioidea-Papilionoidea) en tres estados sucesionales en un bosque húmedo premontano bajo, Tuluá, Valle del Cauca. *Revista Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 3(2), 49-80.
- Gaviria-Ortiz, F., Henao-Bañol, E. (2011). Diversidad de Mariposas Diurnas (Hesperoidea-Papilionoidea) del Parque Natural Regional el Vinculo, Buga, Valle del Cauca. *Boletín Científico, Centro de Museos Historia Natural* Vol 15(1), 115-133.
- Gobernación de Norte de Santander (s.f). Información general Norte de Santander. Recuperado de: <http://www.nortedesantander.gov.co/Gobernaci%C3%B3n/Nuestro-Departamento/Informaci%C3%B3n-General-Norte-de-Santander>
- Gómez, J. (2015). Ecología de la distribución de mamíferos acuáticos: uso de modelos asociativos y rol de la conducta y la eco-fisiología en la estimación de aptitudes de hábitat y de rangos bio-geográficos presentes y futuros, en cetáceos, pinnípedos y mustélidos (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Lujan. Luján, Argentina.

- Gómez-Lemos, L. (2011). Patrones de cambio en la talla de la megafauna bentónica de fondos blandos tropicales: Correlativos biológicos y ambientales. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- González-Irusta, J., Almón, B., Sarralde, R., González-Porto, M., Arrese, B., Martín-Sosa, P. (2014). Comparing species distribution models: a case study of four Deep sea urchin species. *Hydrobiologia*.
- Gray, P. (2005). Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples. *The Forestry Chronicle*, 81, 655-661.
- Grinnell, J. (1917). The Niche-Relationships of the California Thrasher. *Auk*, 34, 427-433.
- Guevara-Aguirre, D., Gallo-Reynoso, J. (2016). Uso de habitat de dos ecotipos de toninas (*Tursiops truncatus*) en el golfo de California, México. *Revista Mexicana de biodiversidad*, 87, 1045-1054.
- Guisan A, Thuiller W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8, 993–1009.
- Guisan, A., Edwards, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions : setting the scene. *Ecological Modelling*, 157, 89–100.
- Guitérrez, E., Trejo I. (2013). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 179-188.
- Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 88–126

- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504-549.
- Guzmán-Yera, M. (2018). Modelos de distribución potencial de especies forestales en las Sierras de Jaén. Aplicaciones de alta resolución (Tesis de Maestría). Universidad de Jaén. España.
- Hastie, T. & Tibshirani, R. (1986). Generalized additive Models. *Statistical Science*, 1(3): 297-310.
- Heiberger, R., Holland, B. (2008). RcmdrPlugin.HH: Rcmdr support for the HH package. R package version 1.1-21.
- Henao-B., E., Gary, F. (2017). Un inventario de las mariposas diurnas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) de dos reservas altoandinas de la cordillera oriental de Colombia. *Rev. Fac. Cienc. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín*, 7(1), 71-87.
- Henao-Bañol, E. R., y Vargas, J. I. (2015). Catálogo ilustrado del género *Dalla* Mabille 1904 (Lepidoptera: HesperIIDae: Heteropterinae) en Colombia, con notas taxonómicas y de distribución. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, Universidad de Caldas, 19(2), 290-231.
- Hernández, P., Graham, C., Master, L., Albert, D. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29, 773-785.
- Hijmans R., van Etten J. (2012). Raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12
- Hijmans, R., Elith J. (2017). Species distribution modeling with R. *R Project.org*. Recuperado de: <https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/vignettes/sdm.pdf>

- Hill, L., Andy H., Hemery G., Smart S., Tanadini M., Brown N. (2017). Abundance distributions for tree species in Great Britain: A two-stage approach to modeling abundance using species distribution modeling and random forest. *Ecology and evolution*, 7(4)
- Holdridge, L. (1967). Life zone ecology. San José, Costa Rica. *TropicalScienceCenter*, 206 p.
- Hotl, R. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in ecology & Evolution*, 5, 311-315.
- Hsieh, T., Ma, K., & Chao, A., (2013). iNEXT online: interpolation and extrapolation (version 1.0) [Software]. Recuperado de: <http://chao.stat.nthu.edu.tw/inext>.
- IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. 2007. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.
- Illoldi, P., Linaje, M., Sanchez, V. (2002). Distribución de los mamíferos terrestres en la región del Golfo de California, México. *Anales del Instituto de biología. Serie Zoología*, 73(2). 213-224.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C., 72 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (1999). Paisajes fisiográficos de Orinoquía-Amazonía. *Análisis Geográficos*, 27-28, 361 p.

