



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA GEÓGRAFA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: “IMPLICACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL VECTOR DEL DENGUE EN LA ZONA
DE PLANIFICACIÓN 1 DEL ECUADOR”**

AUTOR: ZAPATA ANDRANGO, ERIKA ALEXANDRA

DIRECTOR: DR. PADILLA ALMEIDA, OSWALDO VINICIO

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN
CERRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación *“IMPLICACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL VECTOR DEL DENGUE EN LA ZONA DE PLANIFICACIÓN 1 DEL ECUADOR”* fue realizado por la señorita *Zapata Andrango, Erika Alexandra* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de Octubre de 2019

A handwritten signature in blue ink is positioned above a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'Oswaldo Padilla Almeida'.

Dr. Oswaldo Vinicio Padilla Almeida

C.C: 170977665-0



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Zapata Andrango, Erika Alexandra*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *"Implicaciones del Cambio Climático en la distribución espacial del vector del Dengue en la zona de planificación del Ecuador"* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 20 de Octubre de 2019

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is cursive and appears to read 'Erika Alexandra A.'.

Erika Alexandra Zapata Andrango

C.C: 1720171246



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CERRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, Zapata Andrango, Erika Alexandra autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Implicaciones del Cambio Climático en la distribución espacial del vector del Dengue en la zona de planificación 1 del Ecuador" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 20 de Octubre de 2019

Erika Alexandra Zapata Andrango

C.C: 1720171246

DEDICATORIA

Este documento refleja la culminación de una de las etapas más enriquecedoras de mi vida, tanto en mi formación académica como la personal; por ello dedico este logro a toda mi familia quienes de la mano de Dios siempre me han bendecido, a mis padres Humberto y Ligia porque han priorizado las necesidades de sus hijos y han depositado en mí su confianza, haciéndome sentir segura de que todo lo que me proponga lo podré obtener, espero siempre hacerlos sentir orgullosos de los logros que he alcanzado y alcanzaré ya que son el pilar fundamental en mi vida y todo lo que haga será para ustedes.

A mis hermanos Mauricio y Paúl porque han sido y serán mis compañeros de vida, los llevo siempre conmigo y espero jamás defraudarlos.

Erika Zapata A.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a cada uno de los profesionales que han sido parte de mi experiencia académica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; por impartir su conocimiento, experiencias y valores éticos para la formación de excelentes profesionales.

A mi tutor de tesis, Dr. Oswaldo Padilla por la guía y la ayuda que me ha brindado para el desarrollo y culminación de este proyecto de titulación.

La estadía en esta universidad sin duda me ha dejado grandes tesoros y uno de ellos es la amistad y cariño de varios compañeros que se han convertido en verdaderos amigos, agradezco las vivencias a su lado. A mi mejor amiga Grace, a Ale y Dani por estar siempre presentes, por su cariño sincero y porque los momentos juntas han dejado hermosos recuerdos en mi mente y me los llevo en el corazón, gracias por su apoyo y por hacer que esta etapa sea de las mejores.

A Diego, por ser mi amigo y compañero de experiencias a lo largo de estos años, gracias por las palabras de aliento, consejos y el apoyo que ha sido incondicional en esta parte de mi vida.

Erika Zapata A.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del Problema.....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Metas	5
1.6. Descripción de la Zona de Estudio	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1.7. Hábitat y Nicho Ecológico.....	8
1.7.1. Nicho Ecológico	9
1.7.2. Tipos de Nicho Ecológico	9

1.8. Modelamientos de Nicho Ecológico y Distribución de Especies	11
1.8.1. Modelos de nicho ecológico (ENM por sus siglas en inglés).....	11
1.8.2. Modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en inglés).....	11
1.9. Procesos para el modelamiento de distribución de especies	13
1.9.1. Variables Independientes (indicadores medioambientales).....	14
1.9.2. Variables Dependientes (Variables de respuesta).....	15
1.10. Métodos para el Modelamiento de Nicho Ecológico	16
1.10.1. Máxima Entropía (MAXENT)	17
1.11. Validación de los modelos de nicho ecológico.....	21
1.11.1. Matriz de Confusión	22
1.11.2. Receiver Operating Characteristic (ROC)	24
3.1.1. Análisis de la tasa de omisión.....	25
1.12. Cambio Climático	26
1.12.1. Escenarios de Cambio Climático.....	27
1.12.2. Trayectorias de concentración representativas (RCP).....	29
1.13. Impacto del Cambio Climático en la biodiversidad	32
1.14. Aplicación de los SIG en los MDE bajo escenarios de cambio climático.....	35
1.15. Ecología del Vector <i>Aedes aegypti</i>	36
1.16. Dengue.....	37

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

1.17. Esquema Metodológico	40
1.18. Recopilación de la Información.....	41
1.18.1. Variables Dependientes	41
1.18.2. Variables Independientes.....	42
1.18.3. Datos de Prueba	50
1.19. Normalización de las variables	52
1.20. Aplicación del Modelo de Distribución.....	53

1.20.1. Tratamiento de las variables de entrada.....	54
1.20.2. Modelamiento de la distribución espacial actual y futura	54
1.21. Evaluación de los modelos de distribución	56
1.21.1. Análisis curva ROC	57
1.21.2. Análisis de la tasa de omisión.....	57
1.22. Selección de los modelos.....	58
1.23. Comparación de los modelos de distribución.....	58

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Bases de Datos y selección de variables.....	60
4.2. Evaluación del Modelo de Distribución Actual.....	61
4.3. Evaluación y Selección de los Modelos de distribución futura.....	64
4.4. Comparación de los escenarios de distribución potencial futura con la actual	72

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.5. Conclusiones.....	76
4.6. Recomendaciones	78

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	79
---------------------------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Ubicación de la Zona de Planificación 1 (Norte) del Ecuador.	7
<i>Figura 2.</i> Ilustración esquemática tipos de nicho	10
<i>Figura 3.</i> Factores que determinan la presencia de una especie	12
<i>Figura 4.</i> Esquema de flujo de trabajo.....	14
<i>Figura 5.</i> Esquema de modelamiento de Máxima Entropía (MAXENT).....	18
<i>Figura 6.</i> Matriz de confusión de presencia/ausencia.....	23
<i>Figura 7.</i> Diagrama de tipos de desempeño de un modelo predictivo.....	23
<i>Figura 8.</i> Distribuciones de frecuencia ilustrativas en una Curva de (ROC).....	25
<i>Figura 9.</i> Cambios observados en Concentraciones de gases de efecto invernadero	26
<i>Figura 10.</i> Procesos de Generación de los escenarios de Cambio Climático.....	29
<i>Figura 11.</i> Cambio en la temperatura Media Global en superficie considerando los 4 RCP...31	31
<i>Figura 12.</i> Concentración de CO ₂ considerados en cada uno de los escenarios RCP.....	31
<i>Figura 13.</i> Ilustraciones de proyecciones de cambio de temperatura y precipitación media. .32	32
<i>Figura 14.</i> Impactos del cambio climático sobre las especies	33
<i>Figura 15.</i> Direcciones de las respuestas de la biodiversidad al cambio climático	34
<i>Figura 16.</i> Especie Aedes aegypti	36
<i>Figura 17.</i> Clasificación de casos de dengue sugerida y niveles de gravedad	37
<i>Figura 18.</i> Tasa de incidencia de casos reportados de dengue por año y subregión	38
<i>Figura 19.</i> Diagrama de flujo de la metodología del proyecto de investigación.....	40
<i>Figura 20.</i> Presencia del Vector Aedes aegypti en la zona de planificación 1 del Ecuador.....	42
<i>Figura 21.</i> Variables bioclimáticas para el modelamiento del vector Aedes aegypti.....	45
<i>Figura 22.</i> Variable de densidad poblacional al año 2000 (resolución de 30 s).....	46

Figura 23. Variables de la densidad poblacional proyectada al año 2050 (resolución 30s).....	48
Figura 24. Variable Inundaciones para el modelamiento del vector <i>Aedes aegypti</i>	49
Figura 25. Variable Altitud para el modelamiento del Vector <i>Aedes aegypti</i>	50
Figura 26. Datos de prueba para el modelamiento del vector <i>Aedes aegypti</i>	51
Figura 27. Normalización de las variables	52
Figura 28. Interfaz del Software gratuito MaxEnt versión 3.4.1.....	53
Figura 29. Datos de presencia del vector <i>Aedes aegypti</i> (formato csv)	54
Figura 30. Configuración MaxEnt.....	56
Figura 31. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic analysis).....	57
Figura 32. Tasa de omisión en función del umbral acumulativo.	58
Figura 33. Comparación del escenario actual con escenarios futuros.....	59
Figura 34. Análisis de omisión/comisión para la modelación de la distribución actual.	61
Figura 35. Curva Operacional (ROC) para la distribución espacial actual del vector.	62
Figura 36. Distribución espacial actual del Vector <i>Aedes aegypti</i>	64
Figura 37. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 2.6	65
Figura 38. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 4.5	66
Figura 39. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 6.0	68
Figura 40. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 8.5	69
Figura 41. Distribución potencial futura del vector <i>Aedes aegypti</i> RCP 2.6	70
Figura 42. Distribución potencial futura del vector <i>Aedes aegypti</i> RCP 4.5	71
Figura 43. Distribución potencial futura del vector <i>Aedes aegypti</i> RCP 6.0.....	71
Figura 44. Distribución potencial futura del vector <i>Aedes aegypti</i> RCP 8.5.....	72
Figura 45. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 2.6	73

Figura 46. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 4.5	74
Figura 47. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 6.0	74
Figura 48. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 8.5	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipo científico desarrollador de los RCP.	30
Tabla 2. Síntesis de los panoramas de forzamiento radiativo utilizado en los escenarios.....	30
Tabla 3. Variables bioclimáticas.....	43
Tabla 4. Modelos utilizados para el MDE futura del vector.....	44
Tabla 5 Variables utilizadas para el modelamiento de la distribución actual y futura	55
Tabla 6. Pruebas binomiales para la MDE actual de vector <i>Aedes aegypti</i>	62
Tabla 7 Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 2.6.....	66
Tabla 8 Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 4.5.....	67
Tabla 9. Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 6.0.....	67
Tabla 10 Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 8.5.....	68
Tabla 11 Modelos seleccionados para la MDE futura del vector <i>Aedes aegypti</i>	69
Tabla 12. Comparación de la probabilidad de presencia actual con la futura	72

RESUMEN

Los controles epidemiológicos relacionados con la presencia del vector *Aedes aegypti* en las diferentes regiones del Ecuador son de gran interés en los sistemas de salud ya que es el principal vector de enfermedades arbovirales como el Dengue, además plantea un mayor desafío al ser una especie invasiva y con una potencial forma de adaptación a nuevas condiciones ambientales relacionadas con la actividad humana y los entornos urbanos. El objetivo de este estudio fue determinar la distribución potencial del vector en la zona norte del Ecuador continental considerando escenarios de Cambio Climático proyectado al año 2050 y analizar los posibles cambios en la distribución actual de la especie. Para la generación de los modelos de distribución se empleó una base de datos para la presencia del vector basada en los registros de los índices aélicos recopilados por el Ministerio de Salud Pública y un conjunto de variables bioclimáticas, geográficas, demográficas actuales y proyecciones basadas en los modelos de circulación general (GCM): GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR, para cuatro vías de concentración representativas (RCP): 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Los resultados de las pruebas de omisión, de la curva de ROC y AUC indicaron que los modelos generados son adecuados y presentan un buen rendimiento predictivo mostrando un evidente aumento de la probabilidad de presencia del vector en elevaciones más altas a lo largo de las estribaciones orientales y occidentales de la Cordillera de los Andes, por lo que estas zonas pueden ser una potencial preocupación dentro de la salud pública.

PALABRAS CLAVE:

- **MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL**
- **AEDES AEGYPTI**
- **CAMBIO CLIMÁTICO**

ABSTRACT

Epidemiological controls related to the presence of the *Aedes aegypti* vector in the different regions of Ecuador are of great interest in health systems since it is the main vector of arboviral diseases such as Dengue, it also poses a greater challenge to be an invasive species and with a potential form of adaptation to new environmental conditions related to human activity and urban environments. The objective of this study was to determine the potential distribution of the vector in the northern part of continental Ecuador considering Climate Change scenarios projected to the year 2050 and analyze the possible changes in the current distribution of the species. For the generation of the distribution models, a database was used for the presence of the vector based on the records of the aedic indexes compiled by the Ministry of Public Health and a set of current bioclimatic, geographic, demographic and project variables based on general circulation models (GCM): GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR, for four representative concentration pathways (RCP): 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5. The results of the omission tests, of the ROC curve and AUC indicated that the models generated are adequate and have a good predictive yield showing an evident increase in the probability of presence of the vector at higher elevations along the eastern foothills and western Andes Mountains, so these areas can be a potential concern in public health.

KEYWORDS:

- **SPACE DISTRIBUTION MODEL**
- **AEDES AEGYPTI**
- **CLIMATE CHANGE**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

Las primeras referencias de los síntomas similares de dengue en América se registraron en 1635 en Martinicia y Guadalupe y en 1699 en Panamá, una descripción más clara fue en Filadelfia en 1780 en Estados Unidos (Brathwaite, San Martín, Montoya, & del Diego, 2012). El registro más antiguo encontrado en bibliografías acerca del Dengue es en China, publicado por primera vez en la dinastía Chin (265-420 D.C), la enfermedad fue llamada como “veneno de acuáticos” y se relacionaba a insectos voladores asociados al agua; en el año de 1699 en las Indias Occidentales Francesas también podrían haber sido dengue (Gubler, 1998).

El mosquito *Aedes aegypti* es el principal vector del virus que causa el dengue y en las últimas décadas la incidencia a nivel mundial ha aumentado, aunque la mayoría de los casos son asintomáticos y por ello el número real de los casos no han sido notificados o están mal clasificados, se estima que 50 millones de infecciones ocurren cada año en más de 100 países en la región de Asia- Pacífico, América, Medio Oriente y África; en las regiones tropicales y subtropicales la tasa de incidencia es mayor en las últimas décadas (Brathwaite, San Martín, Montoya, & del Diego, 2012).

En la Región de las Américas, la Organización Panamericana de la Salud reporta los mayores casos del dengue, en el caso de Ecuador el dengue es una de las enfermedades transmitidas por vectores que representan un problema prioritario dentro la vigilancia de salud pública desde los registros de ciclos epidémicos en las zonas tropicales y subtropicales del país en 1988 (MSP, 2018).

El dengue es una de las enfermedades sensibles al clima ya que al igual que varios mosquitos, la presencia del vector *aedes aegypti* se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones ambientales y por consecuencia a los cambios que se dan generalmente por la temperatura regional y la tendencia en las precipitaciones (Stewart-Ibarra & Lowe, 2013).

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático ha establecido vías de representativas de concentración para las futuras emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales son bases para el modelamiento de futuros escenarios climáticos y por ende la base en potenciales modelos de futuros rangos geográficos de los mosquitos vectores (Lippi et al., 2018). Numerosos estudios recientes han evidenciado que considerar los factores climáticos y las proyecciones a futuro de los mismos permitirá que dentro del sector de salud público realice un control de vectores más efectivo (Stewart-Ibarra & Lowe, 2013).

En el Ecuador, el control del dengue es supervisado por el Servicio Nacional para el Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores del Ministerio de Salud, uno de los servicios de control es a través de vigilancia de mosquitos a nivel de hogares, de los cuales obtienen diferentes índices considerados claves dentro del ámbito de salud para entender el potencial de transmisión y las acciones a tomar para la reducción de diferentes fuentes de larvas (MSP, 2018).

Comprender la distribución espacio-temporal de los vectores ha sido factibles utilizando diferentes herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y algoritmos predictivos. Los modelos de nichos ecológicos han sido técnicas adecuadas para determinar la distribución potencial de diferentes especies, entre ellas los mosquitos, así como las expansiones resultantes asociadas a los cambios ambientales y climáticos utilizados para analizar de manera más objetiva

los hábitats favorables para la presencia de una especie potencialmente invasora o vectores causantes de enfermedades epidemiológicas (Campbell et al., 2015).

Con el fin de contribuir en el conocimiento en la distribución del vector y sus posibles aumentos en el rango de distribución en el Ecuador, se han realizado estudios previos de modelación de nichos ecológicos en combinación con los SIG tomando en cuenta escenarios de cambio climático y diferentes técnicas. Por ejemplo el trabajo realizado por Lippi y otros autores (2018), titulado “*Geographic shifts in Aedes aegypti habitat suitability in Ecuador using larval surveillance data and ecological niche modeling: Implications of climate change for public health vector control*”, el estudio realizado en Machala: “*Climate services for health: predicting the evolution of the 2016 dengue season in Machala, Ecuador*” (Lowe et al., 2017), entre otros.

1.2. Definición del Problema

La presencia del vector del dengue está relacionado a distintas variables socioeconómicas, climáticas, ecológicas y geográficas; ya que intervienen con la densidad de los mosquitos vectores y su distribución geográfica. El vector del dengue *Aedes aegypti* tiene una potencial forma de adaptación a nuevas condiciones ambientales que están estrechamente relacionadas con la temperatura, humedad y las actividades humanas y su desarrollo. Por lo tanto, en la evaluación de las distribuciones de vectores se debe considerar las condiciones actuales y futuras para estimar posibles rangos de expansión de riesgo relacionados con el cambio climático y las alteraciones que provoca dentro del medio geográfico del vector y poder determinar parámetros de control y prevención en posibles riesgos epidemiológicos.

La falta de seguimientos y estudios de vectores de transmisión como el dengue, puede traer consigo una exposición alta de riesgo en término de salud pública. Al no considerar las

implicaciones que el cambio climático tiene en la alteración de sus nichos ecológicos, podría causar que el rango que de expansión de este tipo de vectores incremente y colonice nuevos nichos que históricamente no han sido su entorno, lo que provocaría riesgos epidemiológicos de dengue en nuevas zonas del Ecuador.

Por lo tanto, se plantea realizar modelamientos de la distribución espacial del vector del dengue bajo diferentes escenarios de cambio climático para determinar los posibles rangos de expansión de la especie a futuro y de esta manera obtener una base dentro de la planificación y gestión de posibles brotes de las enfermedades transmitidas por el mosquito.

1.3. Justificación

La vigilancia epidemiológica es un proceso primordial para la prevención y control de los eventos y enfermedades de interés en la salud pública, en el Ecuador el dengue es una de las enfermedades de transmisión vectorial prioritarias dentro del contexto de prevención en el control de epidemias por el número de casos registrados anualmente. El impacto de esta enfermedad depende de la densidad poblacional de los mosquitos *aedes aegypti* y de su distribución la cual está estrechamente relacionada con fenómenos climáticos que cambian primordialmente la temperatura y humedad (MSP, 2018).

Considerando que el vector del dengue tiene una facilidad de adaptación para nuevos nichos ecológicos es necesario que las evaluaciones de su entorno sean a nivel multidisciplinario para de esta manera entender la dinámica de su distribución tomando en cuenta diferentes factores bióticos y abióticos. Entre las variables que intervienen en el análisis se encuentran las socioeconómicas, climáticas, ecológicas y geográficas (Lippi et. al., 2018).

Además, este tipo de estudios se alinean a los objetivos de adaptación propuestos en la Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador (2012-2025), en el cual se menciona la implementación de medidas de prevención para proteger la salud humana frente a los impactos del cambio climático (MAE, 2012); en este contexto el modelar nichos ecológicos incluyendo variables de cambios ambientales y climáticos proveen bases para efectuar estrategias y poder reducir la vulnerabilidad de la población mediante la prevención.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la distribución espacial de la especie *aedes aegypti* vector del dengue en la Zona 1 del Ecuador, simulando diferentes condiciones de cambio climático para generar referencias dentro de la prevención y control en posibles escenarios epidemiológicos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y estructurar la información de las variables dependientes e independientes que intervengan dentro del modelamiento de la distribución espacial.
- Espacializar y evaluar las variables dependientes e independientes para obtener los valores de los modelos en cada punto de muestreo.
- Generar y evaluar modelos de nicho ecológico actual del vector *Aedes aegypti* y de posibles rangos de distribución espacial utilizando escenarios de cambio climático.
- Comparar los modelos de distribución y analizar los cambios en los diferentes escenarios.

1.5. Metas

- Una base geodatabase con información de cada una de las variables dependientes e independientes para el análisis de los modelos predictivos.

- Análisis de los modelos de distribución de los casos epidemiológicos en escenarios actuales y probables de cambio climático.
- Tres mapas temáticos de las zonas con mayor riesgo epidemiológico a escala 1:250 000.
- Informe sobre los posibles cambios en los patrones de distribución del vector del dengue bajo escenarios de cambio climático.

1.6. Descripción de la Zona de Estudio

La Zona de Planificación 1 (Norte), cuya sede administrativa se encuentra ubicada en la ciudad de Ibarra, corresponde a la frontera norte del país, coincidiendo por tanto con la denominada Zona de Integración Fronteriza Ecuador-Colombia (ZIFEC). Está conformada por las provincias de Esmeraldas, Carchi, Imbabura y Sucumbíos, con un total de 26 cantones y 146 parroquias rurales (Ver Figura 1), distribuidos en un área de 42.391,45 Km², lo que significa el 16,6% del territorio ecuatoriano. Al ser zona fronteriza, su dinámica territorial se basa en un fuerte intercambio comercial y social, marcado por fuertes movimientos migratorios que ingresan al país, especialmente de nacionalidad colombiana y venezolana (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2019).

Su ubicación geográfica y clima hacen posible la existencia de 32 ecosistemas con alta biodiversidad y cuenta con 13 áreas protegidas que pertenecen al Sistema Nacional Áreas Protegidas, representando el 40.44% del total del territorio zonal. La Zona tiene también diversidad de pisos climáticos, todo esto, gracias a la presencia de la Cordillera de los Andes que se convierte en la formación orográfica más importante, dividida entre las cordilleras oriental y occidental (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2019).