- IPCC. (2007). Cambio climático y biodiversidad. Resumen para responsables de Políticas. Estados Unidos de América.
- IPCC. (2013). Cambio climático 2013 Bases físicas. Resumen para responsables de políticas. Suiza.
- Jimenez, E. (2009). Entomología, Primera edición. Universidad Nacional Agraria, Managua. Nicaragua. 112 p.
- Jones, M., Dye S., Pinnegar, J., Warren, R., Cheung, W. (2012). Modelling commercial fish distributions: Prediction and assessment using different approaches. *Ecological Modelling*. 225, 133-145.
- Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components, *Ecology*, 88 (10).
- Kauermann, G. y Opsomer, J. (2002). A note of local scoring and weighted local polynomial regression in Generalized additive Models. *University of Glasgow*, 1-18.
- Lamas, G. (2003). *Las Mariposas de Machu Picchu. Guía ilustrada de las mariposas del Santuario Histórico, Machu Picchu*. PROFONANPE, Lima, Perú.
- Lamas, G. (2004). Checklist: Part 4^a, Hesperoidea-Papilionoidea, (Lamas ed.) In: Heppner, J. Atlas of Neotropical Lepidoptera. Gainesville, Association for Tropical Lepidoptera, Scientific Publishers. 439 pp.
- Lamas, G. (2008). La sistemática sobre mariposas (Lepidoptera:Hesperioidea y Papilionoidea) en el mundo: estado actual y perspectivas futuras. En Llorente-Bousquets, J. & Lanteri, A. (Eds). Contribuciones Taxonómicas en órdenes de insectos hiperdiversos. *Las prensas de ciencias*, Facultad de ciencias, UNAM, 57-70.

- Lamas, G., Grados, J. (1997). Sinopsis de los Hedyliidae (Lepidoptera) del Perú. *Revista Peruana de Entomología*, 40, 107-109.
- Le Crom, J., Constantino, L., y Salazar, J., (2004). *Mariposas de Colombia. Tomo II: Pieridae*. Carlec Ltda. Colombia.
- Liaw, A. y Wiener, M. (2002). Classification and regression by random Forest. *R News* 2. (3), 18-22.
- Llorente-Bousquets, J., Trujano-Ortega, M., Luis-Martínez, A., Castro, J., Vargas-Fernández, I. (2006). Patrones de distribución de la familia Pieridae (Lepidoptera). Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Llorente3/publication/286336039_Patrones_de_distribucion_de_la_familia_Pieridae_Lepidoptera_de_Mexico/links/567037c708ae0d8b0cc0dd76.pdf
- Lobo, J. M. Jiménez-Valverde, A. y Hortal, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. *Ecography*, 33, 103-114.
- Lobo, J., Jimenez-Valverde., Real, R. (2008). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*. 17(2). Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>
- Loupe, G., Wehenkel, L., Suter, A., Geurts, P. (2013). Understanding variable importances in forest of randomized trees. Recuperado de: <https://papers.nips.cc/paper/4928-understanding-variable-importances-in-forests-of-randomized-trees.pdf>
- Maciel-Mata, C., Manríquez.Morán, N., Octavio-Aguilar, P., Sanchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta universitaria*, 25(2), 3-19.
- Mahecha, O., Dumar, J. y Pyrcz T.(2011). Efecto de la fragmentación del hábitat sobre las comunidades de Lepidoptera de la tribu Pronophilini a lo largo de un gradiente altitudinal

- en un bosque andino en Bogotá (Colombia) (Lepidoptera: Nymphalidae, Satyrina). *SHILAP Revista de Lepidopterología*, 39 (153): 117-126.
- Marquez-León, P. (2014). Lepidopteros (rhopaloceros) bioindicadores de tres tipos de bosques del distrito de San Juan Bautista, Loreto-Perú, 2013 (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Perú.
- Martínez, A. (2017). Distribución potencial de *Oxysternon conspicillatum* (Weber, 1801) en diferentes escenarios de cambio climático en Colombia (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Martinez-Mendez, N., Aguirre-Planter, E, Eguiarte, L., Jaramillo-Correa, J. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en Mexico: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5-24.
- Martínez-Noble, J., Meléndez-Ramírez, V., Delfín-González, H., Pozo, C. (2015). Mariposas de la selva mediana subcaducifolia de Tzucacab, con nuevos registros para Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), 348-357.
- Mercado Gómez, Y., Mercado Gómez, J., Giraldo - Sánchez, C. E. (2018). Mariposas en un fragmento de bosque seco tropical en Montes de María (Colombia). *Ciencia en desarrollo*, 9(2), 35-45.
- Merow, C., Smith, M. J., Silander, 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.
- Mi, C., Huettmann, F., Guo, Y., Han, X., Wen, L. (2016). Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence.

- Milesi, F., López, C. (2005). El concepto de nicho ecológico en ecología aplicada: del nicho al hecho hay mucho trecho. *Ecología Austral*, 15(2), 131-148.
- Montero, F., Ortiz-Pérez, M. (2013). Ciclo de vida y ecología de *Panyapedaloides drymaea*, Hewitson 1858 (Nymphalidae: Satyrinae Pronophilina) en Cundinamarca (Colombia). *Boletín científico centro de Museos*, 18(2), 284-296.
- Moreno-M, G., Acuña-Vargas, J. (2015). Caracterización de lepidópteros diurnos en dos sectores del santuario de flora y fauna los flamencos (San Lorenzo de Camarones, La Guajira). *Bol.Cient.Mus.Hist.Nat.Univ.Caldas*, 19(1), 221-234.
- Muriel, S., Muñoz, J., Restrepo, A. (2014). Parasitoidismo de especies de mariposas en dos sistemas de producción de café. *Revista colombiana de Entomología*. 40(2), 251-258.
- Murillo-Hiller. L. (2008). Clave dicotómica para la identificación de las familias de mariposas (Rhopalocera) pertenecientes a las superfamilias Papilionoidea y Hesperioidea. *CIPROC*, 3(2), 6-11.
- Narayani, B. (2008). Tool for partial-ROC (biodiversity Institute, Lawrence, KS), ver 1.0.
- Neild, A. F., (2008). *The Butterflies of Venezuela. Part 2: Nymphalidae II (Acraeinae, Libytheinae, Nymphalinae, Ithomiinae, Morphinae)*. Meridian publications, London.
- Nelder, J., & Wedderburn, R. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society*, 135, 370–384.
- Núñez-Bustos, E. (2017). Registros inéditos de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) para Argentina III. Colección Núñez Bustos en el MACN. *Trop.Lepid.Res*, 27(2), 17-85.
- Obregón, R., Arenas-Castro, S., Gil-T, F., Jordano, D., Fernández-Haeger, J. (2014). Biología, ecología y modelo de distribución de las especies *Pseudophilotes* Beuret, 1985 en

- Andalucía (Sur de España) (Lepidoptera: Lycaenidae). *SHILAP Revista de Lepidopterología*, 42 (168), 501-516.
- Obregón, R., Fernández, J., Jordano, D. (2016). Effects of climate change on three species of *Cupido* (Lepidoptera, Lycaenidae) with different biogeographic distribution in Andalusia, southern Spain. *Animal biodiversity and conservation*. 39(1), 115-128.
- Olarte-Quiñonez, C. (2016). Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) y su relación con el clima en paisajes de alta montaña en los Andes nororientales de Colombia (tesis de maestría). Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- Olarte-Quiñonez, C. (2013). Diversidad y Estructura de la Comunidad de Lepidópteros Diurnos (Lepidoptera: Papilionoidea) en un Gradiente Altitudinal del Cerro de Tierra Negra, Norte de Santander, Colombia (Tesis de pregrado). Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.
- Orozco, M. (2015). Cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Las Piedras, departamento del Cauca (Tesis de pregrado). Universidad de Manizales. Manizales, Colombia.
- Ortíz-Yusty, C., Restrepo, A., Páez, V. P. (2014). Distribución potencial del *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climática global. *Acta biol. Colombia*. 19, 3, 471-481.
- Ospina-López, L., García-Pérez, J., Villa-Navarro, F., Reinoso-Flórez, G. (2010). Mariposas Pieridae (Lepidoptera: Papilionoidea) de la cuenca del río Coello (Tolima), Colombia. *Actu Biol*, 32(93), 173-188.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary response to recent climatic change. *Annual Review of ecology and systematics*, 37, 637-669.