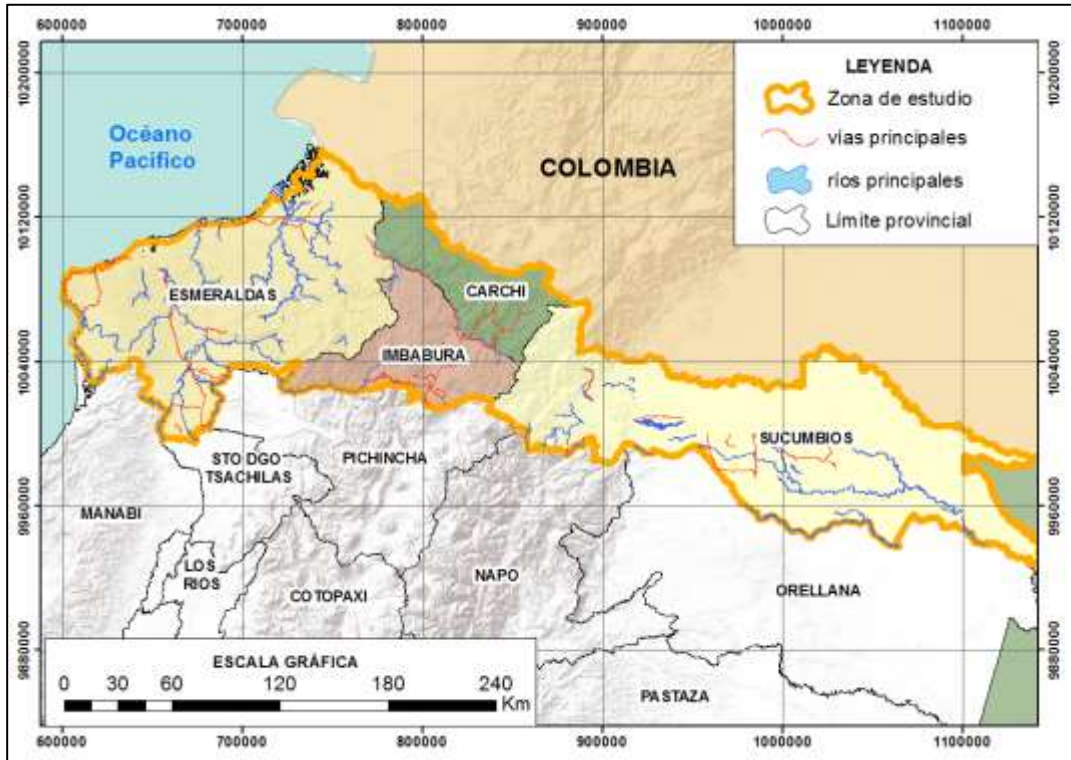


Figura 1. Ubicación de la Zona de Planificación 1 (Norte) del Ecuador.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El cambio climático y sus efectos se han relacionado directamente con cambios evidenciados en el rango de distribución de varias especies, las variaciones en el sistema climático han ocasionado que las especies se adapten a diferentes ecosistemas o que los cambios en las variables climáticas generen hábitats propicios para la expansión de un organismo (Campbell et al., 2015). En este contexto, los modelos de distribución de especies en los que intervienen proyecciones de escenarios futuros, son herramientas útiles que permiten identificar nuevos rangos de expansión de una determinada especie (Bhatt et al., 2013).

Para el modelamiento de la distribución potencial de una especie se puede utilizar diferentes métodos, como los de máxima entropía, para determinar zonas idóneas en la que puede darse la presencia de una especie en función de las variables dependientes (presencia y ausencia) e independientes (variables climáticas, geográficas, entre otros.) (Merow, Smith, & Silander, 2013). Al considerar proyecciones relacionadas con el cambio climático se puede determinar áreas probables de expansión de una especie en escenarios futuros (Bush et al., 2016).

1.7. Hábitat y Nicho Ecológico

Entender la preferencia de hábitat de una especie, es de gran interés dentro de diferentes disciplinas para explicar su abundancia y distribución espacial. Para cualquier especie, el hábitat es el lugar donde existen diferentes recursos y características físicas y biológicas que permitan el establecimiento del organismo y de esta manera su sobrevivencia y reproducción perpetuando su presencia en el mismo (Montegro & Acosta, 2008).

Dentro de un hábitat pueden interactuar una diversidad de especies que pueden coexistir ya que, tienen un papel particular en la comunidad, es decir cada una con diferentes nichos ecológicos que abarca los aspectos de su forma de vida (Audesirk, Audesirk, & Byers, 2003).

1.7.1. Nicho Ecológico

Dentro de los conceptos manejados para referirse a nicho ecológico proceden del concepto propuesto por Hutchinson (1957) “El nicho está definido como la suma de todos los factores ambientales que actúan sobre un organismos, el nicho es una región sobre un espacio multidimensional compuesto por una serie de variables ambientales, ecológicas e históricas, que permiten la sobrevivencia de la especie” (López, 2007).

El nicho ecológico abarca los recursos bióticos y abióticos totales que son utilizados por una población en su hábitat, estos recursos incluyen, el rango de temperatura en el que vive, el tipo de alimentación y el espacio que ocupa, entre otros (Kent, 2000). Al tener una relación directa entre los factores ambientales y las especies, estas tienen un determinado margen de tolerancia fisiológica en las cuales se desarrollan (López, 2007).

1.7.2. Tipos de Nicho Ecológico

El concepto de nicho ecológico se basa en variables ambientales, climáticas que definen el papel fundamental de una especie en la comunidad, en este contexto para determinar la competencia entre especies es fundamental identificar los rangos de valores de estas variables, en los que cada especie puede sobrevivir, sin embargo, dentro del entorno de una especie se puede encontrar dos tipos de nicho ecológico; el nicho fundamental y el realizado cuya diferencia se puede observar en la Figura 2 (Krebs & Elwood, 2008).

- **Nicho Fundamental o Potencial**

Conjunto de condiciones y recursos que puede utilizar una especie en ausencia de una competencia y otras interacciones bióticas, debido a estas competencias ninguna especie ocupa el nicho fundamental en su totalidad, describe en sí los límites fisiológicos de tolerancia de una especie (Krebs & Elwood, 2008) .

- **Nicho Realizado**

Es un subconjunto del nicho fundamental, en este sentido es el rango ambiental real en el que una especie existe en una comunidad, la especie no es excluida por competición determinando el espacio geográfico donde la especie habita efectivamente y la especie es realmente encontrada (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010).

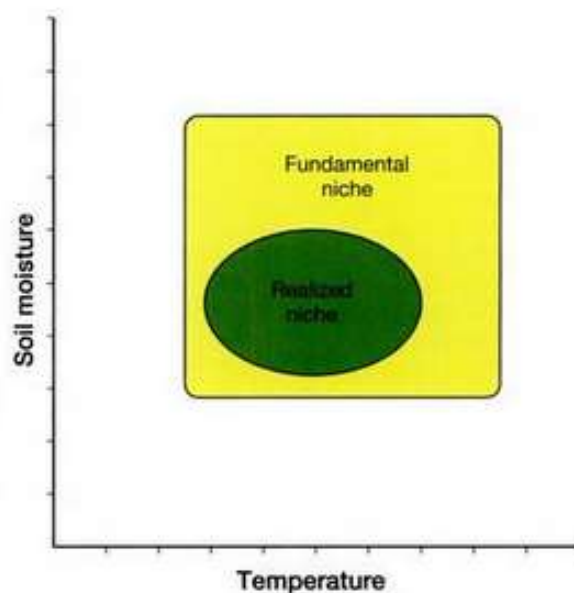


Figura 2. Ilustración esquemática tipos de nicho
Fuente: (Kent, 2000)

1.8. Modelamientos de Nicho Ecológico y Distribución de Especies

1.8.1. Modelos de nicho ecológico (ENM por sus siglas en inglés)

Los modelos de nicho ecológico (ENM) son aproximaciones al nicho ecológico de una especie, estas aproximaciones pueden ser empíricas o matemáticas obtenidas mediante el uso de técnicas y herramientas en las cuales se relaciona variables ambientales con datos de presencia, presencia-ausencia o abundancia de una especie en función de las variables que definen adecuadamente su nicho ecológico (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010).

Los modelos de nicho ecológico se pueden clasificar en modelos explicativos conocidos como *mecanicistas* y los modelos predictivos basados en estadísticos, los modelos *mecanicistas* son relaciones de causa-efecto entre las variables y la presencia de especies, mayoritariamente se dice que este tipo de modelo representan el nicho fundamental. Los ENM correlativos están basados en relaciones estadísticas de correlaciones significativas, identifican el nicho realizado ya que representan la probabilidad entre datos calculados de presencia-ausencia (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010).

1.8.2. Modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en inglés)

La distribución geográfica de una especie se entiende como el área donde una especie puede ser localizada, según Zunino & Palestrini (1991) lo define como “aquella fracción del espacio geográfico donde una especie está presente e interactúan en forma no efímera con el ecosistema” (Maciel, Manríquez, Octavio, & Sánchez, 2015).

Los modelos de distribución de especies son representaciones de un espacio con características idóneas para la presencia de una especie, se relaciona los datos de distribución real conocidas con variables predictivas de tipo ambientales, topográfico, climáticas basadas en una respuesta

matemática o estadística para definir zonas que delimiten las condiciones favorables para la presencia de una determinada especie (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011). Entre los diferentes factores que delimitan las condiciones favorables para determinar el área de distribución de una especie se encuentran las tolerancias fisiológicas ambientales las cuales conceptualizan al nicho ecológico, es decir, los modelos de distribución de especies utilizan el nicho ecológico como base teórica (Soberón, Osorio-Olvera, & Peterson, 2017).

El desarrollo de diferentes algoritmos han permitido modelar con mayor precisión los espacios idóneos para diferentes taxones, se han convertido en herramientas útiles para la evaluación, gestión y análisis de diferentes disciplinas como ecología aplicada, conservación, biogeografía, entre otros (Illoldi-Rangel & Tania, 2008).

Un esquema que sintetiza los factores que intervienen en el modelo de una distribución potencial de una especie se puede observar en la Figura 3.

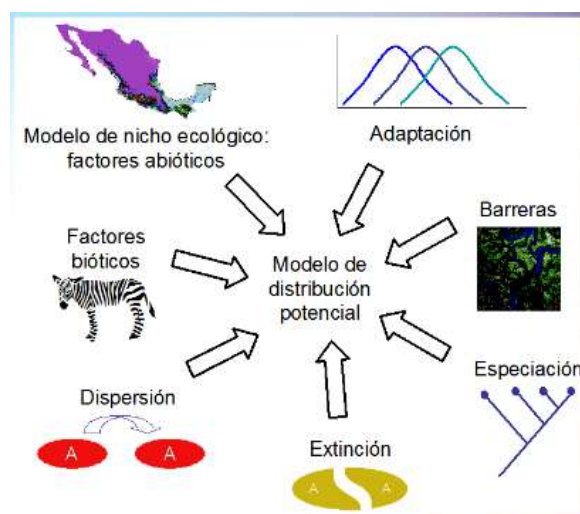


Figura 3. Factores que determinan la presencia de una especie
Fuente: (Illoldi-Rangel & Tania, 2008)

1.9. Procesos para el modelamiento de distribución de especies

Para la generación de un modelo se necesitan una base de datos y la identificación de las herramientas y técnicas apropiadas para obtener un modelo más preciso en donde se pueda encontrar la especie en estudio. Según (Benito, 2011), el proceso base para esta generación es:

1. La selección y formulación teórica del modelo
2. Preparación de los datos
3. Depuración de datos
4. Ejecución del modelo
5. Evaluación
6. Post-procesamiento y Análisis
7. Aplicación

Un esquema de diagrama de flujo base para obtener los modelos de distribución según (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011) se puede observar en la Figura 4, en donde se incluye la comparación de modelos actuales y con escenarios futuros de una especie.

Al asociar matemáticamente o estadísticamente los datos de presencia de una especie y las variables independientes (indicadores medioambientales) que intervengan dentro de condiciones idóneas para el modelamiento, se obtendrá valores que se puede interpretar como la probabilidad de presencia, en sí muestra el espacio ambiental en que se encuentran las especies y posteriormente se proyecta al espacio geográfico con las condiciones favorables para su desarrollo (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

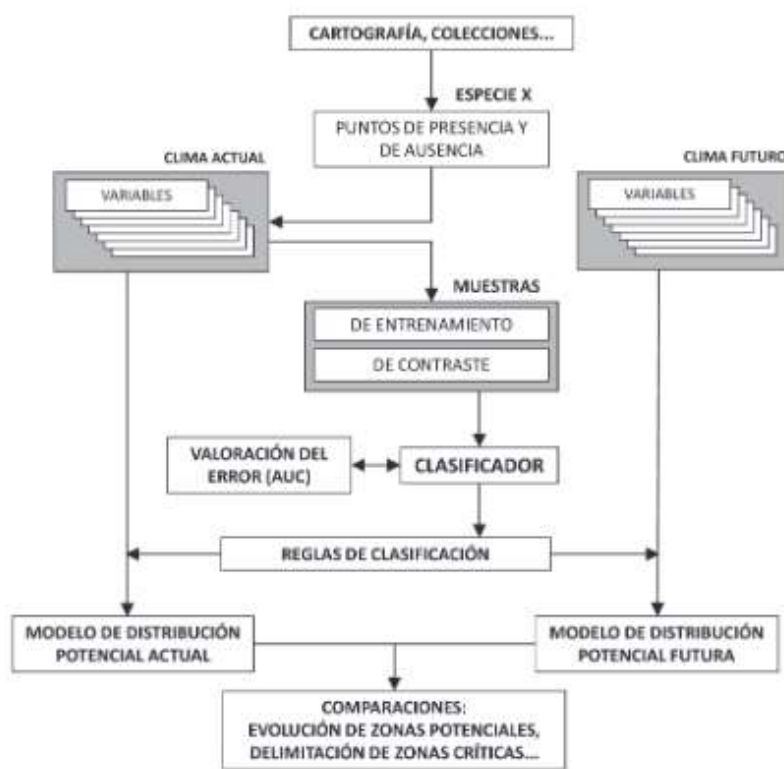


Figura 4. Esquema de flujo de trabajo.

Fuente: (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011)

1.9.1. Variables Independientes (indicadores medioambientales)

Son las variables que se refieren al medio abiótico, a las condiciones ambientales, climáticas, topográficas, socio-ambientales que se relacionan directamente con las condiciones para la presencia, ausencia o abundancia de las especies, estas relaciones entre los organismos y el medio abiótico dan como resultado los patrones espaciales de distribución (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

Para incluir las diferentes variables dentro del modelamiento deben realizarse una revisión selectiva con algunas condiciones, la primera es que tengan una relación alta con la distribución de la especie, muestren una significativa variabilidad en la zona de estudio t que entre ellas no sean dependientes, es decir, no estén excesivamente correlacionadas pues se dará pesos extras a estas.

La integración de todas las variables y la confiabilidad de las mismas permitirán predicciones más precisas (Hirzel & Lay, 2008)

Las variables comúnmente utilizadas son las variables climáticas como temperatura, precipitación y otras bioclimáticas obtenidas de un conjunto de datos llamado WORLDCLIM, información sobre la geografía, topografía, geología, altitud de la zona de estudio y variables socio-ambientales de tipo demográfico como índices de población, densidad y otros indicadores que muestren la influencia antrópica dentro del modelamiento (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

1.9.2. Variables Dependientes (Variables de respuesta)

Los modelos de distribución de especies son representaciones empíricas de las variables dependiente de presencia-presencia-ausencia o abundancia, las variables miden de forma nominal y ordinal (Guisan & Thuiller, 2005).

La información sobre la distribución de especies en su mayoría no está completa o su colección puede presentar varios inconvenientes como es el no tener información de ausencia y un alto porcentaje en errores de georeferenciación o una fallida identificación en su taxonomía, a la vez también se tiene fallas en una base de datos debido a una falta de estandarización en el muestreo. Se debe considerar que las variables de presencia, presencia-ausencia o abundancia describen los lugares con las características idóneas para la especie de estudio por lo que es necesario tener un rango geográfico amplio y las características medioambientales de los registros de las especies, la recolección de la información debe ser en campo y con el equipo capacitado para la identificación taxonómica correcta (Soberon & Petterson, 2005).

1.10. Métodos para el Modelamiento de Nicho Ecológico

Los modelos de nicho ecológico se han convertido en un conjunto de herramientas importantes para disciplinas que tienen líneas de estudio referentes a diferentes especies, a pesar de su creciente uso existe una gran variación dentro de las técnicas aplicadas y metodologías utilizadas, la diferencia radica en la configuración de los factores que implican y restringen la distribución de las especies (factores abióticos y límites de dispersión) (Saupe et al., 2012).

Los modelos de nicho ecológico están basados en tres técnicas de clasificación estadística:

- Técnicas Discriminantes: Necesitan datos biológicos de la especie que son la presencia y ausencia para poder construir el clasificador, entre ellos están:
 - Árboles de clasificación: Clasificación y árboles de regresión (CART), random forest, Árboles de regresión impulsados (BRT), Mixture discriminant analysis (MDA).
 - Técnicas de ordenación: Análisis de correspondencia canónica (CCA)
 - Redes Neuronales (ANN)
 - Regresión Multivariada Adaptiva (MARS).
 - Modelos Lineales generalizados (GLM): Regresión logística, support vector machines (SVM), Análisis de regresión generalizada y predicción espacial (GRASP)
 - Modelos aditivos generalizados (GAM)
 - Regresión por cuantiles
 - Estadística bayesiana

- Máxima entropía: MAXENT genera sus propias ausencias, por lo que no es necesario ingresar datos de ausencia.
- Técnicas Descriptivas: Requieren datos de presencia únicamente, entre ellos se destacan las envueltas ambientales BIOCLIM, ANUCLIM, BIOMAP, HABITAT, FLORAMAQ; métodos de distancias matemáticas ENFA-Ecological Niche Factor Analysis-Biomaper.
- Mixtas: Utiliza tanto técnicas descriptivas como discriminantes en el cual analiza datos de presencia y pseudo-ausencias. Dentro de estas técnicas se utiliza Desktop-GARP, OM-GARP (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

1.10.1. Máxima Entropía (MAXENT)

Los modelos de Máxima Entropía se basan en la distribución de la probabilidad de la presencia de una especie sobre un conjunto de sitios en un área de estudio bajo la teoría de mecánica estadística apoyados en que, la mejor aproximación a los fenómenos desconocidos maximizará la entropía de la probabilidad de distribución bajo ciertas condiciones fijas (Peterson, Papes, & Eaton, Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent, 2007). Maxent estima la distribución más uniforme en donde el valor esperado concuerdan con los valores promedios del conjunto de datos de ocurrencia y las características que intervienen estimando la idoneidad relativa de un lugar (Illoldi-Rangel & Tania, 2008).

Maxent usa datos de presencia de la especie para realizar una estimación sobre las distribuciones de probabilidad posibles según las condiciones ambientales particulares que intervienen en el análisis las cuales están directamente relacionadas con la disponibilidad de paisaje. A pesar de que existen varias discusiones sobre el uso único de datos de presencia se han destacado estudios que resaltan que los registros de presencia también demuestran factores relacionados con las razones

de las ausencias en un área ambientalmente adecuada, de esta manera Maxent genera sus propias ausencias (pseudo-ausencias) conocidas como “background”, es decir muestras de fondo como se observa en el esquema de la Figura 5. (Elith, Phillips, Hastie, En Chee, & Yates, 2011).

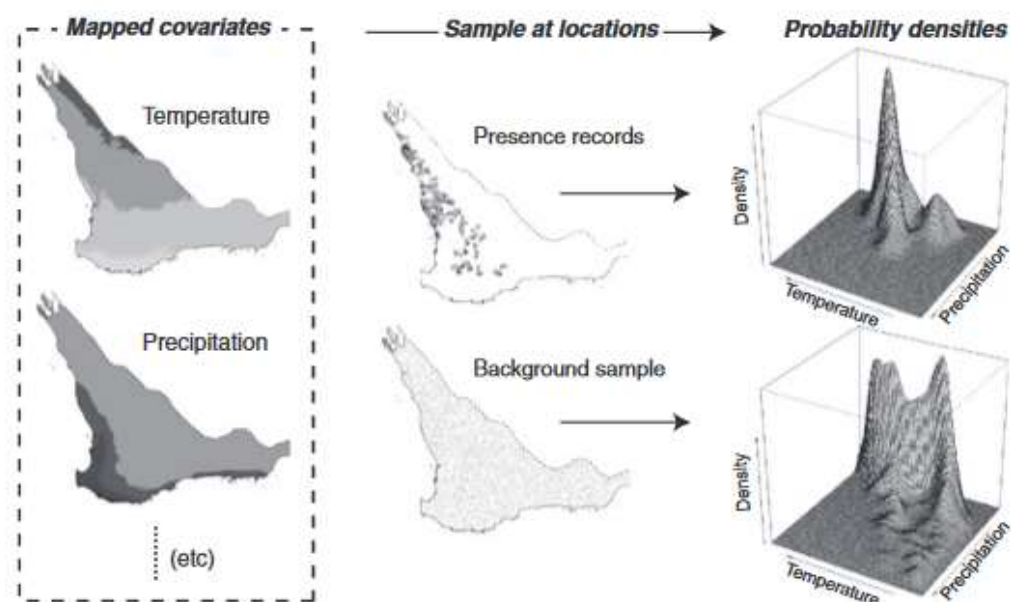


Figura 5. Esquema de modelamiento de Máxima Entropía (MAXENT)
Fuente: (Elith et. al., 2011)

Bajo estos fundamentos se ha desarrollado un software específico para el modelamiento de nichos ecológicos y distribución de especies denominado como Maxent, el programa es *open-source* y está disponible en la página https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/, la idea de este programa fue ideado por el Centro de Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural en asociación con AT&T-Research, el programa fue desarrollado por varios investigadores entre ellos Steven Phillips quienes siguen manteniendo y actualizando el mecanismo (Phillips, Dudík, & Schapire, 2018).

El programa se basa en la distribución uniforme de probabilidad y pesa cada variable ambiental para obtener valores de probabilidad de 0 y 1, mediante iteraciones altera los pesos de las variables para maximizar la similitud en los datos de ocurrencia, el algoritmo “*sequential update algorithm*” que utiliza converge en una distribución probabilística óptima obteniendo resultados determinísticos. Cada celda hace referencia a valores acumulativos siendo los valores más altos los más adecuados para la presencia de la especie y los cercanos a 0 los menos adecuados dentro de la zona de estudio (Lippi et al., 2018).

- **Descripción matemática de MAXENT**

El principio de máxima entropía establece la distribución más adecuada para realizar el modelamiento de un conjunto de datos en base a la entropía más alta entre las variables satisfaciendo las limitaciones de las condiciones (Harte, 2011).

Las localidades están dadas por x_1, \dots, x_m donde fueron seleccionados independientemente de X de acuerdo con alguna distribución de desconocida π , se debe construir una distribución $\hat{\pi}$ que se aproxime a π .

En construcción de $\hat{\pi}$, se hace una de un conjunto de características f_1, \dots, f_n , donde $f_j : X \rightarrow \mathbb{R}$. Estas características se relacionan con las variables ambientales utilizadas para caracterizar el ambiente o pueden ser características derivadas de ellas (Phillips, Dudík, & Schapire, 2004).