- Parra-Curimilma, P. (2018). Identificación de áreas potenciales para reforestación con *Nectandra acutifolia* (PACCHES) mediante la aplicación de un modelo de distribución de especies, como estrategia de conservación para el corredor ecológico del oso andino en el distrito metropolitano de Quito (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ecuador.
- Pearman, P., Guisan, A., Broennimann, O., Randin, C. (2008). Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution*. 23 (3), 149-158.
- Pearson, R. (2007). Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *American Museum of Natural History*. Recuperado de: <http://ncep.amnh.org>.
- Pearson, R., Dawson, T. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Glob Ecology Biogeography*. 12, 5, 361-371.
- Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M., Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of biogeography*, 34, 102-117.
- Peña, L. & Ugarte, A. (2006). Las mariposas de Chile. Santiago de Chile. Editorial universitaria S.A.
- Pérez, E. (2017). Diversidad de mariposas (Lepidoptera:Rhopalocera) en un gradiente de urbanización en la Zona Metropolitana de Pachuca, Hidalgo, México (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Mexico D.F.
- Pérez, J., Sánchez, R., Salcedo, D. (2017). Diversidad de mariposas presentes en la Escuela de Policía Rafael Reyes de Santa Rosa de Viterbo, Boyacá, Colombia (Lepidoptera:Papilionoidea). *SHILAP Revra. Lepid.*, 45(178), 343-352.

- Pérez-García, B. y Liria, J. (2013). Modelos de nicho ecológico fundamental para especies del género *Thraulodes* (Ephemeroptera: Leptophlebiidae: Atalophlebiinae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 600-611.
- Pérez-García, B., Liria, J. (2013). Modelos de nicho ecológico fundamental para especies del género *Thraulodes* (Ephemeroptera. Leptophlebiidae: Atalophlebiinae). *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(2), 600-611.
- Pérez-García, O., Benjamin, T., Tobar, D. (2018). Los agroecosistemas cafetaleros modernos y su relación con la conservación de mariposas en paisajes fragmentados. *Revista de Biología tropical*, 66(1), 394-402.
- Peterson, A. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, 3, 59-72.
- Peterson, A., Papes, M., Soberon, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72.
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Bastos Araujo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Peterson, A.. (2001). Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor*, 103(3), 599-605.
- Peterson, A., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R. W., Navarro-Singüenza, A. G. (2001). Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling*, 144(1), 21-30.
- Phillips, S., Anderson, R., Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic

- distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Phillips, S., Dudik, M., Elith, J., Graham, C., 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: 181-197.
- Phillips, S., Dudik, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31, 161–175.
- Pizano, C., García, H. (2014). El Bosque Seco Tropical en Colombia. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt*. Bogotá D.C., Colombia.
- 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*, 48, 61-79.
- Prasad, A., Inversion, L., Liaw, A. (2006). Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9, 181-199.
- Prieto, C. (2011). The genus *Micandra* Staudinger (Lepidoptera: Lycaenidae: Theclinae) in Colombia, with the description of a new species from the Sierra Nevada de Santa Marta. *Zootaxa*, 3040, 55-68.
- Prieto, C., y Vargas-Zapata, M. (2016). Elfin butterflies of the genus *Rhamma* Johnson (Lepidoptera: Lycaenidae: Theclinae): A review of the Colombian species. *Zootaxa*, 4093(3), 323-342.
- Pulido-Herrera, L., Rudas-LL, A., Betancourt, J., Grant, W., Vichez, S. (2015). Distribución inusual y potencial de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, en zonas tropicales de alta montaña de los Andes colombianos. *Biota colombiana*, 16(2),

75-95.