Para cualquier función $F: X \rightarrow \mathbb{R}$, $\pi[f]$ denota su expectativa bajo π y $\hat{\pi}$ denota una distribución empírica como $\hat{\pi}(x) = |\{1 \leq i \leq m : x_i = x\}| / m$. En general, $\hat{\pi}$ puede ser los bastante bajo medidas razonables de π (Phillips, Dudík, & Schapire, 2004).

Muchas de las construcciones pueden satisfacer las restricciones, se elige la más uniforme es decir la de máxima entropía, la distribución de entropía $p(n)$ detallada en (Phillips, Dudík, & Schapire, 2004), si es discreto está dada por:

$$H(p) = - \sum_{x \in X} p(x) \ln p(x) \quad (1)$$

Si es continuo por:

$$H(p) = - \int_x p(x) \log p(x) dx \quad (2)$$

Las restricciones se representan como ecuaciones con respecto al modelo de distribución desea, dadas las funciones f_1, \dots, f_n y los números de restricciones dados por a_1, \dots, a_k para casos discretos:

$$E_p[f_k(X)] = \sum_{n=1}^N f_j(x)p(x) = a_n \quad , \quad n = 1, \dots, N, \quad X \sim p \quad (3)$$

Si hay una solución, entonces la distribución única tiene forma de

$$p(n) = \frac{1}{Z} \exp(-\sum_k \lambda_j f_j(x)) \quad (4)$$

Donde Z es el valor de normalización:

$$Z = \sum_n \exp(-\sum_k \lambda_j f_j(x)) \quad (5)$$

λ_j , son valores reales apropiados usualmente encontrados como los multiplicadores de Lagrange (Harte, 2011).

Dentro de una gran serie de algoritmos para encontrar la distribución máxima como las escalas iterativas, métodos de gradiente, descenso de segundo orden, entre otros. MAXENT utiliza el algoritmo de actualización secuencial que modifica los pesos. Asumiendo que no existen pérdidas de las características f_j están entre $[0,1]$. En cada una de una secuencia de campos, se elige las

características f_j para actualizar para los cuales $RE(\hat{\pi}|f_j| \Pi q_\lambda|f_j|)$ es máxima, donde λ es el vector de peso actual, para la próxima actualización se basa en $\lambda_j \rightarrow \lambda_j + \alpha$, donde

$$\alpha = \ln \left(\frac{\hat{\pi}|f_j|(1-q_\lambda|f_j|)}{(1-\pi|f_j|)q_\lambda|f_j|} \right) \quad (6)$$

Los resultados de la distribución de $\hat{\pi}$ son los definidos por los pesos computados hasta que se encuentra una aproximación y la distribución óptima de máxima entropía (Phillips, Dudík, & Schapire, 2004).

MAXENT tiene un método incorporado de regularización (*l- regulaciones*), confiables que es más estable frente a variables correlacionadas en comparación a regresión por pasos ya que tienden a enfocarse sobre características importantes y producen pocos valores de 0 para λ_j (Elith, Phillips, Hastie, En Chee, & Yates, 2011).

1.11. Validación de los modelos de nicho ecológico

El fundamento de las validaciones de los modelos es la comparación y consiste en contrastar las predicciones obtenidas con datos independientes, los cuales preferiblemente deben ser autónomos a los usados para la generación del modelo. En varias ocasiones resulta difícil realizar un contraste con estos datos independientes principalmente por contar con una base de datos limitada de presencia y las cuales son necesarias dentro del modelamientos del nicho del organismo que puede influir directamente sobre la precisión del modelo (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

Mediante el uso de diferentes técnicas y métodos de modelación se puede obtener diferentes resultados entre sí, la medición de la bondad de cada uno de los métodos utilizados se basa en la evaluación del error; los cuales son casos clasificados incorrectamente. En este sentido se pueden

encontrar dos tipos de error: errores de omisión y errores de comisión (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

- **Errores de omisión:** Hace referencia a los errores que proviene al no predecir el lugar donde sí se encuentra una especie, es decir se clasificó a la celda de presencia como ausencia (Guisan & Thuiller, 2005).
- **Errores de comisión:** Este tipo de errores surgen debido que la predicción de la distribución de la especie no se produce, es decir se identifica una ausencia de la especie como presencia (Guisan & Thuiller, 2005).

La evaluación del resultado final de un modelo de distribución de especies y la comparación entre los diferentes métodos se realiza aplicando técnicas estadísticas que evalúan el desempeño de la predicción de cada modelo y su capacidad de discriminación, entre los estadísticos su evaluación se encuentran *Receiver Operating Characteristic* (ROC), AUC (*Area Under the Curve*), análisis de correlación, kappa de Cohen, validación cruzada, entre otros (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010).

1.11.1. Matriz de Confusión

Las mayorías de los modelos presentan errores y la matriz de confusión de presencia/ausencia es una manera muy útil para determinar si las predicciones realizadas por el modelo han sido adecuadas, la matriz también se conoce como matriz de error o tabla de contingencia, una representación de la misma se puede observar en la Figura 6 (Pearson, 2007).

La matriz registra cuatro tipos de casos:

- a) Verdadero positivo: El modelo predice que la especie está presente y los datos de prueba lo confirman como verdadero

b) Falso positivo: el modelo predice la presencia, pero los datos de prueba muestran que debería ser ausencia.

c) Falso negativo: El modelo predice ausencia y los datos de prueba muestran presencia.

d) Verdadero negativo: El modelo predice ausencia y los datos lo confirman (Pearson, 2007).

	recorded present	recorded absent
predicted present	<i>a (true positive)</i>	<i>b (false positive)</i>
predicted absent	<i>c (false negative)</i>	<i>d (true negative)</i>

Figura 6. Matriz de confusión de presencia/ausencia

Fuente: (Pearson, 2007)

Refiriéndose a una manera espacial, los cuatro tipos de casos se pueden explicar visualmente en la Figura 7.

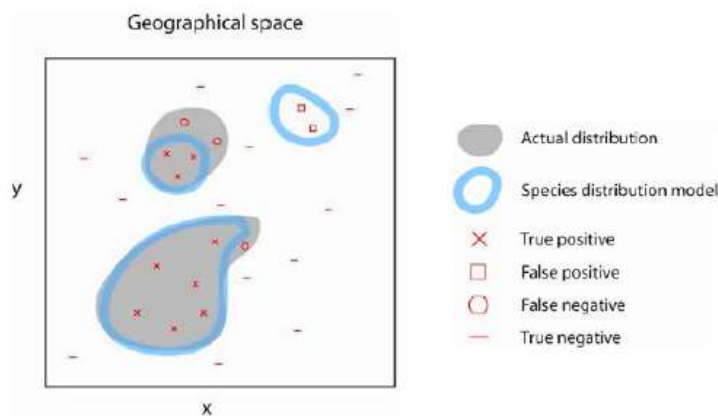


Figura 7. Diagrama de tipos de desempeño de un modelo predictivo.

Fuente: (Pearson, 2007).

Al analizar los tipos de casos se puede identificar mediante la matriz de confusión se puede comprender de mejor manera los dos tipos de errores.

1.11.2. Receiver Operating Characteristic (ROC)

La capacidad de los modelos de nicho ecológico para discriminar adecuadamente las celdas de presencia y ausencia de una especie puede ser evaluada utilizando el estadístico AUC definido como el área bajo la curva o ROC (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010). El AUC es una representación gráfica de capacidad discriminatoria de los modelos de clasificación, en el eje de las ordenadas se encuentra el error de omisión que corresponde a los casos positivos bien clasificados; el eje de las abscisas representan los falsos positivos los cuales serían los complementarios de la especificidad (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

En la Figura 8 se puede observar una ilustración de una curva de ROC la cual se forma al representar la sensibilidad frente a la “1- especificad”, en donde la línea rojo significa una mejor capacidad predictiva que la azul. La línea discontinua (1:1) significa una capacidad predictiva aleatoria, es decir, no hay capacidad de distinguir sitios ocupados y no ocupados (Pearson, 2007) .

Para obtener un resultado del rendimiento predictivo del rango de los umbrales, se puede medir el área bajo la curva ROC (AUC), la cual expresa una proporción del área total y toma valor entre 0 y 1. Los valores que tienden ser más próximos a 1 reflejan un modelo más preciso, un AUC de 0.5 sugiere que no se ha podido discriminar adecuadamente entre ausencia y presencias, de 0.7 a 0.9 se presume un rendimiento moderado del modelo de valor de 0.9 en adelante el modelo puede considerarse un nivel de rendimiento alto del modelo (Pearson, 2007). Además, gráficamente se puede observar que mientras las curvas se sitúen lo más juntas posibles y se encuentren orientados a la parte superior izquierda el ajuste del modelo sería mejor ya que indicaría que no habría ningún error de omisión (Ramos et al., 2018).

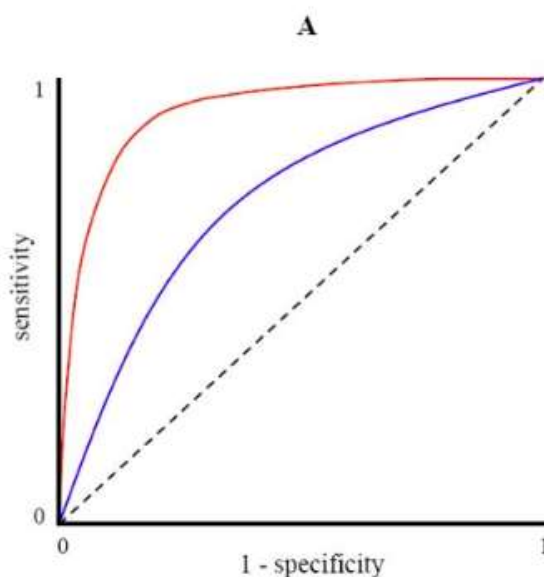


Figura 8. Distribuciones de frecuencia ilustrativas en una Curva de (ROC)
Fuente: Adaptado de (Pearson, 2007).

AUC es una prueba para registros de presencia y ausencia en los cuales se obtiene mayor precisión que una predicción aleatoria al aplicar “pseudo-ausencias” (Pearson, 2007). En el uso de este estadístico cabe recalcar que aumente su valor con el tamaño del área de estudio por lo que no es recomendable utilizarlo en diferentes áreas (Sillero, Martínez-Freiría, & Real, 2010).

3.1.1. Análisis de la tasa de omisión

Una de las métricas para evaluar los modelos fueron los promedios de los resultados de la prueba binomial de omisión de los once test binomiales: valor fijo acumulado 1, valor fijo acumulado 5, valor fijo acumulado 10, el mínimo de puntos de presencia de entrenamiento, el percentil 10 de los puntos de presencia de entrenamiento, prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de entrenamiento, valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de entrenamiento, prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de prueba, valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de prueba, balance de los puntos de omisión de entrenamiento- área predicha y valor

umbral; comparación de la entropía de las distribuciones originales y consideradas a un umbral determinado (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006).

1.12. Cambio Climático

El cambio climático es un fenómeno global cuyas consecuencias en el sistema climático son de gran interés dentro de las decisiones enfocadas a contrarrestar sus efectos (Quiroz, 2013). Durante los últimos 50 años se ha liberado grandes cantidades de CO_2 junto a otros gases de efecto invernadero (Ver Figura 9), los cuales retienen el calor en las capas inferiores de la atmósfera y el aumento progresivo de ellos aumenta la probabilidad de graves impactos en los seres humanos y los ecosistemas (IPCC, 2014).

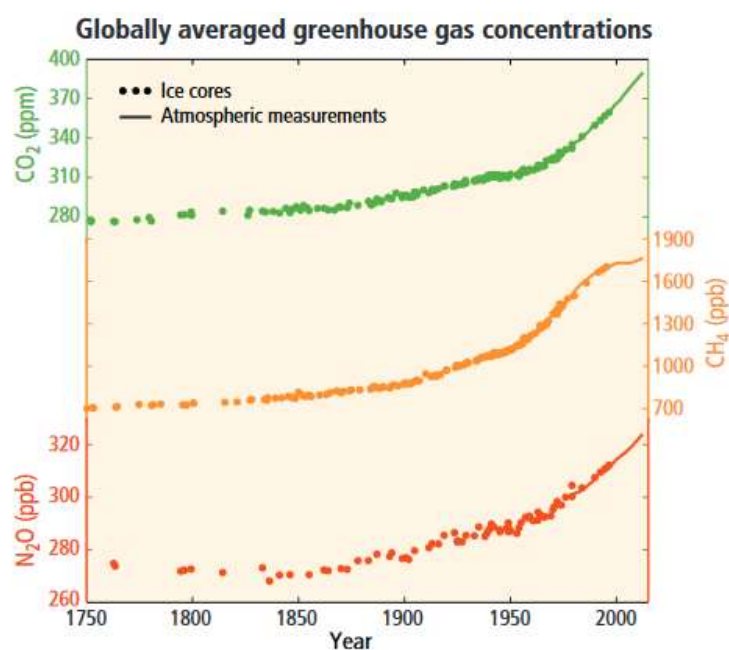


Figura 9. Cambios observados en Concentraciones de gases de efecto invernadero
Fuente: (IPCC, 2014)

El cambio climático tiene efectos en diversas dimensiones del sistema climático, las proyecciones muestran que aumentos de temperatura, episodios de precipitación extrema serán más intensos, el océano se acidificará y calentará y el nivel medio del mar seguirá elevándose. Los

efectos dependerán de la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, el crecimiento demográfico y de las medidas que se adopten para desligar el desarrollo humano con el uso inadecuado de los recursos (Rodríguez, Mance, Barrera, & García, 2015).

A pesar que el cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, los forzamientos propiciados al sistema climático por actividades antrópicas han acelerado estas variaciones. En este sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define al cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2013).

Entre los varios conceptos que se relacionan con el cambio climático, la CMNUCC diferencia claramente a la variabilidad climática del cambio climático ya que la variabilidad está atribuida a causas naturales; ocasionadas por las oscilaciones en los diferentes procesos del sistema climático o por las fluctuaciones en la radiación solar, alrededor de un estado medio del clima en las diferentes escalas espaciales y temporales más amplias de los fenómenos meteorológicos (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017).

1.12.1. Escenarios de Cambio Climático

La razón principal para desarrollar escenarios es el poder acelerar los modelamientos de los efectos del cambio climático en el sistema climático a las actividades humanas, las cuales se desarrollan paralelamente con las emisiones producidas (Moss et al., 2008). Para la elaboración de bases para investigaciones y evaluaciones que involucran a las emisiones y el análisis de su impacto, la comunidad científica ha desarrollado diferentes herramientas, entre ellas se encuentran

descripciones coherentes e internamente consistentes y convincentes descritas como *escenarios* (Van Vuuren et al., 2011).

Los escenarios según (IPCC, 2013), son una descripción plausible de un futuro verosímil basadas en supuestos de fuerzas motrices y sus relaciones más importantes, los escenarios no deben considerarse como predicciones o pronósticos sino como un panorama de los efectos de diferentes situaciones y medidas.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), encargado de proporcionar informes sobre evaluaciones científicas periódicas sobre posibles riesgos del cambio climático y opciones de adaptación y mitigación, coordinó el proceso de la generación de escenarios para sus evaluaciones (IPCC, 2019). Los escenarios basados en los modelos climáticos del Cuarto Informe de Evaluación (AR4) denominados SRES fueron generados utilizando un proceso secuencial (Sección *a* de la Figura 10), el cual tuvo algunos inconvenientes ya que bajo este esquema el proceso no podía continuar hasta que el paso previo se haya finalizado por completo y no contemplan los posibles acuerdos para mitigar las emisiones. Para los escenarios del Quinto Informe de Evaluación, los científicos desarrollaron un proceso en paralelo, como se observa en la sección *b* de la Figura 10, con el fin de disminuir el tiempo en el desarrollo de los escenarios de emisiones y poderlos utilizar para investigaciones de futuros impactos (Moss et al., 2008).

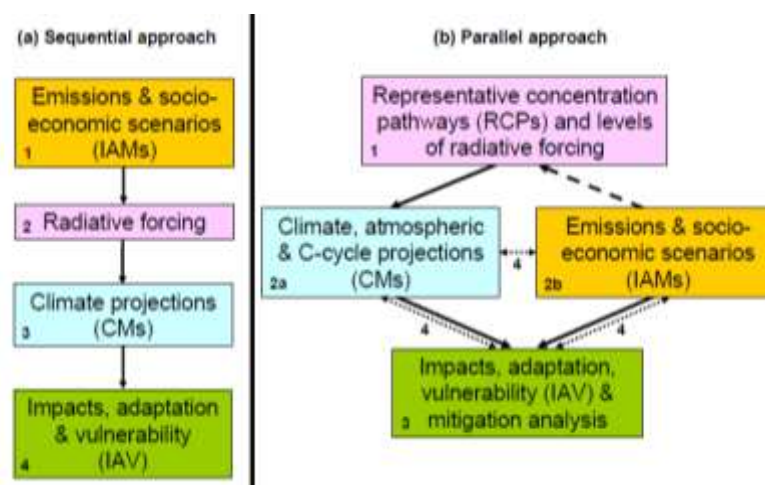


Figura 10. Procesos de Generación de los escenarios de Cambio Climático.

Fuente: (Moss et al., 2008).

1.12.2. Trayectorias de concentración representativas (RCP)

Para tener un panorama que abarquen las series temporales de emisiones y concentraciones de la gama de los gases de efecto invernadero, aerosoles, gases químicamente activos, el uso de suelo y la cubierta terrestre; se desarrolló (Ver

Tabla 1) un conjunto de escenarios denominados “*Trayectorias de concentración representativas*” (RCP por sus siglas en inglés) (IPCC, 2013).

En el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático se han definido cuatro escenarios de emisión, las cuales se identifican por la alteración del flujo de energía radiante en la atmósfera conocido como forzamiento radiativo (Santamaría, 2010). El forzamiento radiativo (FR) de las proyecciones utilizadas contemplan el total para el año 2100 y varían desde 2,6 a 8,5 W/m^2 ; además involucran panoramas desde los posibles acuerdos internacionales que limiten el cambio climático hasta representaciones sin restricciones de emisiones (Ver Tabla 2) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, Fundación Biodiversidad, OECC, 2015).

Tabla 1*Equipo científico desarrollador de los RCP.*

RCP's	Equipo desarrollador
2.6	IMAGE modeling team of the Netherlands Environmental Assessment Agency.
4.5	MiniCAM modeling team at the Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI).
6.0	AIM modeling team at the National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan
8.5	MESSAGE modeling team and the IIASA Integrated Assessment Framework at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria.

Fuente: (RCP Database, 2009)

Tabla 2*Síntesis de los panoramas de forzamiento radiativo utilizado en los escenarios.*

	FR	Tendencia del FR	CO ₂ en 2100
RCP 2.6	2.6 W/m ²	Decrecientes en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W/m ²	creciente	936 ppm

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, Fundación Biodiversidad, OECC, 2015)

El escenario con un nivel de forzamiento muy bajo es el RCP 2.6, a los escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0 se los puede conocer como los escenarios de estabilización y el panorama con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero es el RCP 8.6, para los diferentes escenarios se han simulado el comportamiento de las diferentes variables que se relacionan con el sistema climático como lo es la temperatura media global, en la siguientes figuras se puede observar la diferencia de las temperaturas en grados centígrados (Figura 11) y las concentraciones de CO₂ (Figura 12) considerandos en los cuatro escenarios (IPCC, 2013a).

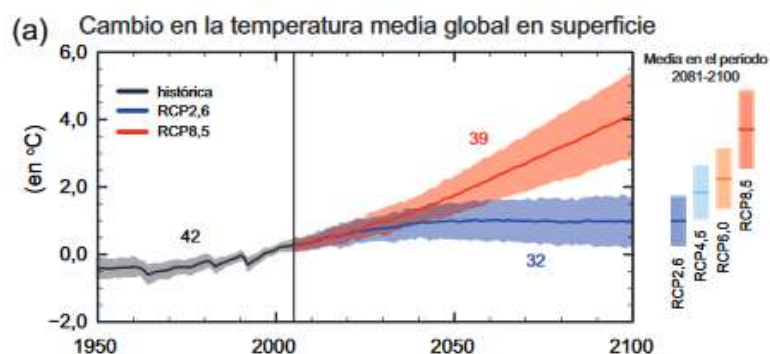


Figura 11. Cambio en la temperatura Media Global en superficie considerando los 4 RCP.
Fuente: (IPCC, 2013a)

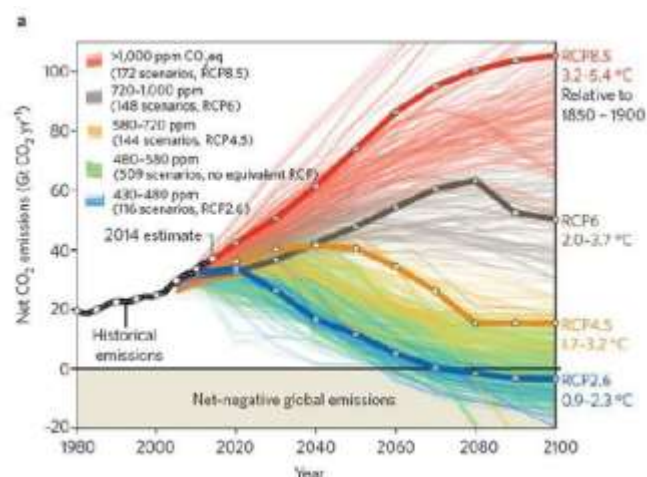


Figura 12. Concentración de CO_2 considerados en cada uno de los escenarios RCP.
Fuente: (IPCC, 2013)

Las Trayectorias de concentración representativas (RCP) sirven como entrada para diferentes modelos, al ser un conjunto consistente de proyecciones pueden ser aplicados para una gran variedad de propósitos y estimaciones en las que intervengan variables ambientales (NOAA, 2019). De acuerdo al reporte AR5, las proyecciones climáticas globales indican una alta probabilidad que la temperatura de la superficie para finales del siglo XXI sea superior a 1,5 °C y para la precipitación se evidencia fuertes contrastes entre las regiones húmedas y secas con algunas excepciones regionales como se muestra en la Figura 13 (IPCC, 2013a).

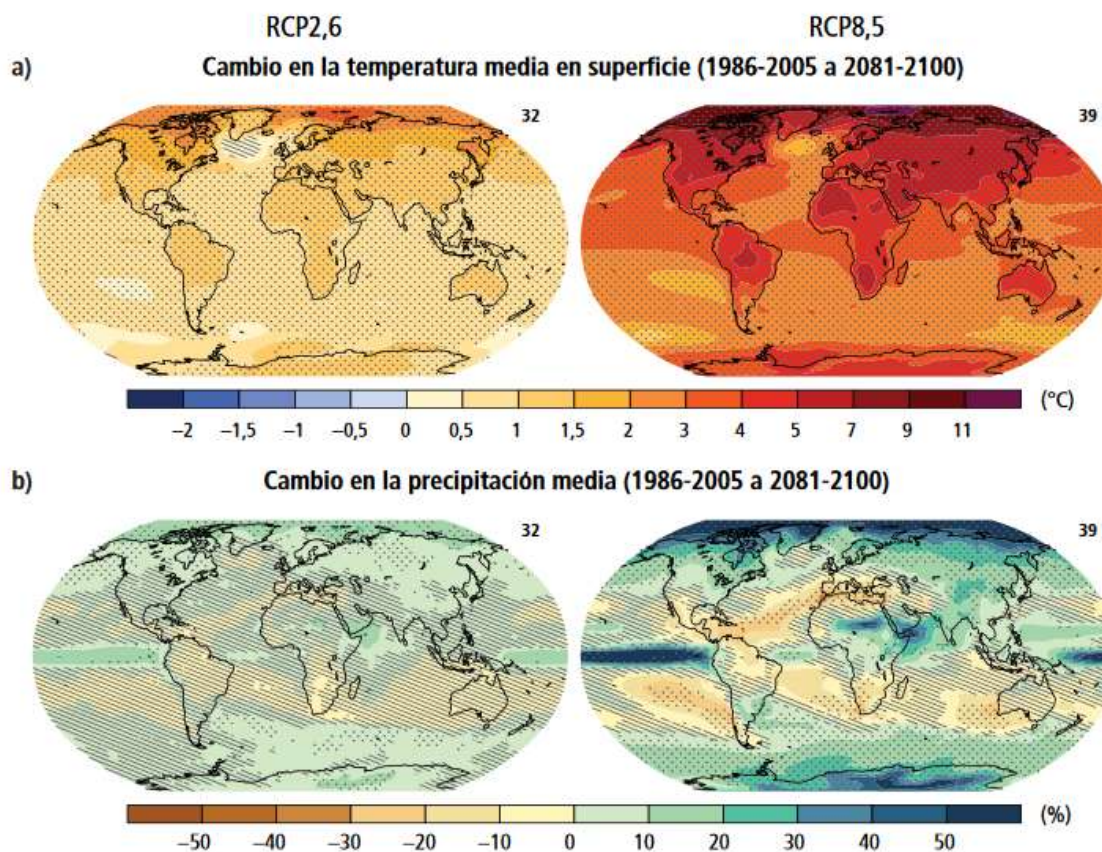


Figura 13. Ilustraciones de proyecciones de cambio de temperatura y precipitación media.
Fuente: (IPCC, 2013a).

1.13. Impacto del Cambio Climático en la biodiversidad

Los efectos del cambio climático se han evidenciado dentro de procesos esenciales de varios organismos; como en el crecimiento, en la reproducción y sus formas de supervivencia; provocando la afectación de varias poblaciones. La pérdida o cambios de la biodiversidad han sido acelerados y en la actualidad se siguen evidenciado varios casos de extinción o adaptación debido a los efectos del cambio climático en su fisiología y en el medio físico que habitan, una representación de estas alteraciones se puede observar en la Figura 14. (GREENPEACE, 2018).

Existe evidencia que el cambio climático ha afectado y continuará afectado a la diversidad biológica en los cambios en la distribución, aumentos en la tasa de extinción, alteraciones en los tiempos de reproducción. Las especies son menos capaces de adaptarse debido al aceleramiento del cambio en el sistema climático provocando de esta manera la extinción ya que numerosas especies no podrán adaptarse con suficiente rapidez a las nuevas condiciones (Ver Figura 14) (PNUMA, 2007).

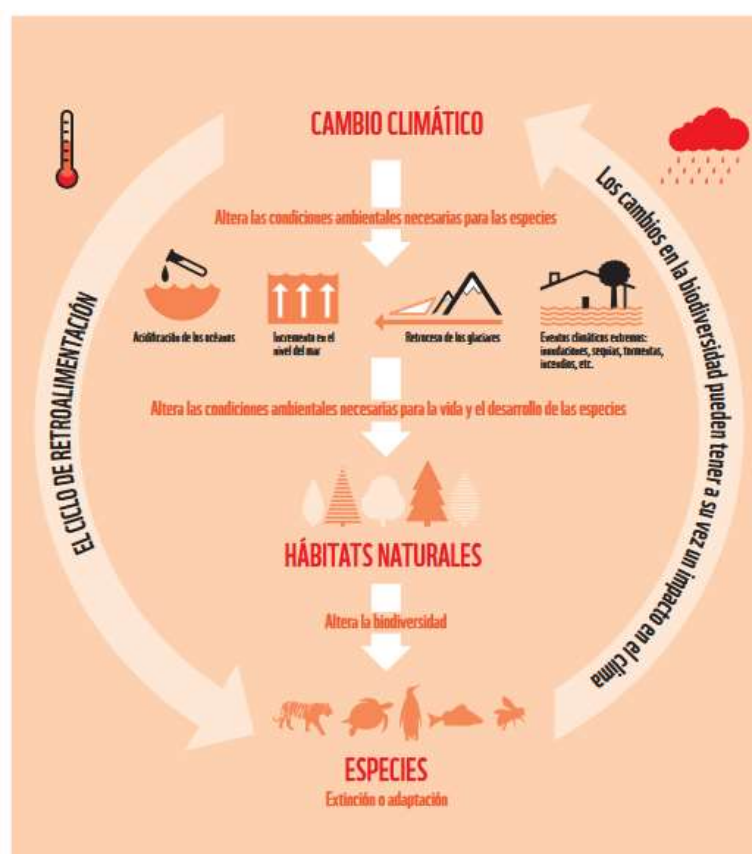


Figura 14. Impactos del cambio climático sobre las especies
Fuente: (WWF, 2015)

Una de las respuestas de las especies al cambio climático es la adaptación, que en un contexto de conservación y preservación de la biodiversidad se presentan desafíos difíciles dentro del manejo de especies y ecosistemas a un clima cambiante. Sin embargo, también representan varios

desafíos en otros enfoques de planificación y estrategias para el ser humano, ya que la adaptación de las especies podría involucrar nuevos espacios geográficos en los cuales históricamente no se había tenido registros de su presencia (Watson, Rao, Ai-Li, & Yan, 2012).

Un análisis reciente de las posibles futuras distribuciones de biomas en América del Sur muestra que grandes proporciones de selvas amazónicas podrían ser reemplazadas por sabanas tropicales, se predice que los océanos se enfrenten a procesos de acidificación que para varios ecosistemas, como los arrecifes o manglares, signifiquen una alta tasa de degradación. Por lo tanto, para la diversidad genética las implicaciones de estos cambios son potencialmente fuertes y responderán de manera diferente y usando varios mecanismos para evitar o mitigar estos efectos. Las tres direcciones pueden ser: moverse en el espacio geográfico, ajustar los eventos de sus ciclos de vida, cambiar los rasgos de su fisiología para enfrentar las nuevas condiciones climáticas (Ver Figura 15) (Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller, & Courchamp, 2012).

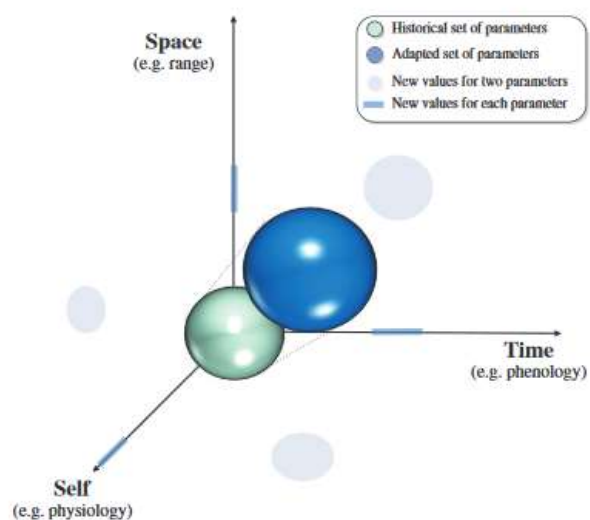


Figura 15. Direcciones de las respuestas de la biodiversidad al cambio climático
Fuente: (Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller, & Courchamp, 2012)

1.14. Aplicación de los SIG en los MDE bajo escenarios de cambio climático.

Con el desarrollo de varias técnicas estadísticas con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica, los modelos predictivos de distribución de las áreas de una especie ha aumentado, los modelos de relación estadística y escenarios de entornos actuales permiten modelos relacionados con aspectos de diversidad biogeográfica, biología entendiendo a la psicología de respuesta que tendría una especie a los cambios de clima (Guisan & Zimmermann, 2000).

El modelamiento para predecir la distribución espacial natural de las especies con variables relacionadas al cambio climático se centra en la caracterización del bioclima de la especie en escenarios futuros, registros han evidenciado que los cambios en el clima influyen directamente a la expansión o contracción del rango de distribución de una especie (Pearson & Dawson, 2003a).

La elección del método y la metodología debe basarse primordialmente en el objetivo de estudio, la base de datos disponible en la actualidad para caracterizar los aspectos bióticos y abióticos idóneos de la especie en estudio, el probar con un rango amplio de situaciones o escenarios de cambio climático permitirá definir criterios sobre las predicciones de los modelos (Guisan & Thuiller, 2005).

Los modelos de distribución mecanicistas incorporar procesos de distribuciones ambientales basadas en la fisiología de la especie ligados con los flujo de masa y la energía de cada organismo incorporando aspectos de cambio climático calculan las diferentes condiciones ambientales para obtener una escala de paisaje y condiciones geográfica donde se puede establecer una determinada especie (Kearney, Wintle, & Porter, 2010).

1.15. Ecología del Vector *Aedes aegypti*

El mosquito *Aedes aegypti* (Ver Figura 16) es una de las especies más importantes dentro de la transmisión de enfermedades y es el principal vector del virus que causa el Dengue considerándose una especie invasora ya que ha colonizado lugares fuera de su hábitat nativa (Moore et al., 2013). Además de estar relacionada con el dengue, el vector también trasmite otras enfermedades como la fiebre amarilla, la fiebre de Chikungunya, la fiebre de Zika y otros tipos de encefalitis (Weetman et al., 2018). Según Christophers, 1960 citado en (Rey & Lounibos, 2015) la especie es originaria de África y se colonizó en América debido al transporte de esclavos durante los siglos XV y XVII.



Figura 16. Especie *Aedes aegypti*

Fuente: (European Centre for Disease Prevention and Control, 2016)

Es considerado un vector urbano del virus del Dengue por tener una estrecha asociación con el medio ambiente humano lo que permite la presencia de la especie en diferentes regiones con factores climáticos adecuados (Jasen & Beebe, 2010). Tiene una gran capacidad adaptiva debido a las características de su biología y las estrategias de reproducción; los huevos son resistentes a condiciones de sequías y se relacionan directamente con las actividades antrópicas ya que sus hábitos son domiciliarios y viven dentro de casas y sus alrededores depositando sus huevos en sitios de agua estancada (Jualiano & Lounibos, 2005).

1.16. Dengue

El dengue es una enfermedad arboviral, que dentro de la salud es considerada una de las más importantes a nivel mundial debido a que la incidencia en últimos 50 años ha aumentado 30 veces por su creciente expansión geográfica. El dengue es transmitida por la picadura de las hembras infectas por el virus de los mosquitos del género *Aedes* y del cual existen cuatro serotipos (DEN 1, DEN 2, DEN 3 y DEN 4), la infección puede producir una amplia gama de manifestaciones clínicas que pueden llegar a ser potencialmente mortales (Bhatt et al., 2013).

Los síntomas en las personas infectadas por el virus son diferentes por lo que se ha clasificado al Dengue según su gravedad en: Dengue con señales de Alarma y Dengue Grave. La determinación de la enfermedad en función de su gravedad es de gran importancia dentro del tratamiento al que se deben someter los infectados y para el sistema de vigilancia epidemiológica a nivel nacional e internacional, los criterios para determinar el tipo de dengue se lo puede observar en la Figura 17 (OMS, TDR, 2009).



Figura 17. Clasificación de casos de dengue sugerida y niveles de gravedad

Fuente: (OMS, TDR, 2009)

En el 2019 se notifica una incidencia de 57.3 casos por 1000 habitantes (Ver Figura 18), en el 2018 los casos de dengue grave y con signos de alarma fueron superior a la de dos años anteriores pero inferior a los reportados en los 10 años previos, estas cifras reflejan la importancia del dengue dentro de la salud pública de los diferentes países (OMS, OPS, 2019).

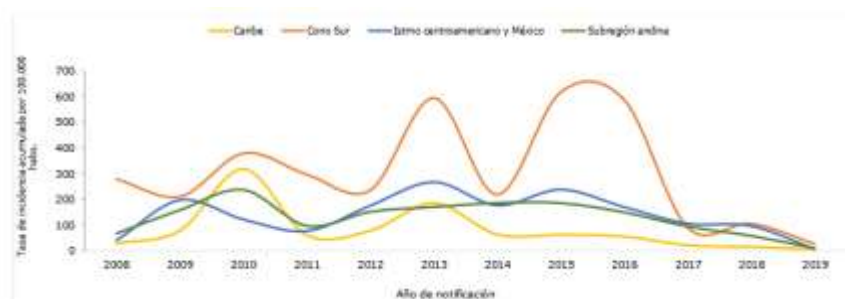


Figura 18. Tasa de incidencia de casos reportados de dengue por año y subregión
Fuente: (OMS, OPS, 2019)

La presencia del dengue se evidencia en climas tropicales y subtropicales, especialmente en los sector urbanos o semiurbanos a nivel mundial afectando a niños, jóvenes y adultos (OMS, 2019). En América solamente se ha tenido evidencia que la transmisión del dengue es a través del mosquito *Aedes aegypti*. Sin embargo, *el vector Aedes albopictus* es un vector potencial en la región pues está relacionado con la transmisión del virus en otros continentes (Ministerio de Salud Argentina, 2013).

Existen varios criterios que se relacionan con la incidencia del virus en las diferentes regiones; entre ellos se encuentra la globalización, los cambios en actividades de comercio, las tendencias de aumento demográfico y los cambios en las tendencias de variables ambientales. La variación en las condiciones climáticas como la temperatura, precipitación, humedad determinan la presencia del vector ya que producen ambientes totalmente adecuados para el ciclo de vida del mosquito y el aumento en la transmisión del virus (Nealon & Ebi, 2016).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla el procedimiento para el modelamiento de la distribución potencial del vector *Aedes aegypti* bajo diferentes escenarios de cambio climático, las variables bioclimáticas utilizadas fueron actuales y proyecciones basadas en los modelos climáticos globales (GCM): GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR al año 2050, para cuatro vías de concentración representativas (RCP): 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 las cuales se utilizan en el Quito Informe de Evaluación del IPCC (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

Las variables involucradas en el estudio se encuentran Referenciadas al Sistema WGS84, proyección UTM zona 17S y fueron procesadas mediante el uso de los software ArcGis y QGIS para obtener las entradas necesarias para el modelamiento realizado en el software MaxEnt, el cual usa un algoritmo de Entropía Máxima para determinar áreas idóneas para la presencia de la especie bajo condiciones predichas en donde se ha encontrado registros de presencia de una determinada especie (Merow, Smith, & Silander, 2013).

1.17. Esquema Metodológico

En la Figura 19 se resume el proceso base que consta principalmente de las fases de determinación de la zona de estudio, selección y organización de la información, procesamiento de los datos, análisis de los resultados y comparación de los diferentes modelos.

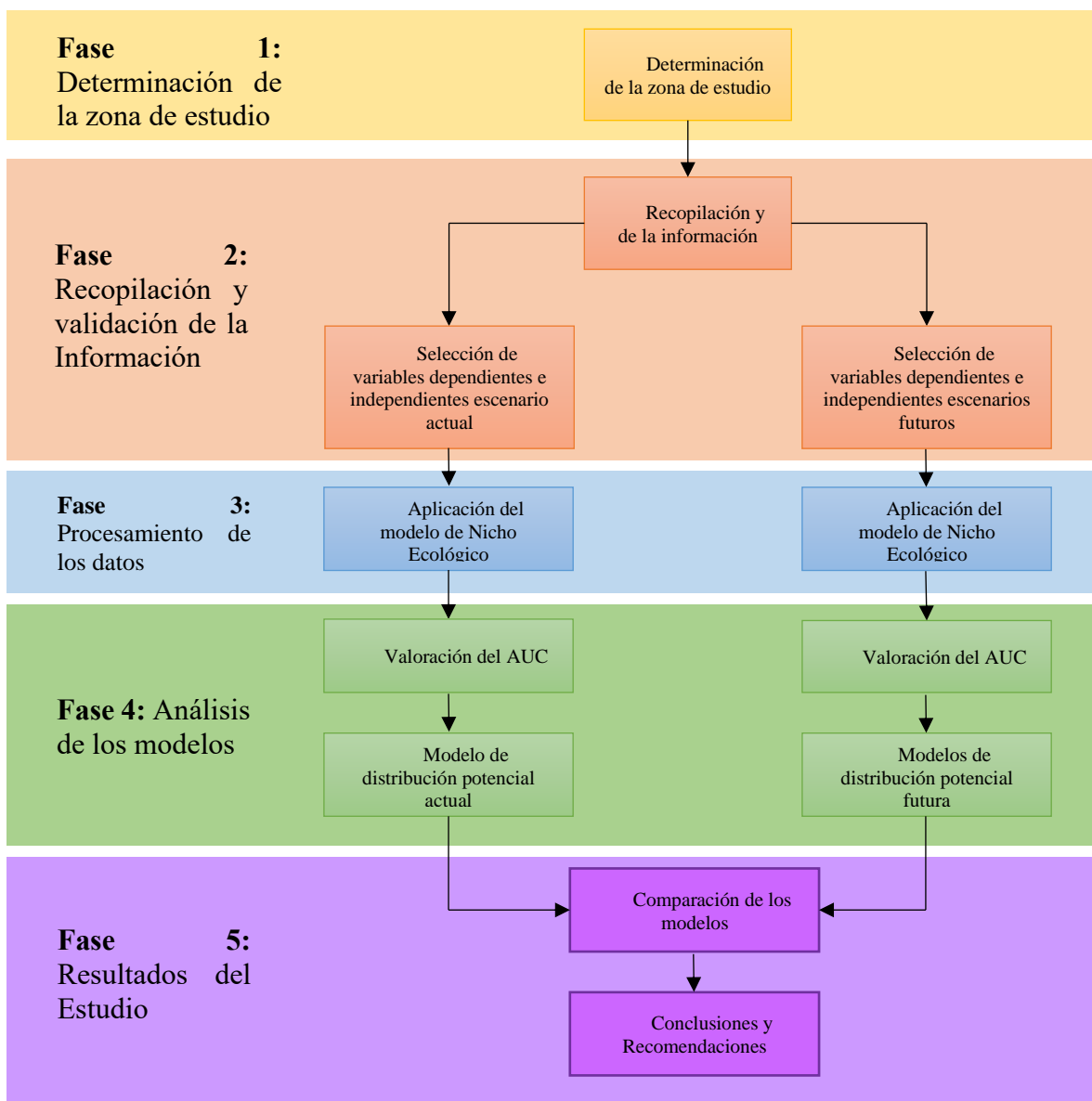


Figura 19. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto de investigación

1.18. Recopilación de la Información

Dentro de la información necesaria para el modelamiento de la distribución potencial de una especie, es fundamental la información de las variables dependientes (datos de presencia, ausencia o pseudo-ausencia) y las variables independientes o predictoras; las cuales mediante diferentes técnicas de modelamiento de nichos y distribuciones de especies muestran la probabilidad de la presencia de la especie en estudio debido a la idoneidad de las condiciones predichas de la especie (Ver Sección 1.9).

En este sentido, se recopiló la información necesaria a través de entidades tales como el Ministerio de Salud Pública, Sistema Nacional de Información y sitios web que cuentan con bases de datos validados como WorldClim, SEDAC para generar los insumos necesarios para el modelamiento de la distribución espacial de la especie mediante el uso de herramienta geo-informáticas.

1.18.1. Variables Dependientes

- **Datos de presencia del vector *Aedes aegypti***

El Ministerio de Salud Pública del Ecuador (MSP), ha realizado el levantamiento de los índices aédicos a nivel de Ecuador continental. Los datos fueron recogidos durante los diferentes años por técnicos de control de vectores del Servicio Nacional para el control de enfermedades transmitidas por vectores y de los cuales llevan registros zonales a nivel de circuitos para determinar el porcentaje de casas positivas a la presencia del vector *Aedes aegypti*.

Para los datos de entrada de este estudio los registros positivos para el vector *Aedes aegypti* fueron identificados y localizados a nivel parroquial en la Zona de planificación 1 mediante la asignación de las coordenadas a los centroides de cada una de las parroquias en las cuales se han

registrado la presencia del vector, en la Figura 20 se puede observar los puntos de presencia de la especie georeferenciados.