- Pulliam, H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, 3(4), 349-361.
- Pyrz T., Wojtusiak J. yGarlacz, R. (2009). Diversity and Distribution Patterns of Pronophilina Butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae: Satyrinae) along an Altitudinal Transect in North-Western Ecuador. *Neotropical Entomology*, 38 (6): 716-726.
- Pyrz, T., y Viloría, A. (2007). Erebiine and Pronophilina Butterflies of the Serranía del Tama, Venezuela-Colombia Border (Lepidoptera: Nymphalidae: Satyrinae). *Tropical Lepidoptera*, 15(1-2), 18-52.
- Pyrz, T., Willmott, K., Hall, J., y Viloría, A. (2006). A review of the genus *Manerebia* Staudinger (Lepidoptera: Nymphalidae: Satyrinae) in the northern Andes. *Journal of Research in Lepidoptera*, 39, 37-79.
- Quintero, A. (2014). Seguimiento al plan municipal de gestión de riesgo en escenarios de uso indiscriminado de agroquímicos en la vereda San Miguel, del municipio de Abrego, Norte de Santander. (Tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.
- Quiñonez.Guzmán, J. (2017). Distribución geográfica y evaluación del hábitat de la gallina de montaña (*Dendrortyx leucophrys*) en Guatemala, (Tesis de maestría) Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de: <http://www.R-project.org>
- Randin, C., Dirnbock, T., Dullinger, S., Zimmermann, N., Zappa, M., Guisan, A. (2006). Are niche.-based species distribution models transferable in space? *Journal of biogeography*,

33,1689-1703.

Ready, J., Kaschner, K., South, A., ewastwood, P., Rees, T., Rius, J., Agbayani, E., Kullander, S., Froese, R. (2010). Predicting the distributions of marine organisms at the global scale. *Ecological Modelling*, 221, 467-478.

Regier, J., Zwick, A., Cummings, M., Kawahara, A., Cho, S., Weller, S., Roe, A., Baixeras, J., Brown, J., Parr, C., Davis, D., Epstein, M., Hallwachs, W., Hausmann, A., Janzen, D., Kitching, I., Solis, M., Yen, S., Bazinet, A., Mitter, C. (2009). Toward reconstructing the evolution of advanced moths and butterflies (Lepidoptera: Dytrysia). An initial molecular study. *Evolutionary Biology*, 9, 280.

Riahi, K., Rao, S., Volker, K., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P. (2011). RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climate change*. 109, 33-57.

Ruszczyk, A., Motta, P., Barros, R., Araújo, A. (2004). Ecological correlates of polyphenism and gregarious roosting in the grass yellow butterfly *Eurema elathea* (Pieridae). *Braz. J. Biol.*, 64(1), 151-164.

Ríos-Malaver, C. (2007). Riqueza de especies de mariposas (Hesperioidea & Papilionoidea) de la quebrada “El Águila” cordillera central (Manizales, Colombia). *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas*, 11, 272–291.

Romo, H., Sanabria, P., García-Barros, E. (2013). Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de Lepidoptera. El caso del género *Boloria Moore*, 1900 en la península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). *SHILAP Revista de Lepidopterología*, 41(162), 267-286.

- Romo, H., Silvestre, M. & Munguira, M. (2015). Potential distributions models and the effect of climatic change on the distribution of *Phengaris nausithous* considering its food plant and hosts ants. *Springer International*, 19, 1101-1118.
- Rosas-Montalvo, P. (2016). Modelamiento de nicho ecológico de *Anopheles spp.* en el Ecuador mediante herramientas geo-informáticas. (Tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.
- Roy, D., Sparks, T.H. (2000). Phenology of British butterflies and climate change. *Glob. Change Biol.*, 6, 407–416.
- Royle, J., Chandler, R., Yackulic, C., Nichols, N. (2012). Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *British ecological society*, 3(3). Recuperado en: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-210x.2011.00182.x>
- Saalfeld, K., Araujo, A. (1981). Studies on the genetics and ecology of *Heliconius erato* (Lepidoptera:Nymphalidae) I Demography of a natural population. *Rev. Bras. Biol.*, 41, 855-860.
- Sabattini, J., Zerda, H., Sabattini, R., Savino, C. (2017). Distribución geográfica potencial de *Atta vollenweideri* Forel en la provincia de Entre Ríos, Argentina. *Ambiencia Guarapuava*, 13(1), 31-46.
- Salinas-Gutiérrez, J., Warren, A., Luis-Martínez, A., Hernández-Mejía, C. (2005). Hesperioidea (Lepidoptera:Rhopalocera) del Occidente de México. *Folia Entomológica Mexicana*, 44,30-320. Scoble, M. (1995). The Lepidoptera. Form, Function and Diversity. London, The Natural History Museum & Oxford University Press, 404 p.

- Scott, J. (1985). The phylogeny of butterflies (Papilionoidea and Hesperioidea). *Journal of research on the Lepidoptera*, 23, 241-281.
- Seitz, A., (1924). *Die Gross Schmetterlinge der Erde. Die Amerikanischen. Tagfalter*. A. Kernen, Stuttgart. Germany.
- Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N., Lengauer, T. (2005). ROCr: visualizing classifier performance in r. *Bioinformatics*, 21(20), 3940-3941.
- Smith A, Santos M, Koo M, Rowe K, Rowe K, Patton J, Perrine J, Beissinger S, Moritz C (2013) Evaluation of species distribution model by resampling of sites surveyed a century ago by Joseph Grinnell. *Ecography* 36: 1017–1032
- Soberon, J., Peterson, A. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.
- Sosa-Díaz, L., Méndez-González, J., García-Aranda, M., Cambrón-Sandoval, V., Villarreal-Quintanilla, J., Ruiz-González, C., Montoya-Jiménez, J. (2018). Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), 187-208.
- South A. (2013). rworldmap: A New R package for Mapping Global Data. R package version 1.31.
- Strobl, C., Malley, J., Tutz, G. (2009). Application and characteristics of classification and regression trees. Bagging and random forest. *Psychological Methods* 14 (4), 323-348.
- Suarez, Y. (2014). Mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) colectadas en Venecia (Cundinamarca, Colombia): Catálogo ilustrado. (Tesis de pregrado). Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia.

- Svendsen, G. (2013). Distribución y uso de hábitat de mamíferos marinos en el golfo de San Matías (Tesis Doctoral). Instituto de Biología Marina y Pesquera Almirante Storni. Universidad Nacional de Comahue. Argentina.
- Title P., Bemmels J.(2018). ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*. 41, 291–307.
- Tobar, D., Ibrahim, M. (2006). ¿Las cercas vivas ayudan a la conservación de la diversidad de mariposas en paisajes agropecuarios?. *Biología Tropical*. Vol 58 (1), 447-463.
- Torres, R., Jayat, P. (2010). Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (congulata, artiodactyla y rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozool.neotrop*, 17(2), 335-352.
- Triplehorn, C., Jhonson N. (2005). *Borror and Delong's introduction to the Study of Insects*. Thomson Brooks/Cole, United States of America.
- Uribe-Botero, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. *CEPAL*. Recuperado de: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesis_pp_cc_cc_y_sus_efectos_en_la_biodiversidad.pdf
- Van Swaay, C., Cuttelod, A., Collins, S. Maes D, Munguira ML, Šasic M, Settele J, Verovnik R, Verstrael T, Warren M, et al. eds. (2010) European Red List of Butterflies. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Van Swaay, C., Regan, E., Ling, M., Bozhinovska, E., Fernandez, M., Marini-Filho, O. J., Huertas, B., Phon, C. K., K'orösi, A., Meerman, J., Pe'er, G., Uehara-Prado, M., Sáfián, S., Sam, L., Shuey, J., Taron, D., Terblanche, R., Underhill, L. (2015). Guidelines for Standardised