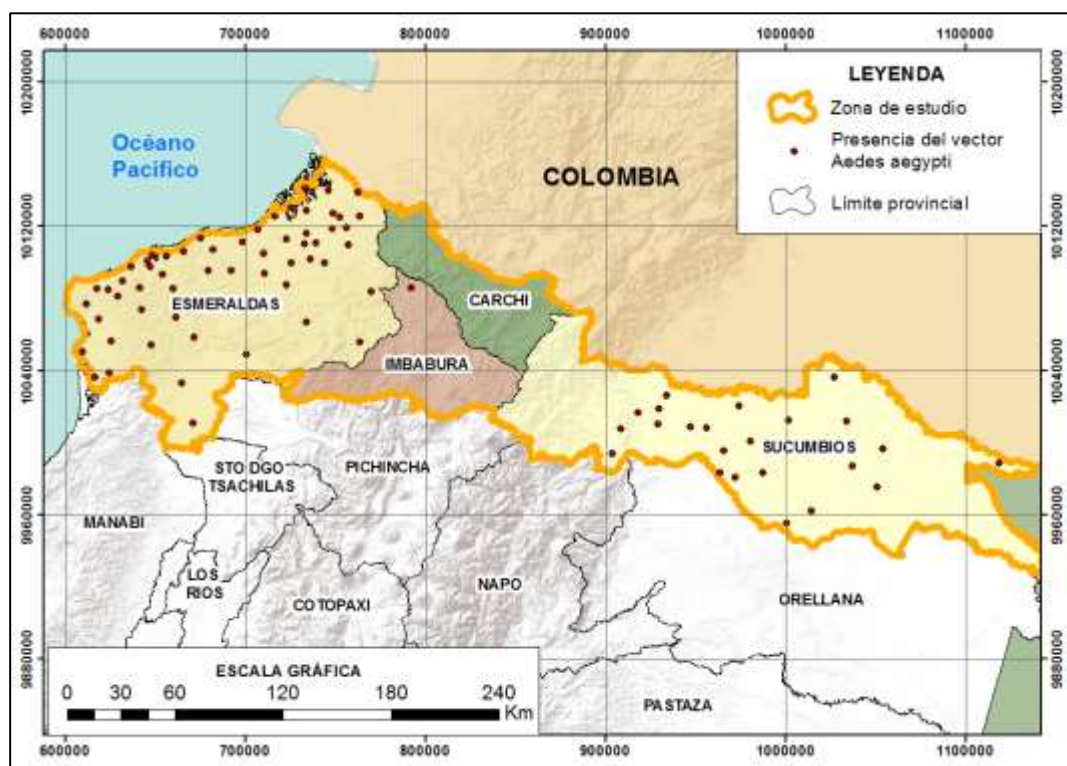


Figura 20. Presencia del Vector *Aedes aegypti* en la zona de planificación 1 del Ecuador.
Fuente: (Ministerio de Salud Pública, 2019)

1.18.2. Variables Independientes

- **Variables Bioclimáticas**

Las variables bioclimáticas fueron obtenidas del Sitio Web WorldClim- Global Climate Data (<https://www.worldclim.org/>) (WorldClim, 2016); el cual tiene un conjunto de datos climáticos en condiciones actuales y futuras obtenidas mediante interpolaciones de datos observados climáticos mensuales, trimestrales y anuales de diferentes estaciones en diferentes resoluciones como 10 min, 5 min, 2.5 min y 30s (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

Las variables involucradas en el modelamiento de la distribución actual de la especie fueron obtenidas de la base de datos de Condiciones Actuales, Versión 2.0 del periodo 1950 a 2000 a una resolución de $1km^2$ por pixel (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

Las 19 variables bioclimáticas (Ver Tabla 3) para el modelamiento de la distribución futura fueron obtenidas de la base de datos de Condiciones Futuras, la cual cuenta con datos a mayor escala de Modelos Climáticos Globales (GCM) proyectados en función de los 4 escenarios de emisión denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) utilizadas en el Quinto Informe del IPCC (WorldClim, 2016).

Tabla 3.

Variables bioclimáticas

Variab les	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Promedio del Rango diario
BIO3	Isotermalidad
BIO4	Temperatura Estacional
BIO5	Máxima Temperatura del mes más caliente
BIO6	Mínima Temperatura del mes más frío
BIO7	Rango de Temperatura Anual
BIO8	Promedio de temperatura del trimestre más húmedo
BIO9	Promedio de temperatura del trimestre más seco
BIO10	Promedio de temperatura del trimestre más caliente
BIO11	Promedio de temperatura del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Precipitación estacional (Coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más caliente
BIO19	Precipitación del trimestre más frío

Fuente: (WorldClim, 2016)

Los Modelos Climáticos Globales escogidos fueron: GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR proyectados para el año 2050 con una resolución de 30s, en la Tabla 4 se puede describe los centros de Modelamiento y la resolución de cada modelo de circulación.

Tabla 4.

Modelos utilizados para el MDE futura del vector.

Nombre del Modelo (GCM)	Centro del Modelamiento	Resolución en grados de arco (Lat x Long)
GISS-E2-R	USA: NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies)	2.5 x 2.0
MIROC-ESM	Japan: Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Meteorological Research Institute	2.81 x 2.78
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	3.75 x 1.89

Fuente: (Ahmed, Sachindra, Shahid, Demirel, & Chung, 2019)

Las capas se encuentran a nivel mundial, por tal motivo se utilizó un máscara del área de estudio (Zona de planificación 1 del Ecuador) para todas las variables usando la herramienta *Extract by Mask* de ArGis y fueron georeferenciados en el Sistema de Coordenadas UTM, WGS 84- 17 Sur usando la Herramienta *Project Raster* con el mismo tamaño de pixel (927 x 927) metros e igual número de filas y columnas (588 x 251) como se puede observar la Figura 21.

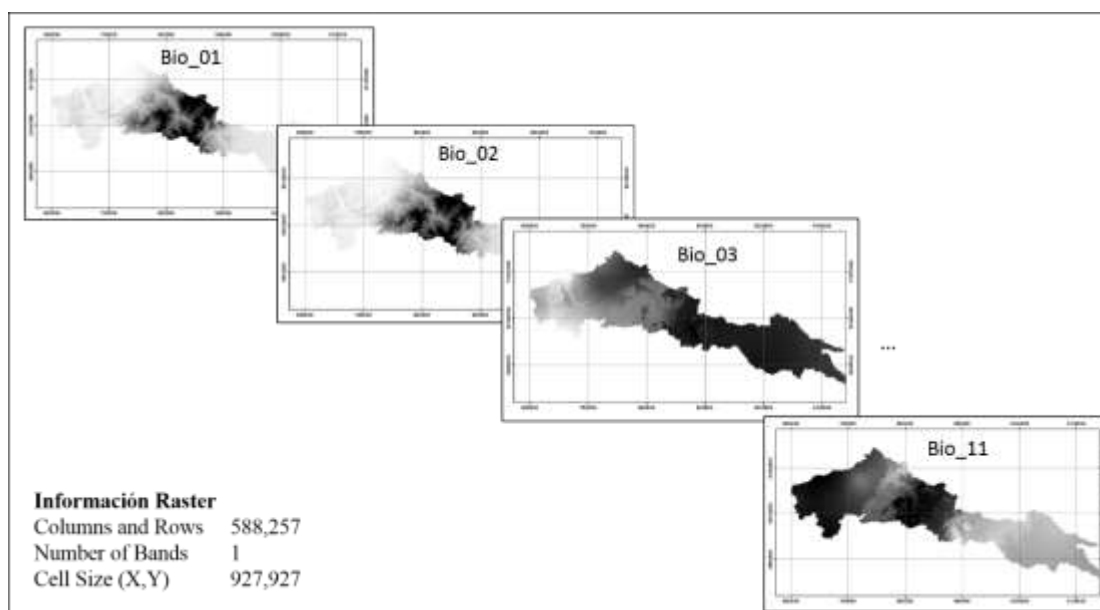


Figura 21. Variables bioclimáticas para el modelamiento del vector *Aedes aegypti*
Fuente: (WorldClim, 2016)

- **Densidad Poblacional**

El vector *Aedes aegypti* es considerado un vector directamente relacionado con la urbanización y el crecimiento poblacional ya que el mosquito se adapta en ambientes altamente urbanizados (Ver Sección 1.15), en gran parte debido a su estrategia de reproducción de explorar pequeños volúmenes de agua para el hábitat de larvas (Araujo, Carvalho, Ioshino, & Costa-da-Silva, 2015).

En este sentido, se incluye como una variable predictora a la densidad poblacional ya que se puede considerar como un indicador de la urbanización puesto que el nivel de densidad poblacional se relaciona con la cubierta de zonas de uso antrópico (Gómez & Mesa, 2017).

Las variables de densidad poblacional (The Gridded Population of the World) se obtuvo de la base de datos de SEDAC- Socioeconomic Data and Applications Center (<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>) a una resolución de 30s (1 km aproximadamente), la cual se fundamenta en el número de personas por kilómetro cuadrado basado

en los censos nacionales y los registros de la población con respecto a la distribución espacial relativa y las unidades administrativas nacionales y subnacionales (Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, 2018).

-Densidad Poblacional Actual

Para obtener la información de la densidad poblacional para el escenario actual se descargó la capa *Gridded Population of the World (GPW)* a una resolución de 30 segundos de arco para el año 2000 (año que concuerda con las variables bioclimáticas), se utilizó las máscara de la zona de estudio y se georeferenció para conseguir una capa ráster de iguales características de las variables bioclimática (igual número de filas y columnas, tamaño de la celda) (Ver Figura 22).

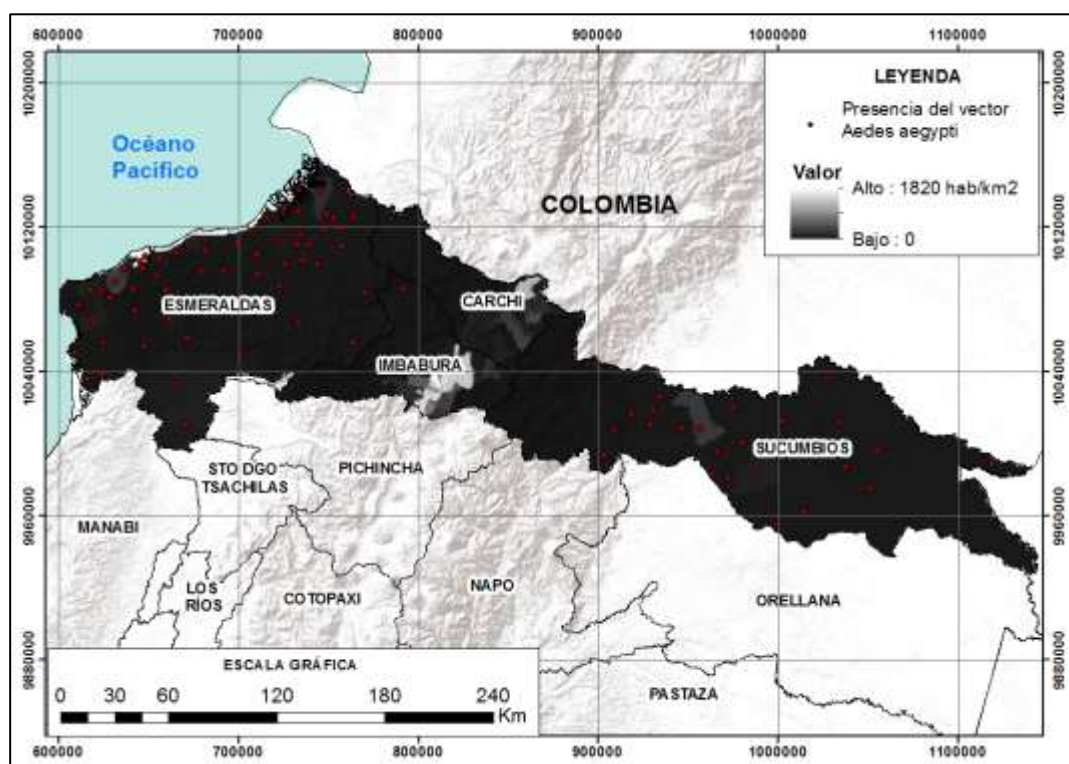


Figura 22. Variable de densidad poblacional al año 2000 (resolución de 30 s).

Fuente: (Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, 2018)

-Densidad Poblacional proyectada al año 2050

El aumento en el crecimiento poblacional se ha dado en gran parte por el aumento de la esperanza de vida de las personas e incrementos en la tasa de fecundidad, ocasionando de esta manera que los procesos de urbanización y cambios migratorios sean más evidentes (OMS, 2016).

Según los nuevos informes de las Naciones Unidas y las proyecciones a partir de la información mundial del año 2019 al 2050 la población mundial aumentará en 2 000 millones de personas y en la región de América Latina y el Caribe la tasa de aumento será alrededor de un 18% (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2019).

En este sentido, una de las variables necesarias para el modelamiento de la distribución espacial potencial del vector es la población de la zona proyectada al año 2050. Para la obtención de esta variable se utilizó la información rasterizada de la población del año 2019, la cual fue obtenida a partir del ráster del año 2010 y multiplicada por la tasa de crecimiento poblacional de la zona 1, según la información de Proyecciones Referencial de Población a nivel Cantonal –Provincial de la Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo, al año 2019 (SENPLADES, SNI, 2017).

A partir del resultado de la información ráster para el año 2019 se utilizó la herramienta *Raster Calculator* para obtener el raster de la población para el año 2050 según la tasa de crecimiento prevista por las Naciones Unidas en la Región de América Latina y el Caribe antes mencionada (Ver Figura 23).

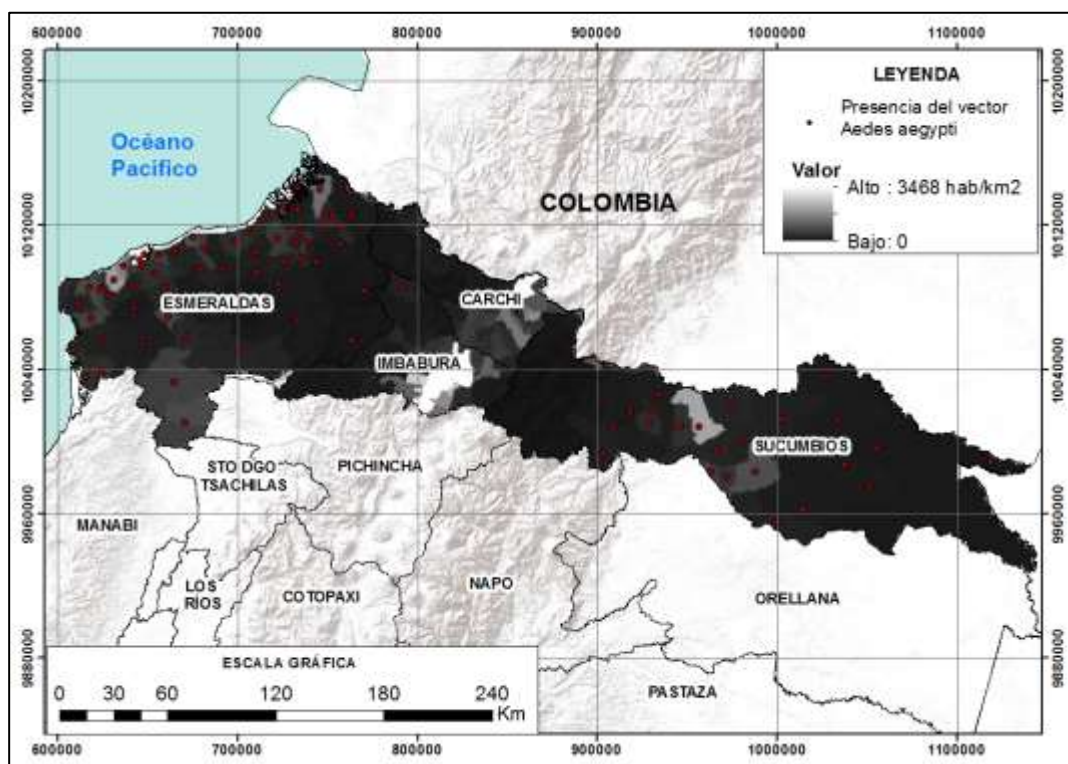


Figura 23. Variables de la densidad poblacional proyectada al año 2050 (resolución 30s).

- **Variables Geográficas**

Las variables geográficas que se utilizaron tanto para el modelo de distribución actual como para los modelos de distribución potencial futura de la especie fueron; el Modelo Digital de Elevación (DEM) y las áreas susceptibles a Inundaciones ya que la presencia de la especie está relacionada con la altitud y las áreas en donde se encuentran mayores volúmenes de agua debido a su hábitat idóneo para su reproducción.

-Áreas susceptibles a inundaciones

La información sobre las áreas susceptibles a las inundaciones forma parte de la cartografía base 1: 50 000 que se encuentra dentro del Geoportal del Sistema de Información Nacional , se extrajo de la información multiamenaza que se encuentra en formato vectorial. Para obtener la variable en formato ráster se utilizó la herramienta *Euclidean distance* de ArcGis, la cual proporciona la distancia desde cada celda hasta el origen más cercano a las áreas susceptibles a inundaciones, se delimitó a la zona de estudio usando una máscara y se definió el tamaño de celda (927 x 927) (Ver Figura 24).

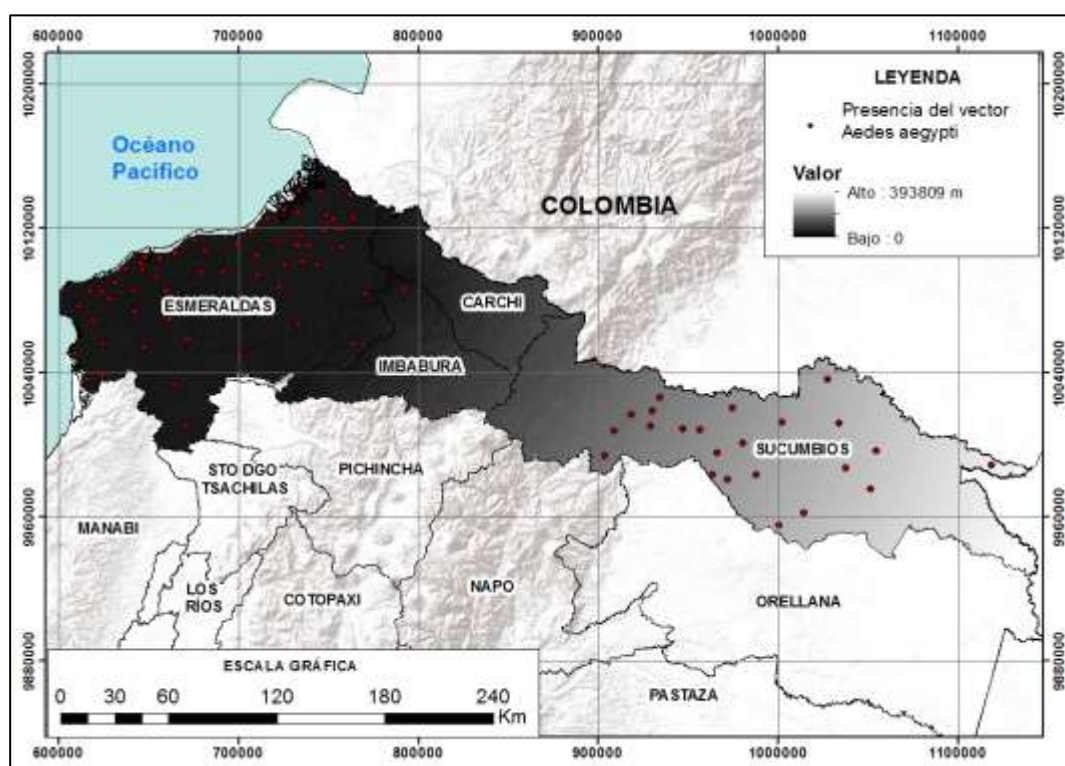


Figura 24. Variable Inundaciones para el modelamiento del vector *Aedes aegypti*

- Altitud

El modelo digital de elevación se descargó en formato (.bil), del sitio WorldClim, que a través de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM) generó un modelo digital de elevación a nivel mundial (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005). Para realizar el mismo tratamiento de las variables en formato ráster se exportó a formato GeoTiff, se delimitó a la zona de estudio y se georeferenció al Sistema de Referencia del proyecto (Ver Figura 25).

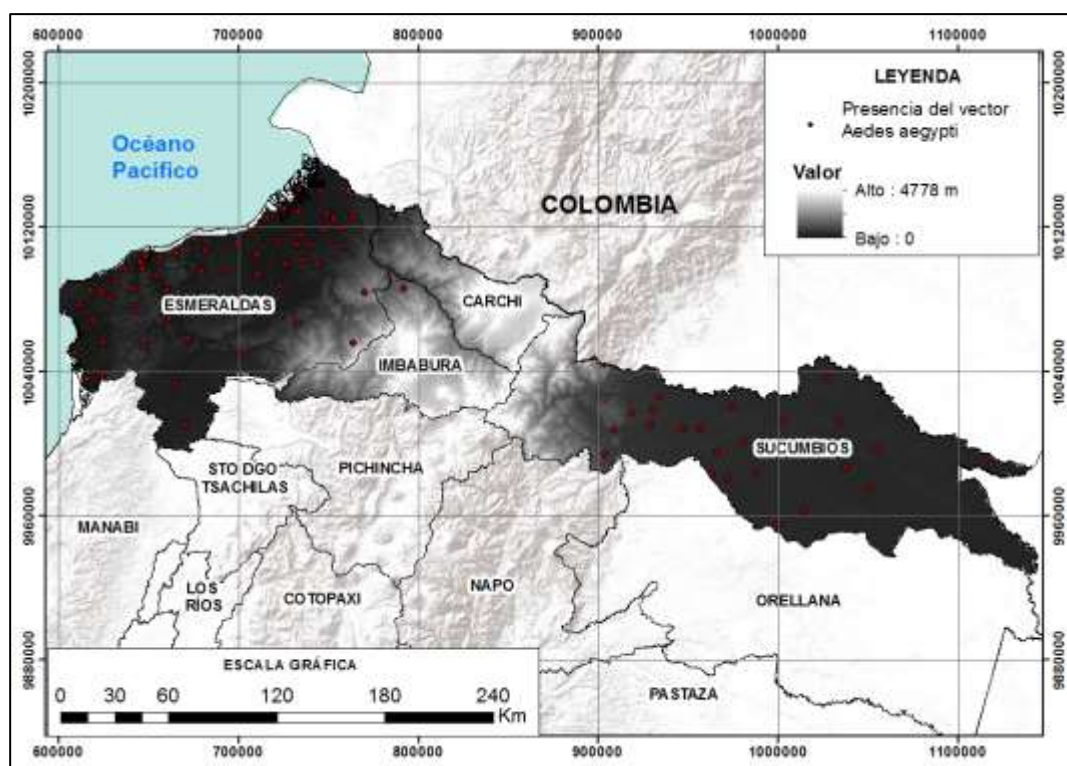


Figura 25. Variable Altitud para el modelamiento del Vector *Aedes aegypti*

Cabe recalcar que no todas las variables recopiladas aportan de la misma manera a cada modelo por lo que se podría prescindir de ellas dependiendo del análisis del estudio.

1.18.3. Datos de Prueba

Una parte importante en la modelación según Reynolds (1984) y Mitchell (1999) citados en (Barrales, Peña, & Pedro, 2004) es la validación de los modelos mediante la comparación de las

predicciones del modelo con observaciones provenientes del mundo real. En este sentido, al utilizar el software MaxEnt se puede configurar el modelamiento para que un porcentaje de los datos de presencia sean seleccionados aleatoriamente para procesarlos como datos de prueba.

En este modelamiento no se configuró con la opción de la selección aleatoria de los datos se prueba, se utilizó como datos de validación a los casos confirmados y autóctono de Dengue tanto grave como con signos de alarma registrados por el Ministerio de Salud Pública del Ecuador, para obtener las coordenadas se georeferenció asignado centroides a nivel parroquial de los casos positivos (Ver Figura 26).