- 109 Global Butterfly Monitoring. Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network, Leipzig, Germany.
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque J., Masui, T., Meinhauen, M., Nakicenovic, N., Smith, S., Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*.109, 5-31.
- Vargas, P. (2009). El cambio climático y sus efectos en el Perú. *Banco Central de Reserva del Perú*. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39480>
- Vargas-Fernández, J., Llorente-Bousquest, J., Martínez A. (1992). Listado lepidopterofaunístico de la Sierra de Atoyac de Álvarez en el estado de Guerrero: notas acerca de su distribución local y estacional (Rhopalocera: Papilionoidea). *Folia Entomológica Mexicana*, 86, 41-178.
- Vásquez, D. (2005). Reconsiderado el nicho hutchinsoniano. *Ecología austral*, 15, 149-158.
- Vásquez, J., Zárate, R., Huiñapi, P., Pinedo, J., Ramirez, J., Lamas, G., Vela, P. (2017). Plantas alimenticias de 19 especies de mariposas diurnas (Lepidoptera) en Loreto, Perú. *Revista peruana de biología*, 24(1), 35-42.
- Vié, J. C., Hilton-Taylor, C. & Stuart, S. N. (2009). *Wildlife in a Changing World— An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Switzerland: IUCN, Gland.
- Villareal H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina M., Umaña, A. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.

- Wagner, D., Nelson, M., Schweitzer, D. (2003). Shrubland Lepidoptera of southern New England and southeastern New York: ecology, conservation, and management. *Forest Ecology and Management*, 185(1-2), 95-112.
- Warren, A. (2000). Hesperioidea (Lepidoptera). En: Llorente-Bpousquets, J., González, E. & Papavero, N. (Eds). Biodiversidad, Taxonomía y Biogeografía de Artrópodos en México: Hacia una síntesis de su conocimiento, vol. II. *Las prensas de Ciencias*, UNAM, 535-580.
- Warren, A., Davis, K., Stageland, E., Pelham, J., & Grishin N. (2013). Illustrated List of American Butterflies. Recuperado de: <http://www.butterfliesofamerica.com/>
- Warren, A., Ogawa, J. & Browser, A. (2008). Phylogenetic relationships of subfamilies and circumscription of tribes in the family HesperIIDae (Lepidoptera:Hesperioidea). *Cladistics*, 24, 1-35.
- Wather, G., Beibner, S., Burga, A. (2005) Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of vegetation science*, 16,541-548.
- Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., Zemla, J. (2017). Package “corrplot”. Visualization of a correlation Matrix. Recuperado de: <https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/corrplot.pdf>
- Willmott, K., (2003). *The Genus Adelpha: its systematics, biology and biogeography (Lepidoptera: Nymphalidae: Limenitidini)*. Scientific Publishers, Gainesville.
- Zenker, M., De Vries, P., Penz, C., Teston, J., Freitas, A. V. L., y Pie, M. (2015). Diversity and composition of Arctiinae moth assemblages along elevational and spatial dimensions in Brazilian Atlantic Forest. *Journal of Insect Conservation*, 19(1), 129-140.
- Zunino, M. & Zullini, A. (2003). Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución. México: Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

9. ANEXOS

Anexo 1. Algoritmos utilizados con su correspondiente valor AUC y cAUC. Se resaltan en rojo los valores por debajo de 0.7.