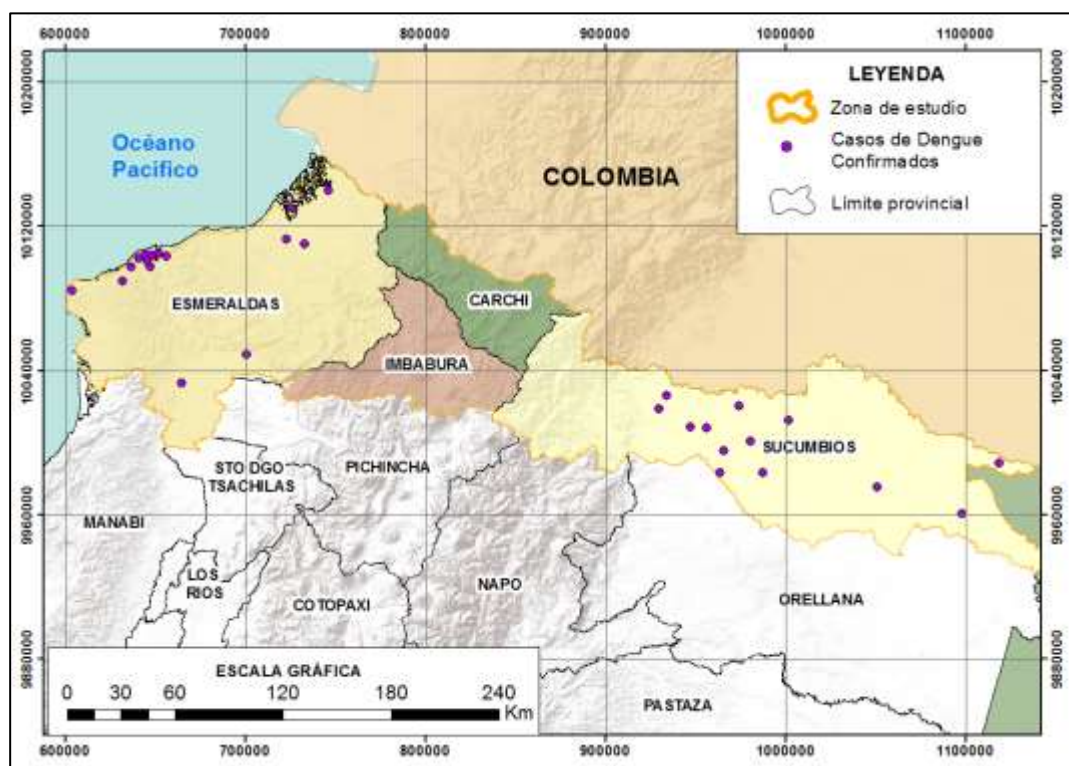


Figura 26. Datos de prueba para el modelamiento del vector *Aedes aegypti*
Fuente: (Ministerio de Salud Pública, 2019).

1.19. Normalización de las variables

La normalización de datos permite minimizar diferentes problemas debidos a la diferencia de escalas de las variables a utilizar, en el cual los valores cercanos a cero representan una baja aptitud y los cercanos a 1, una mayor probabilidad de presencia del vector. Por tal motivo se normalizó las variables de entrada mediante el uso de la ecuación establecida por (Voogd, 1983) citada en (Galacho & Arrebola, 2010):

$$X_n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde X_n es la variable normalizada, X_i es la variable, X_{min} y X_{max} representan los valores máximos de cada una de las variables.

Una vez obtenidas las capas con las mismas características y dimensiones geográficas se definieron las capas dentro de una misma escala (0,1) para cada uno de los modelos, un ejemplo de este proceso se puede observar en la siguiente figura:

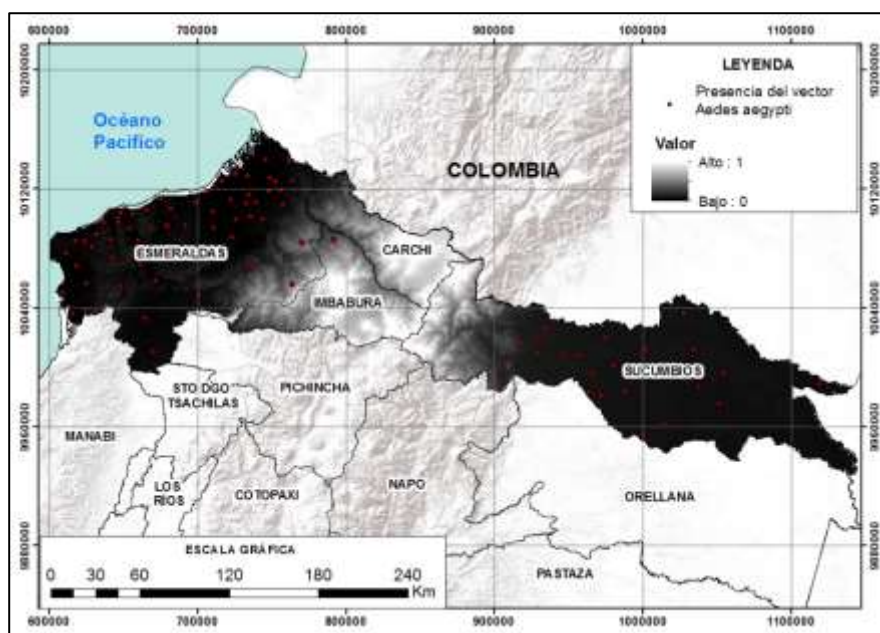


Figura 27. Normalización de las variables

1.20. Aplicación del Modelo de Distribución

En la presente investigación se aplicó la técnica de máxima entropía mediante el uso del software libre con el mismo nombre MaxEnt en la versión actual 3.4.1, el cual fue desarrollado por Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire a través de un asociación público-privada entre AMNH and AT&T-Research y disponible de manera gratuita en https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (Ver Figura 28) (Phillips, Dudík, & Schapire, 2018). MaxEnt usa una técnica de aprendizaje automático el cual genera sus propios datos de ausencia (pseudo-ausencia) denominadas “*background*”, por lo tanto el programa modela la distribución geográfica de las especies utilizando como insumo únicamente los datos de presencia y las variables independientes asociadas cada uno de los puntos de presencia.

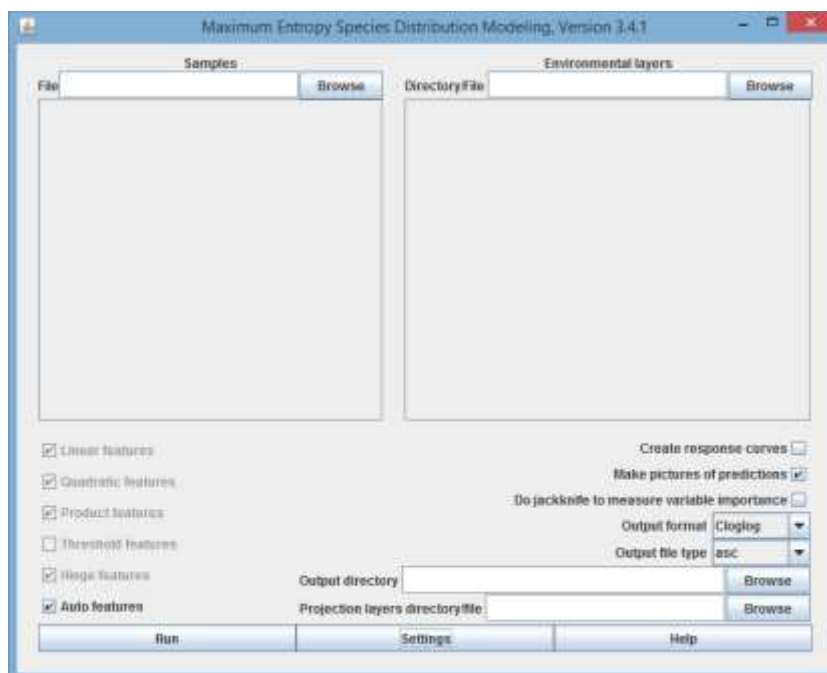


Figura 28. Interfaz del Software gratuito MaxEnt versión 3.4.1.

1.20.1. Tratamiento de las variables de entrada

Los datos de entrada referentes a los registros de presencia de la especie y los datos de prueba (casos de Dengue) deben estar en formato (.csv delimitado por coma), el cual consta de tres columnas: Nombre de la especie, coordenadas X (Este), coordenadas Y (Norte) (Ver Figura 29).

	A	
1	specie,X,Y	
2	aedes_aegypti,648290.1092,10103949.8	
3	aedes_aegypti,645656.2068,10100660.26	
4	aedes_aegypti,665397.8599,10105868.73	
5	aedes_aegypti,642206.754,10073504.4	
6	aedes_aegypti,659727.9992,10085535.06	
7	aedes_aegypti,667171.2444,10073804.59	
8	aedes_aegypti,653869.1585,10093505.28	
9	aedes_aegypti,641410.5049,10085980.76	
10	aedes_aegypti,656027.1028,10103415.53	

Figura 29. Datos de presencia del vector *Aedes aegypti* (formato csv)

La información referente a las variables predictoras, asociadas a la presencia de la especie, deben ser transformada a formato ASC, por lo tanto se convirtió el formato de las capas de .tif a .asc usando Herramienta *Translate* del software QGIS 3.6.0.

1.20.2. Modelamiento de la distribución espacial actual y futura

Para realizar el modelamiento de la distribución actual se emplearon las 19 variables bioclimáticas del periodo 1950 a 2000, las capas de densidad poblacional actual, altitud y áreas susceptibles a inundaciones y para el modelamiento de la distribución potencial futura las variables bioclimáticas proyectadas para dicho año y para cada escenario (228 capas), la densidad poblacional proyectada y las capas geográficas utilizadas en el escenario actual. Las variables fueron codificadas de la misma manera para todos los modelos como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5

Variables utilizadas para el modelamiento de la distribución actual y futura

Variables	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Promedio del Rango diario
BIO3	Isotermalidad
BIO4	Temperatura Estacional
BIO5	Máxima Temperatura del mes más caliente
BIO6	Mínima Temperatura del mes más frío
BIO7	Rango de Temperatura Anual
BIO8	Promedio de temperatura del trimestre más húmedo
BIO9	Promedio de temperatura del trimestre más seco
BIO10	Promedio de temperatura del trimestre más caliente
BIO11	Promedio de temperatura del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Precipitación estacional (Coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más caliente
BIO19	Precipitación del trimestre más frío
GPW	Densidad poblacional
DEM	Altitud
INUN	Zonas susceptibles a inundaciones

Fuente: (WorldClim, 2016), (Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, 2018).

Al obtener todas las variables en los formatos requeridos por software se procede a ingresar los datos y definir si las variables son categóricas o continuas, en este caso de estudio se establecieron a todas las variables como continuas.

En la opción de “*Settings*” se ingresa los datos de prueba en la sección “*Test simple file*” para de esta manera caracterizar el rendimiento del modelo, las configuraciones utilizadas para la generación del modelo se pueden observar en la Figura 30.

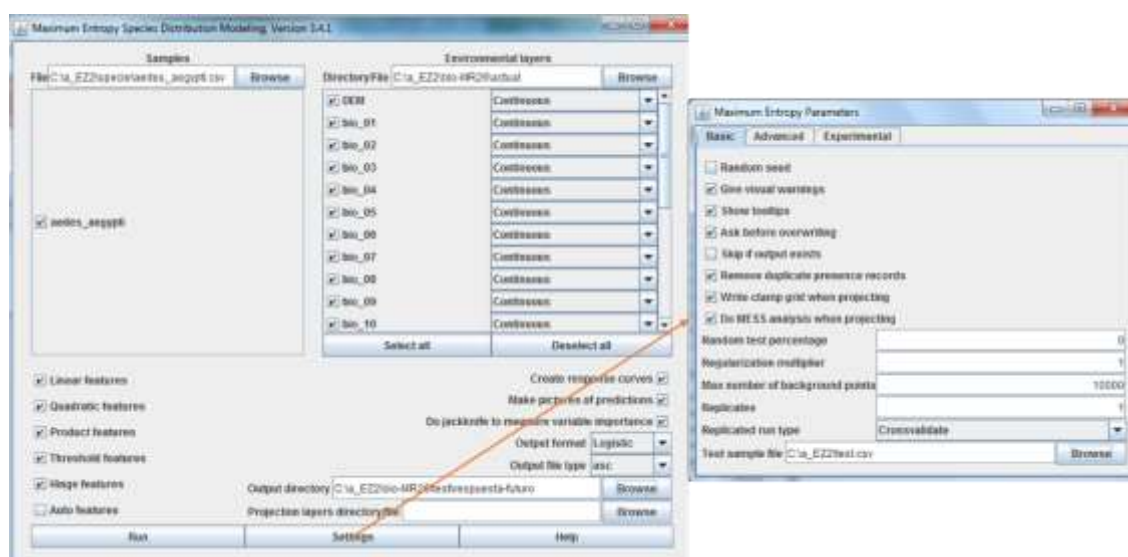


Figura 30. Configuración MaxEnt

Una vez terminado el procesamiento se generan archivos en formatos .asc y .csv que contienen los resultados del modelamiento, una serie de estadísticos de validación y un archivo principal .html que contiene información resumida del análisis del modelo en función de las variables utilizadas. Entre la información que se puede observar en el archivo se encuentra la gráfica de omisión, la caracterización del rendimiento a través de la Curva de ROC, los resultados de los test binomiales de omisión y dependiendo de las configuraciones; las curvas de respuesta, el análisis de la contribución de las variables en el modelo, y los resultados de “*Jackknife test*”, entre otros.

1.21. Evaluación de los modelos de distribución

Los modelos generados fueron analizados en función de los resultados de las pruebas omisión, de la curva de ROC y el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés). El análisis de las diferentes métricas mencionadas fue realizado para poder comparar y seleccionar un modelo por cada escenario de emisión.

1.21.1. Análisis curva ROC

Para caracterizar el rendimiento de los modelos se analizaron los datos de la Curva de ROC (Ver Figura 31) tanto para los datos de entrenamiento (curva color rojo) como para los de prueba (curva color azul) que indica el grado de ajuste del modelo a los datos de prueba que en este caso son los registro de dengue confirmado a nivel parroquial.

Para comprar el resultado del rendimiento predictivo del rango de los umbrales de los modelos generados, se consideró el área bajo la curva ROC (AUC) de los datos de entrenamiento y de prueba para poder determinar el mejor modelo de cada escenario.

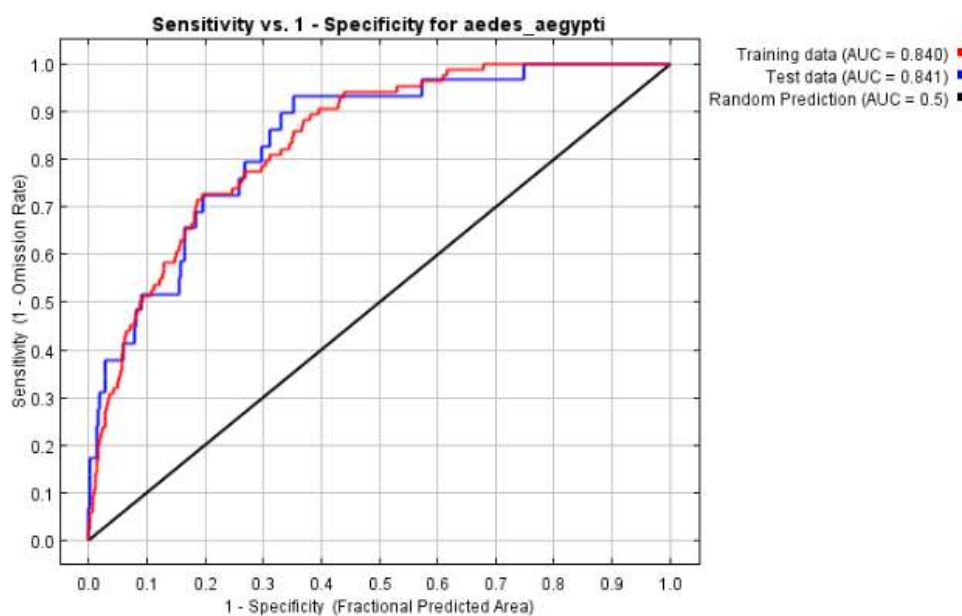


Figura 31. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic analysis)

1.21.2. Análisis de la tasa de omisión

Los resultados de los 11 test de la tasa omisión se puede observar en el archivo .html donde se muestra una gráfica de la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulativo (Ver Figura 32).

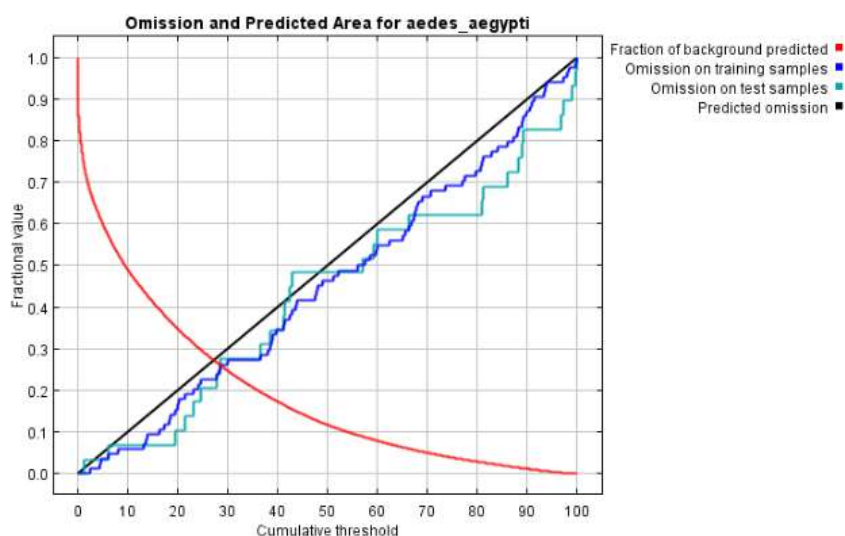


Figura 32. Tasa de omisión en función del umbral acumulativo.

1.22. Selección de los modelos

Para seleccionar los modelos de mejor rendimiento, se dividió en cada uno de los escenarios de las emisiones: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 para de esta manera comparar los valores de AUC y de la tasa de omisión entre los tres modelos (GCM): GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR.

Se seleccionó los modelos con los valores más cercado a 1 por ser más consistentes (Peterson, Papes, & Soberón, 2008) y se consideró como modelos de mejor rendimiento a los que tiene los valores más cercanos a cero de las pruebas binomiales de omisión, ya que para considerar un modelación admisible se requiere el valor de $p < 0.01$ (Ramos et al., 2018).

1.23. Comparación de los modelos de distribución

Una vez seleccionados los modelos por cada escenario de emisión se realizó la comparación de los cambios de la probabilidad de presencia con el modelo del escenario actual. Se transformó los resultados del modelo (format .asc) a formato .tif para poder emplear las herramientas raster de los Sistemas de información Geográfica (SIG).

Se obtuvo un raster de diferencia entre el modelo actual y los resultados de los modelos futuros y se los reclasificó para poder identificar las zonas en las que se mantiene una igual probabilidad, aumento de probabilidad y disminución de la probabilidad de presencia del vector *Aedes aegypti* (Ver Figura 33).

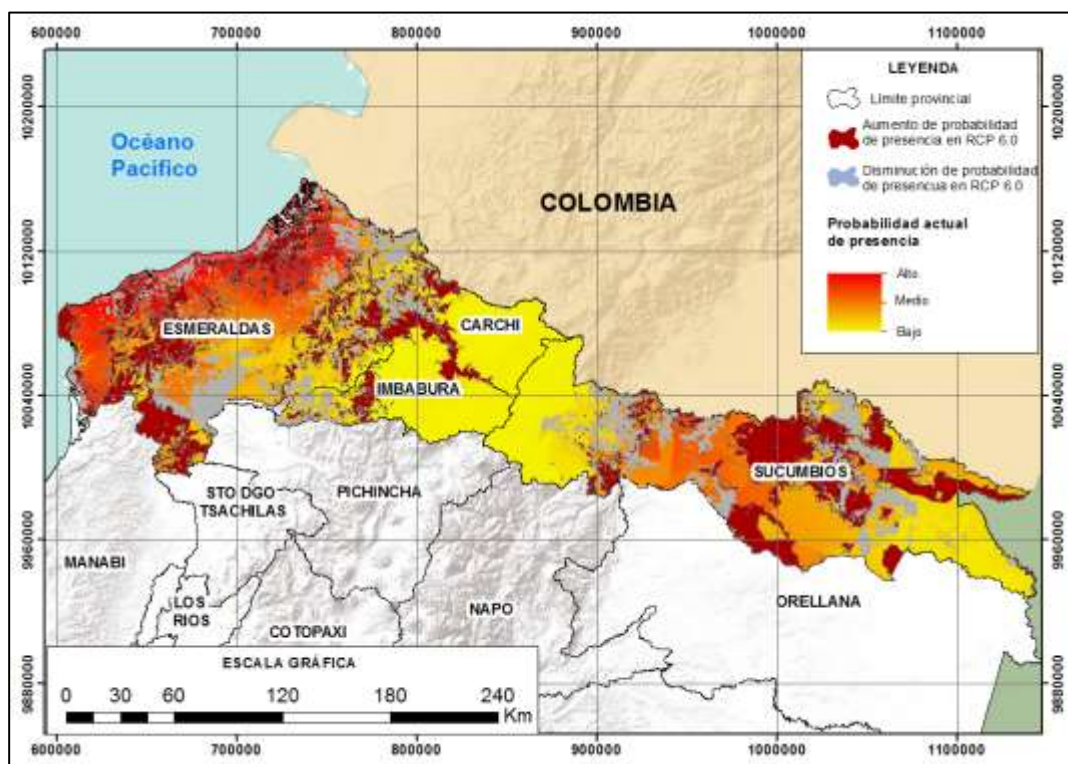


Figura 33. Comparación del escenario actual con escenarios futuros.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se describen los resultados que se obtuvieron en cada una de las fases realizadas en la metodología para la obtención de los distintos modelos de distribución actual y potenciales para el año 2050 en los diferentes escenarios de emisión. De los 3 modelos realizados por cada Trayectorias de concentración representativas (RCP) se seleccionó el modelamiento con los mejores rendimientos según los estadísticos resultantes de las pruebas omisión, de la curva de ROC y el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés). Además se obtuvieron los resultados de la comparación entre el escenario actual de distribución y los modelos futuros en los cuales se incluyen la evaluación del porcentaje de las áreas en donde la probabilidad de presencia del vector *Aedes aegypti* ha aumentado, disminuido y se ha mantenido estable.

4.1. Bases de Datos y selección de variables

Posterior a la depuración de los datos de presencia obtenidos a través de los registros de los índices aédicos recolectados por el Ministerio de Salud Pública, se obtuvieron 84 puntos de presencia a nivel parroquial en la Zona de Planificación 1 (Ver Figura 20), de los cuales en su totalidad se los emplearon como datos de entrenamiento para la modelación y de los casos autóctonos confirmados de Dengue, utilizados para la validación dentro del mismo programa, se obtuvieron 29 registros que son equivalentes al 35% de los datos de entrenamiento (Ver Figura 26).

Se realizó el procesamiento de 250 capas en total para realizar el modelamiento de la distribución actual y el modelamiento futuro para cada escenario de emisión (Ver Sección 1.20.2),

para cada modelamiento de utilizó 22 variables las cuales fueron codificadas de la misma manera como se detalla en la Tabla 5.

4.2. Evaluación del Modelo de Distribución Actual

Al realizar el modelamiento de las 22 variables: 19 bioclimáticas, densidad poblacional actual, áreas susceptibles a inundaciones y altitud, se observó que la tasa de omisión en los registros de presencia de entrenamiento y de prueba, y el área predicha en función del umbral acumulativo, son cercanas y presentan una tendencia hacia la línea recta de omisión prevista (Ver Figura 34)

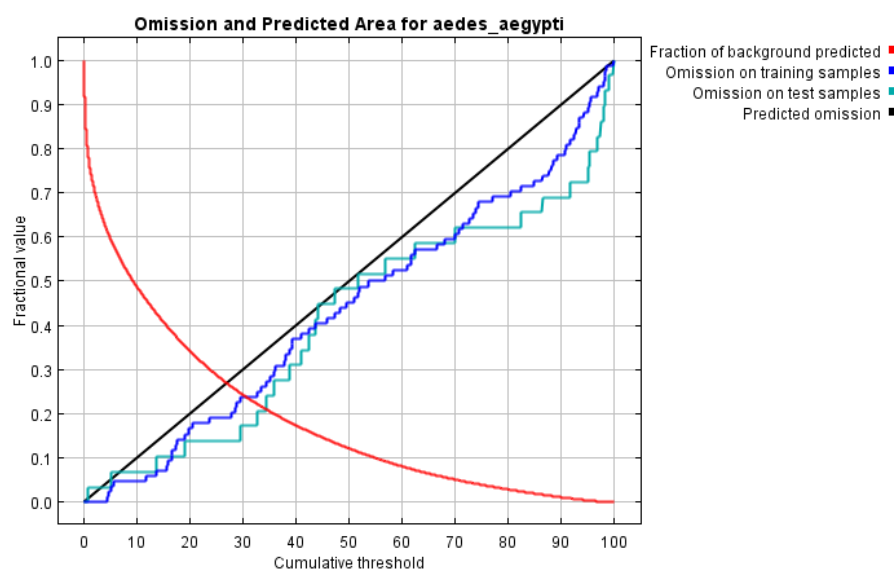


Figura 34. Análisis de omisión/comisión para la modelación de la distribución actual.

Los resultados de la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) indicaron que el modelo es adecuado, ya que el valor del cálculo del área bajo la curva (AUC) es de 0.848 (Ver sección 1.11.2) para los datos de entrenamiento (línea roja) y los datos de prueba (línea azul).

Como se puede observar en la Figura 35 los resultados están orientados a la parte superior izquierda y las curvas se encuentran cercanas entre ellas por lo tanto se tuvo un buen ajuste del modelo (Ver sección 1.11.2),

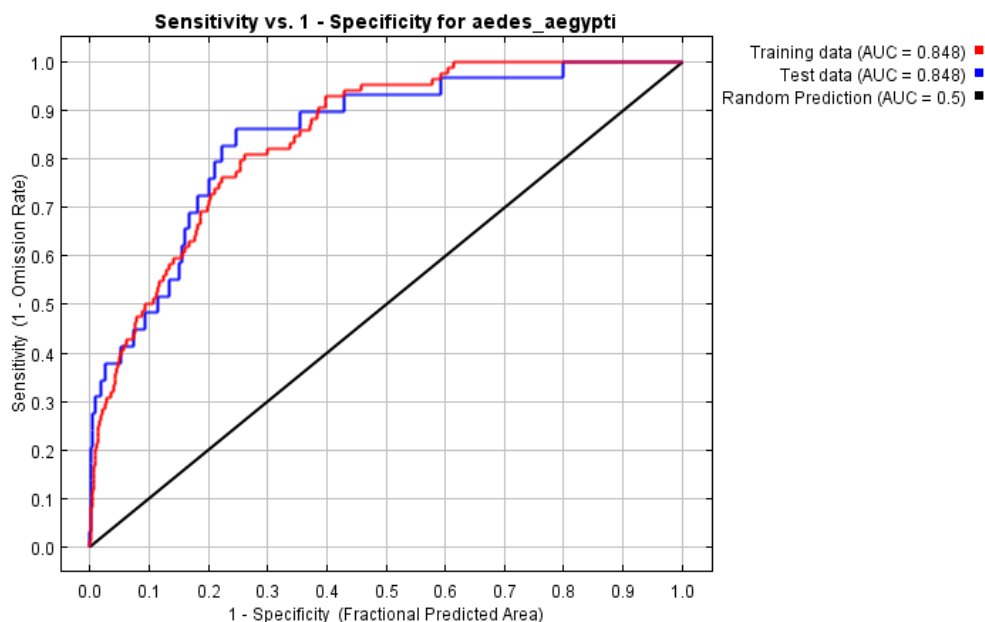


Figura 35. Curva Operacional (ROC) para la distribución espacial actual del vector.

Al analizar la significancia estadística de predicción a través de los 11 test de la prueba binomial de omisión (Ver Tabla 6) se obtiene que todos son significativos ($p < 0.01$) lo que indica que el modelo generado tiene un buen rendimiento predictivo (Ver Sección 1.21.2)

Tabla 6

Pruebas binomiales para la MDE actual de vector Aedes aegypti.

Umbral acumulativo	Umbral logístico	Descripción	Área predicha fraccional	Tasa de omisión de entrenamiento	Tasa de omisión de prueba	Valor de p
1	0.055	Valor acumulado fijo 1	0.765	0	0.034	<0.01
5	0.152	Valor acumulado fijo 5	0.595	0.024	0.034	<0.01
10	0.219	Valor acumulado fijo 10	0.487	0.048	0.069	<0.01
4.34	0.14	Presencia mínima de formación	0.615	0	0.034	<0.01
16.599	0.266	10 percentil de presencia en el entrenamiento	0.385	0.095	0.103	<0.01
30.64	0.387	Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	0.238	0.238	0.172	<0.01
27.828	0.359	Sensibilidad máxima de entrenamiento más especificidad	0.262	0.19	0.138	<0.01

34.324	0.413	Sensibilidad y especificidad de prueba iguales	0.211	0.262	0.207	<0.01
29.525	0.376	Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	0.247	0.226	0.138	<0.01
4.34	0.14	Equilibrar la omisión del entrenamiento, el área prevista y el valor umbral	0.615	0	0.034	<0.01
9.56	0.214	Equivale a la entropía de las distribuciones umbral y original	0.495	0.048	0.069	<0.01

Bajo la condiciones climáticas y geográficas se puede observar en la Figura 36 que la mayor parte de la zona tiende a ser adecuado para la presencia larval de *Aedes aegypti* con una notable excepción de la zona de la Cordillera de los Andes (zonas de alta elevación) y una porción en la parte occidental del país el cual está relacionado con los afluentes del río Amazonas. La distribución geográfica actual refleja resultados congruentes con el mapa de riesgo de Transmisión de Arbovirus por *Aedes aegypti*- Vector del Dengue, Chikungunya y Zika (INSPI, 2016) en el cual se observa un riesgo bajo para las poblaciones asentadas en zonas altas.

Se evidencia en la misma figura que el riesgo de exposición en zona amazónica es notable sobre todo debido a al bajo nivel altitudinal, sin embargo la presencia se diferencia considerablemente de la zona costera. Un estudio realizado por (Espinoza et al., 2010) sobre la variabilidad espaciotemporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional, puede sugerir una explicación a la diferenciación de la presencia de la especie entre las zonas, la cual puede estar relacionada con las discrepancias en la precipitación en parte de la Amazonía.

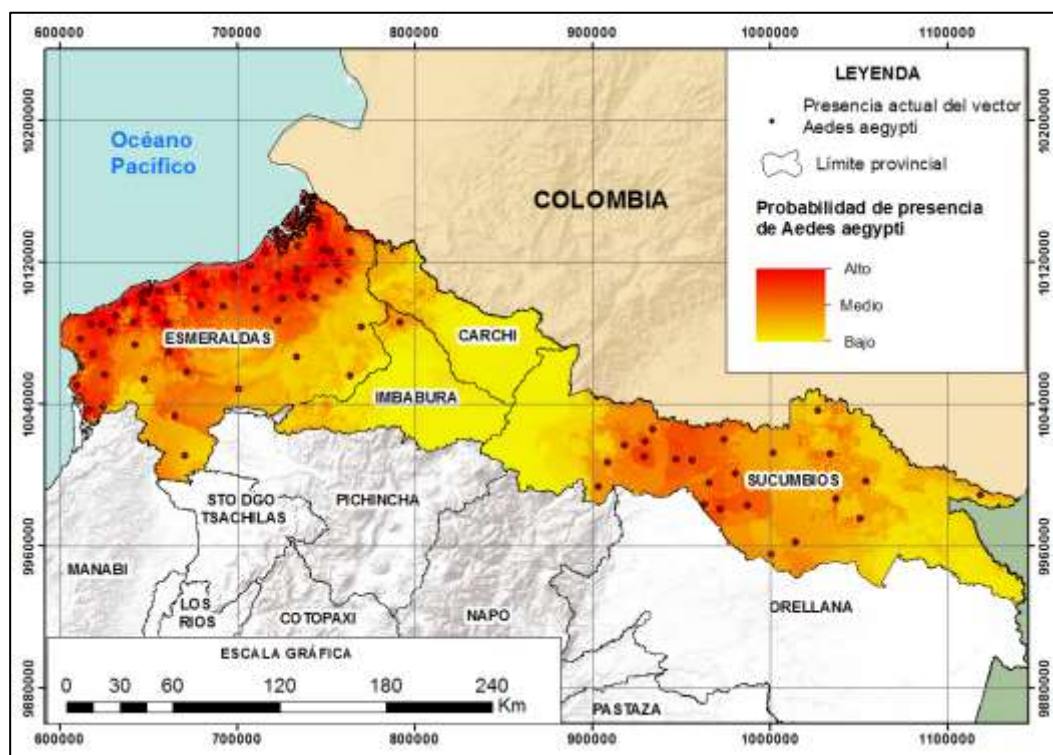


Figura 36. Distribución espacial actual del Vector *Aedes aegypti*

4.3. Evaluación y Selección de los Modelos de distribución futura

Al realizar el análisis de los resultados de la aplicación de la técnica Receiver Operating Characteristics (ROC) y la validación de la significancia estadística de predicción mediante la prueba binomial de omisión para los modelos generados, indicaron que los modelos son adecuados ya que se obtuvieron cálculos de AUC mayores a 0.8, tanto para datos de entrenamiento como los de prueba, y los valores de p (11 test binomiales) menores a 0.01 (Ver Sección 1.21).

Los tres modelos generados para el escenario de emisión RCP 2.6 indicaron un ajuste adecuado dentro de la capacidad predictiva de acuerdo a los resultados de la prueba de ROC, ya que el valor de AUC para los datos de entrenamiento (líneas rojas) y para los datos de prueba (líneas azules)

tienden al lado superior izquierdo y se encuentran cercanas indicando un mejor ajuste (Ver Figura 37).

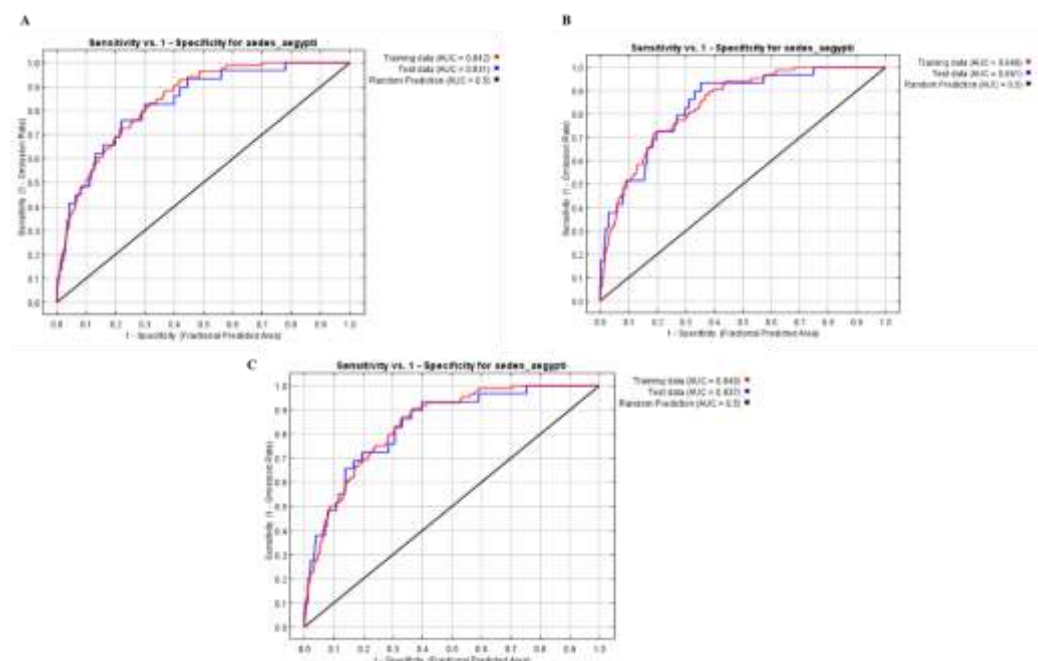


Figura 37. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 2.6
A) GCM: GISS-E2-R B) GCM: MIROC-ESM C) IPSL-CM5A-LR

Los valores de AUC para el escenario de emisión de RCP 2.6 se pueden observar en la Tabla 7, teniendo un mayor valor con los datos de entrenamiento obtenidos del Modelo Global Climático (GCM) GISS-E2-R y el AUC de los datos de prueba mayor con el modelo MIROC-ESM, el valor más bajo del promedio de los test binomiales es del modelo MIROC-ESM.

Al considerar el criterio del área bajo la curva y el valor de p de omisión se obtuvo como mejor modelo con capacidad predictiva a MIROC-ESM con un AUC de 0.840 y un promedio de omisión de 0.00019 como se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7

Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 2.6

RCP 2.6			
GCM	AUC Training data	AUC Test data	Avg. Omission
GISS-E2-R	0.842	0.831	0.00064916
MIROC-ESM	0.84	0.841	0.00019530
IPSL-CM5A-LR	0.84	0.837	0.07195800

Con respecto a los resultados obtenidos en los en la curva de ROC en los modelos del escenario de emisión RCP 4.5 se observa una buena eficiencia de los modelos generados (Ver Figura 38), visualmente se puede observar en la Figura 38C que las líneas que se encuentran más juntas y con una misma tendencia por lo que se obtienen valores iguales de AUC para los datos de entrenamiento y de prueba tal y como se corrobora en la Tabla 8.

Sin embargo, el modelo con mejores valores dentro de los criterios de evaluación es MIROC-ESM con valores de AUC de 0.834 para los datos de entrenamiento y de prueba y promedio de los test binominales de 0.00100294 (Ver Tabla 8)

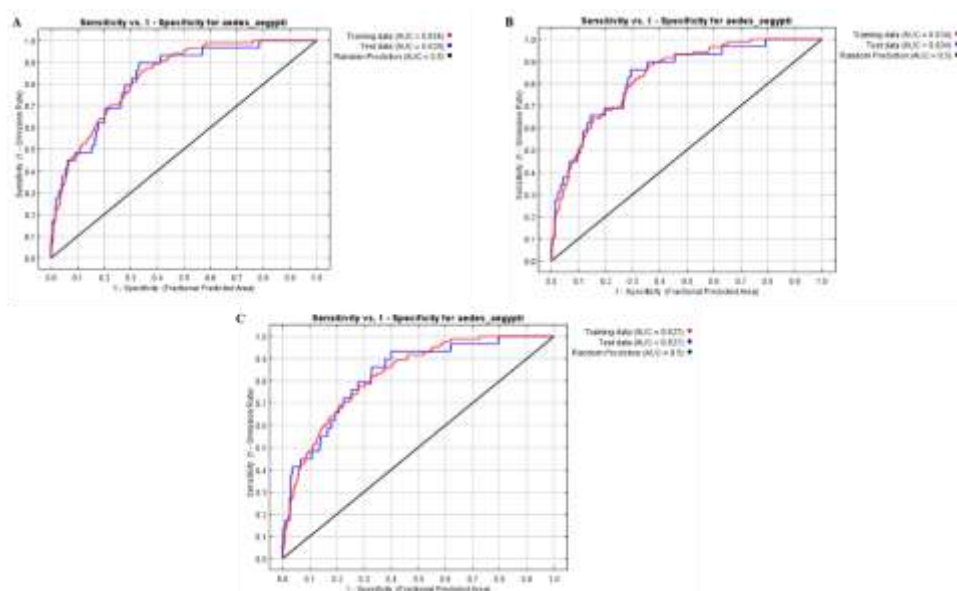


Figura 38. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 4.5
B) GCM: GISS-E2-R B) GCM: MIROC-ESM C) IPSL-CM5A-LR

Tabla 8*Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 4.5*

RCP 4.5			
GCM	AUC Training data	AUC Test data	Avg. Omission
GISS-E2-R	0.834	0.828	0.00108749
MIROC-ESM	0.834	0.834	0.00100294
IPSL-CM5A-LR	0.827	0.827	0.00087342

En los modelos generados para la Trayectoria de Concentración Representativa 6.0 se obtuvo mayores valores con las proyecciones basadas en el GCM: GISS-E2-R que tiene resultados de AUC de datos de entrenamiento y prueba de 0.845 y 0.835 respectivamente. Además, es el modelo con menor valor de p relacionado con el promedio de los test binomiales de omisión lo que indica un mejor rendimiento entre los tres modelos generados (Ver Tabla 9).

Tabla 9*Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 6.0*

RCP 6.0			
GCM	AUC Training data	AUC Test data	Avg. Omission
GISS-E2-R	0.845	0.835	0.00033696
MIROC-ESM	0.837	0.84	0.00039320
IPSL-CM5A-LR	0.83	0.834	0.00084830

Visualmente se puede observar en la curva de ROC (Figura 39) el comportamiento de los datos de prueba y entrenamiento.

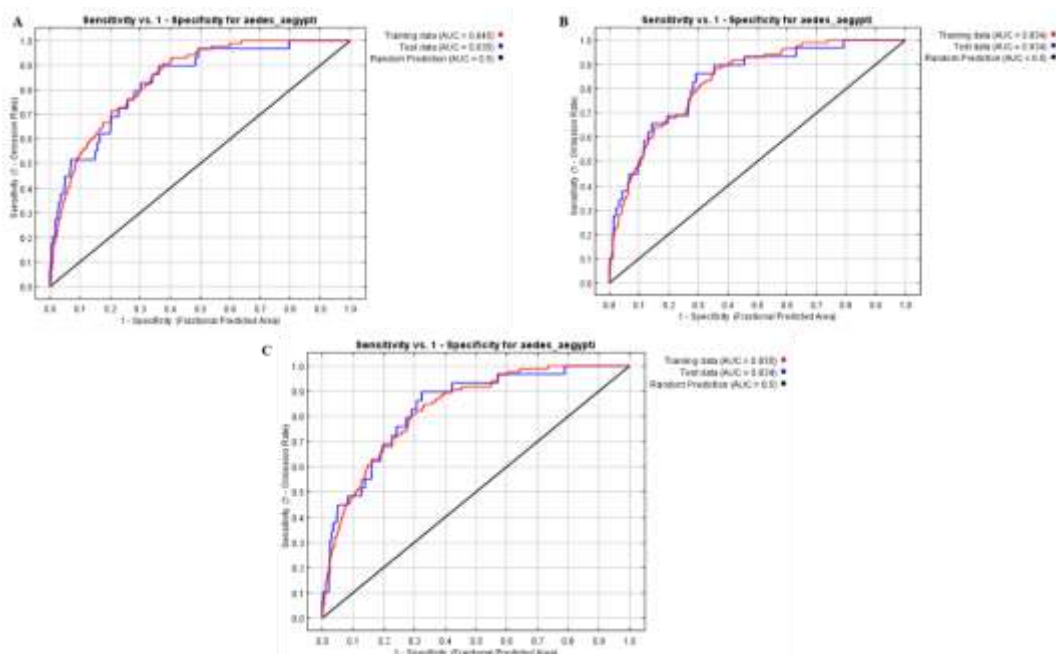


Figura 39. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 6.0
 C) GCM: GISS-E2-R B) GCM: MIROC-ESM C) IPSL-CM5A-LR

Para el escenario de emisión referente a la trayectoria de concentración representativa 8.5 se seleccionó al modelo generado con las variables del GCM- IPSL-CM5A-LR, debido a que tiene el menor promedio de los test binomiales de omisión y a pesar de que el modelo de MIROC-ESM tiene un mayor valor de AUC para los datos de entrenamiento el promedio de omisión es mayor al de IPSL-CM5A y el valor de AUC varía con únicamente con 0.003 (Ver Tabla 10).

Tabla 10

Valores de AUC y promedio de test de omisión para RCP 8.5

RCP 8.5			
GCM	AUC Training data	AUC Test data	Avg. Omission
GISS-E2-R	0.823	0.833	0.00058264
MIROC-ESM	0.836	0.83	0.00051679
IPSL-CM5A-LR	0.833	0.831	0.00037910

Visualmente en la Figura 40 se puede observar que todos los modelos generados y analizados según la curva de ROC.