| Especies | Escenario | AUC | | | | cAUC | | | |
|-----------------------|-------------|------|------|--------|---------------|------|------|--------|---------------|
| | | GLM | GAM | MaxEnt | Random Forest | GLM | GAM | MaxEnt | Random Forest |
| <i>Eurema elathea</i> | Actual | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.93 | 0.93 | 0.87 | 0.87 |
| | RCP4.5-2050 | 0.96 | 0.96 | 0.98 | 0.96 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | RCP8.5-2050 | 0.93 | 0.93 | 0.96 | 0.93 | 0.81 | 0.81 | 0.93 | 0.93 |
| | RCP4.5-2070 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.97 | 0.87 | 0.87 | 0.93 | 0.87 |
| | RCP8.5-2070 | 0.95 | 0.95 | 0.97 | 0.95 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>Eurema albula</i> | Actual | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 1 | 1 | 1 | 0.88 |
| | RCP4.5-2050 | 0.92 | 0.92 | 0.74 | 0.92 | 0.88 | 0.88 | 0.66 | 0.88 |
| | RCP8.5-2050 | 0.92 | 0.92 | 0.82 | 0.92 | 1 | 1 | 1 | 0.88 |
| | RCP4.5-2070 | 0.79 | 0.79 | 0.87 | 0.79 | 0.66 | 0.66 | 0.88 | 0.88 |
| | RCP8.5-2070 | 0.79 | 0.79 | 0.74 | 0.79 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>Eurema daira</i> | Actual | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | RCP4.5-2050 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | RCP8.5-2050 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | RCP4.5-2070 | 0.89 | 0.89 | 0.97 | 0.89 | 0.77 | 0.77 | 0.88 | 1 |
| | RCP8.5-2070 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 1 |

Anexo 2. Variables de mayor aporte con los cuatro algoritmos utilizados para la especie *Eurema elathea*. Se resalta en rojo una línea en aquellos algoritmos que no tuvieron variables significativas para la especie en estudio.

| Especie | Escenario | GLM | GAM | MaxEnt | RandomForest |
|-----------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|
| <i>Eurema elathea</i> | Actual | climaticMoistureIndex | climaticMoistureIndex | continentality | ClimaticMoistureIndex continentality |
| | RCP4.5-2050 | bio2-bio7-bio19 | bio2-bio7-bio19 | bio19-bio15- bio18-bio4- bio2 | bio15-bio18-bio19 |
| | RCP8.5-2050 | bio19-bio2 | bio19-bio2 | bio4-bio19- bio18-bio2- bio15 | bio18-bio4-bio7-bio19 |
| | RCP4.5-2070 | bio19 | bio19 | bio3-bio19- bio15-bio18- bio14 | bio3-bio4-bio15-bio18 |
| | RCP8.5-2070 | ----- | ----- | bio3-bio13 | bio3-bio13-bio15- bio18 |

Anexo 3. Variables de mayor aporte con los cuatro algoritmos utilizados para la especie *Eurema albula*. Se resalta en rojo una línea en aquellos algoritmos que no tuvieron variables significativas para la especie en estudio.

| Especie | Escenario | GLM | GAM | MaxEnt | RandomForest |
|----------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|---|---|
| <i>Eurema albula</i> | Actual | climaticMoistureIndex | climaticMoistureIndex | climaticMoistureIndex continentality | ClimaticMoistureIndex Petseasonality |
| | RCP4.5-2050 | bio2 | bio2 | bio18-bio15 | bio4-bio18-bio15 |
| | RCP8.5-2050 | bio2 | bio2 | bio4-bio18 | bio18-bio4-bio15 |
| | RCP4.5-2070 | ----- | ----- | bio3-bio18-bio15 | bio3-bio4-bio18 |
| | RCP8.5-2070 | ----- | ----- | bio3-bio13-bio15 | bio3-bio4-bio18 |

Anexo 3. Variables de mayor aporte con los cuatro algoritmos utilizados para la especie *Eurema daira*. Se resalta en rojo una línea en aquellos algoritmos que no tuvieron variables significativas para la especie en estudio.

| Especie | Escenario | GLM | GAM | MaxEnt | RandomForest |
|----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---|--|
| <i>Eurema albula</i> | Actual | climaticMoistureIndex | climaticMoistureIndex | climaticMoistureIndex continentality | ClimaticMoistureIndex Continentalidad |
| | RCP4.5-2050 | bio2 | bio2 | bio19-bio18-bio15-bio2 | bio15-bio18-bio19 |
| | RCP8.5-2050 | ----- | ----- | bio19-bio18.bio4-bio2 | bio18-bio4-bio19 |
| | RCP4.5-2070 | ----- | ----- | bio3-bio18-bio19 | bio3-bio18 |
| | RCP8.5-2070 | ----- | ----- | bio3-bio13-bio19 | bio3-bio13-bio15-bio18 |