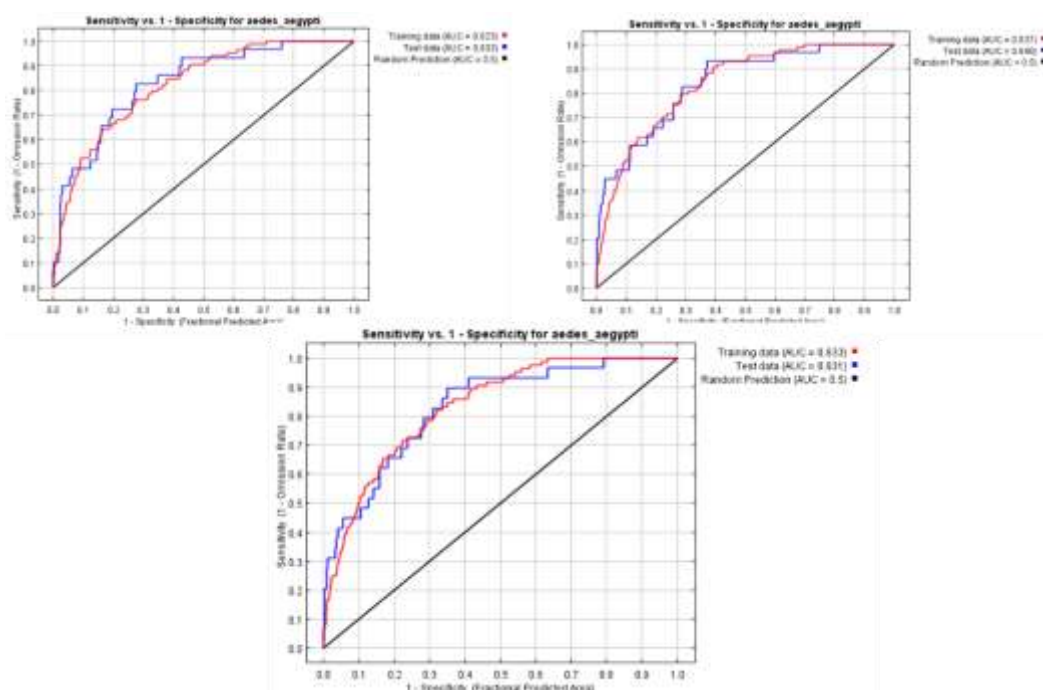


Figura 40. Curvas Operacionales ROC para escenario de emisión RCP 8.5
D) GCM: GISS-E2-R B) GCM: MIROC-ESM C) IPSL-CM5A-LR

En la Tabla 11 se resume los modelos seleccionados que muestran una mejor eficiencia según los criterios de validación para predecir la distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* y que serán comparados con las condiciones actuales de la distribución espacial de la especie para determinar áreas de aumento y disminución de la probabilidad de presencia.

Tabla 11

Modelos seleccionados para la MDE futura del vector Aedes aegypti.

RCP	GCM
2.6	MIROC-ESM
4.5	MIROC-ESM
6.0	GISS-E2-R
8.5	IPSL-CM5A-LR

Como resultado de los modelos generados a partir de proyecciones de 3 GCM para los diferentes escenarios de emisión se evidenció que la probabilidad de presencia del vector *Aedes aegypti* se

mantiene en la zona costera para todos los escenarios, una baja probabilidad en zona de elevaciones altas con aumentos en las estribaciones de la Cordillera (Ver Figuras 41-44). Se evidencian diferencias en la zona oriental ya que en los escenarios RCP 6.0 (Ver Figura 43) y RCP 8.5 (Ver Figura 44) donde se proyecta una disminución de la presencia del vector.

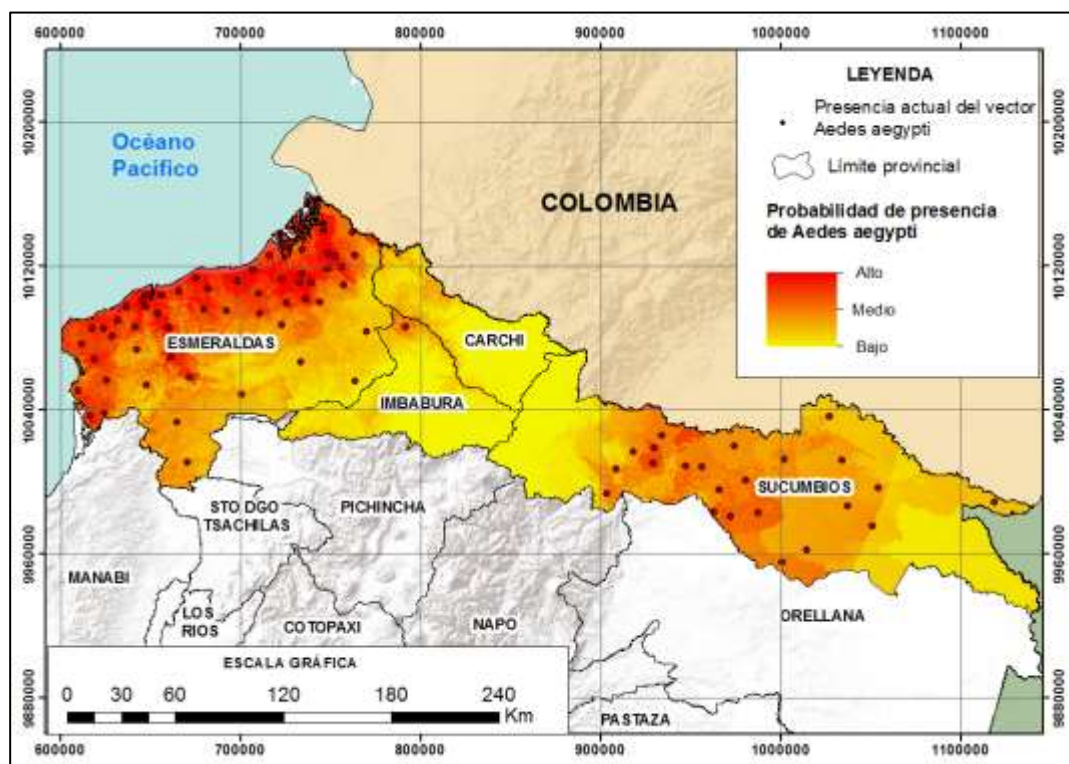


Figura 41. Distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* RCP 2.6

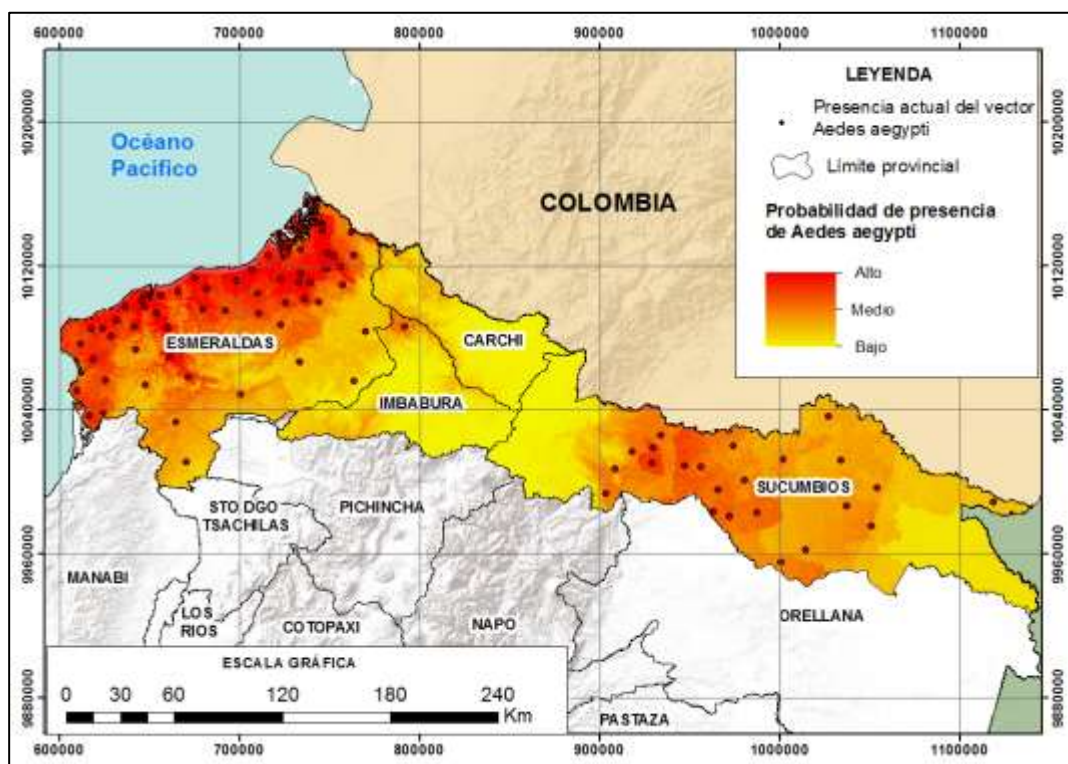


Figura 42. Distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* RCP 4.5

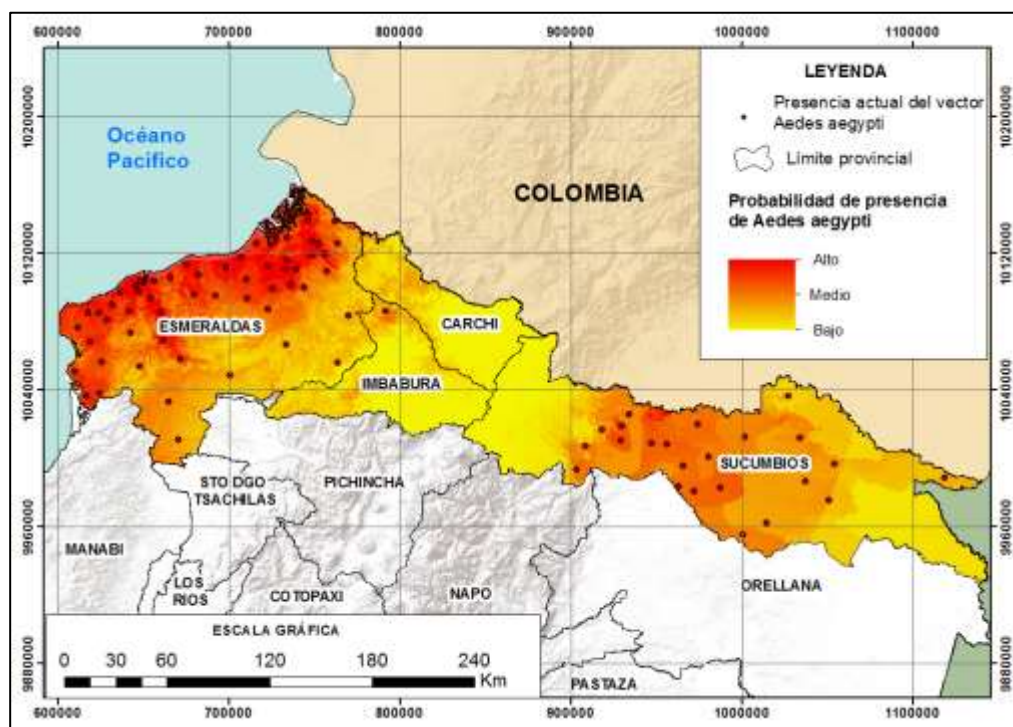


Figura 43. Distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* RCP 6.0

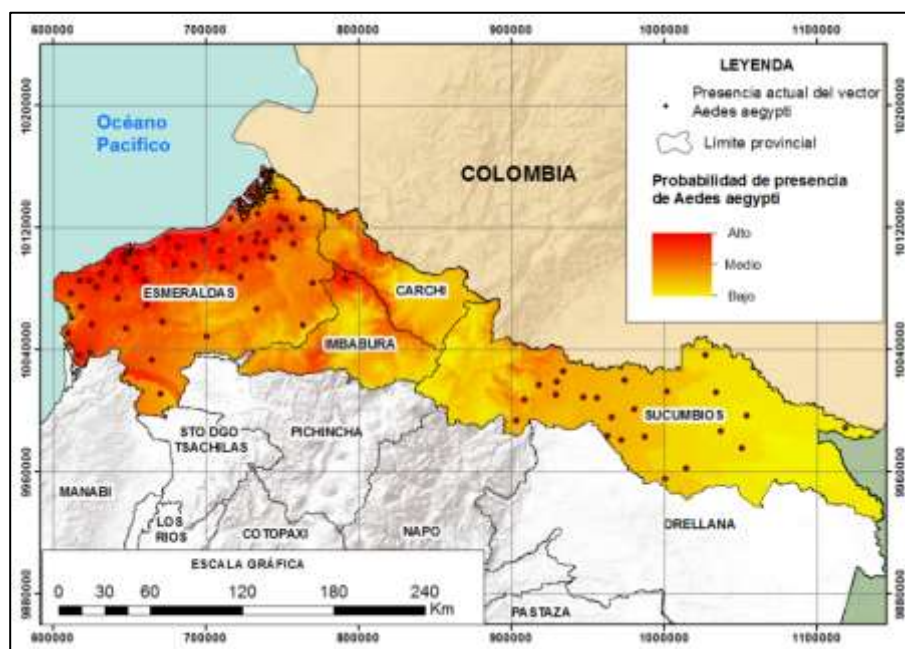


Figura 44. Distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* RCP 8.5

4.4. Comparación de los escenarios de distribución potencial futura con la actual

Al comparar las diferencias entre la probabilidad de presencia actual con los modelamientos generados para proyectar los posibles rangos de distribución de la especie se evidenció que en la mayor parte de la zona y de los escenarios permanece estable (Ver Figuras 46-48) a excepción del escenario RCP 8.5 (Ver **Figura 48**) en donde el porcentaje de cambio es mayor al de los demás escenarios diferenciándose con mayor porcentaje en la disminución de la probabilidad de presencia en la zona oriental del área de estudio el cual se refiere a la provincia de Sucumbios (Ver Tabla 12).

Tabla 12

Comparación de la probabilidad de presencia actual con la futura

RCP	Porcentaje		
	Aumento	Estable	Disminución
2.6	20%	69%	11%
4.5	21%	64%	15%
6.0	23%	62%	15%
8.5	25%	48%	27%

Los modelos generados a partir de los escenarios de cambio climático siguen el aumento de la probabilidad de presencia en las estribaciones de la Cordillera, los cuales muestran una expansión de la especie a mayores altitudes por lo que esta zona puede estar sujeta a la exposición del mosquito y podría representar una preocupación dentro de la salud pública y la vigilancia epidemiológica relacionada con las enfermedades transmitidas por el vector (Ver Figuras 46-49). En contraste con las zonas de altas elevaciones en la Amazonía se predice una disminución de la probabilidad, lo cual puede estar relacionado con la pérdida de variabilidad en la precipitación en la cuenca del Amazonas según el estudio realizado por (Sprackeln & Garcia-Carreras, 2015).

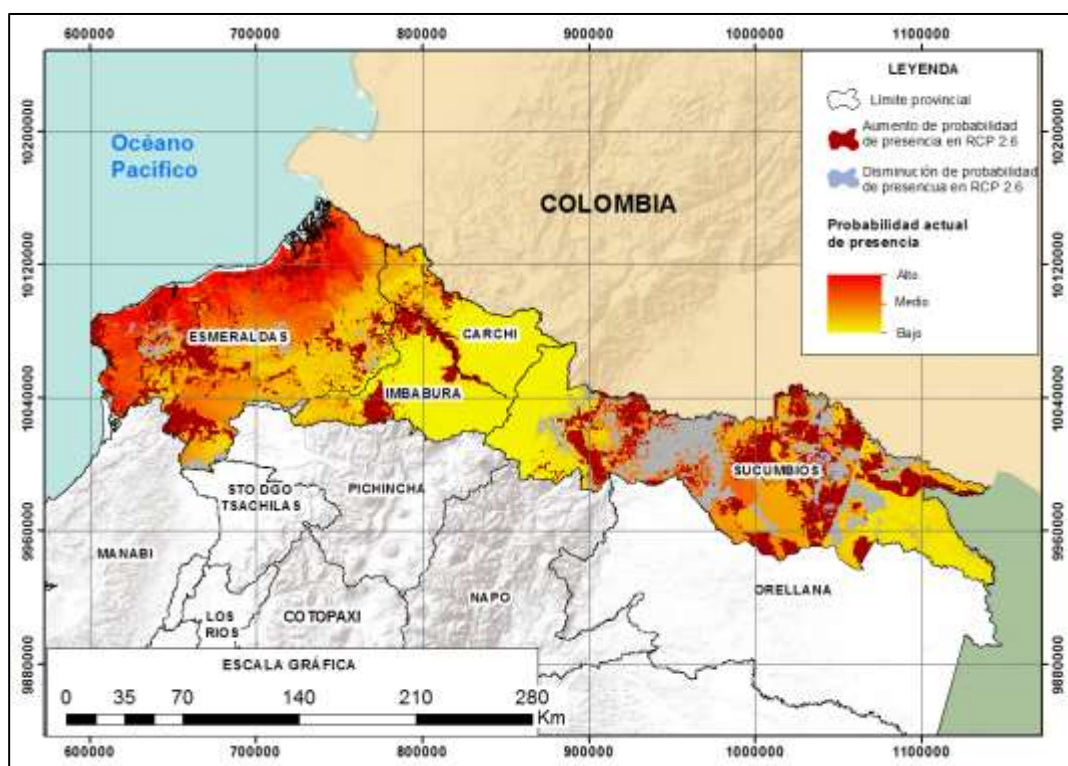


Figura 45. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 2.6

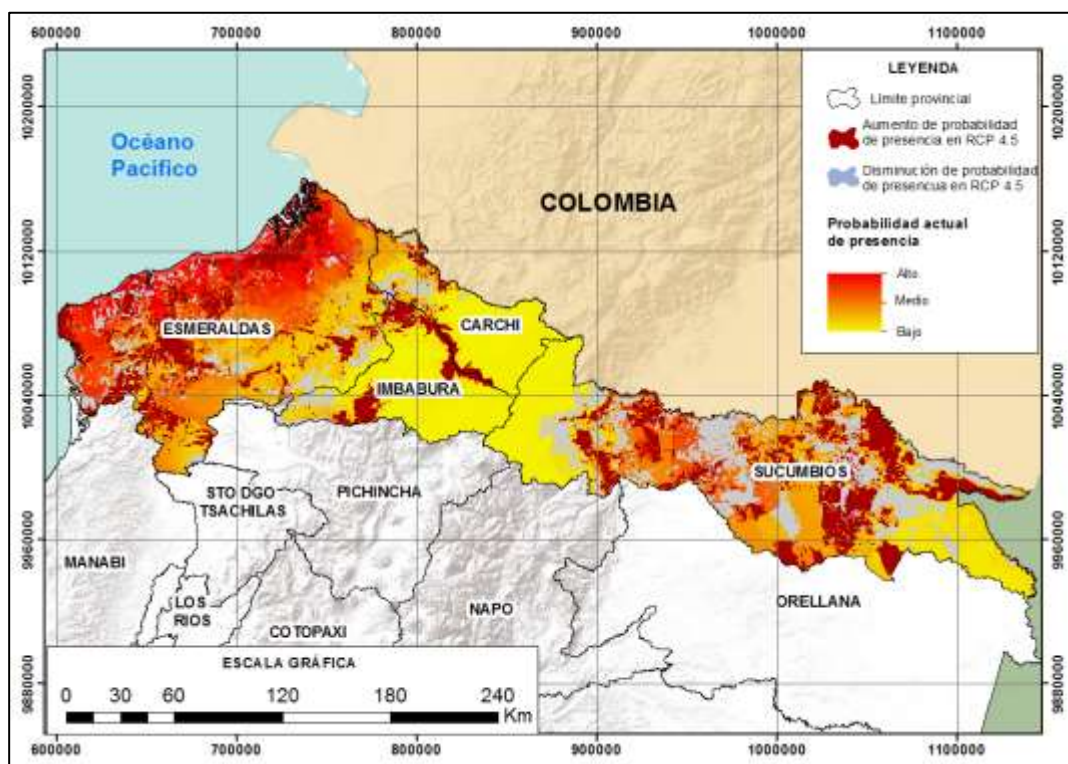


Figura 46. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 4.5

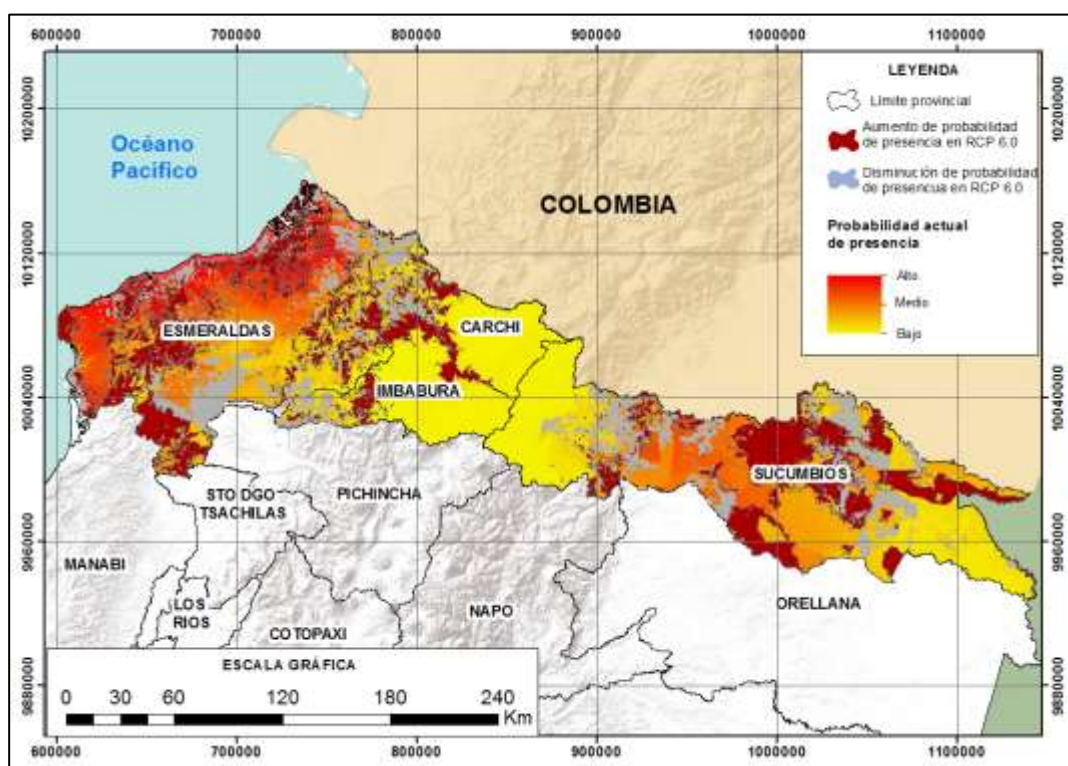


Figura 47. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 6.0

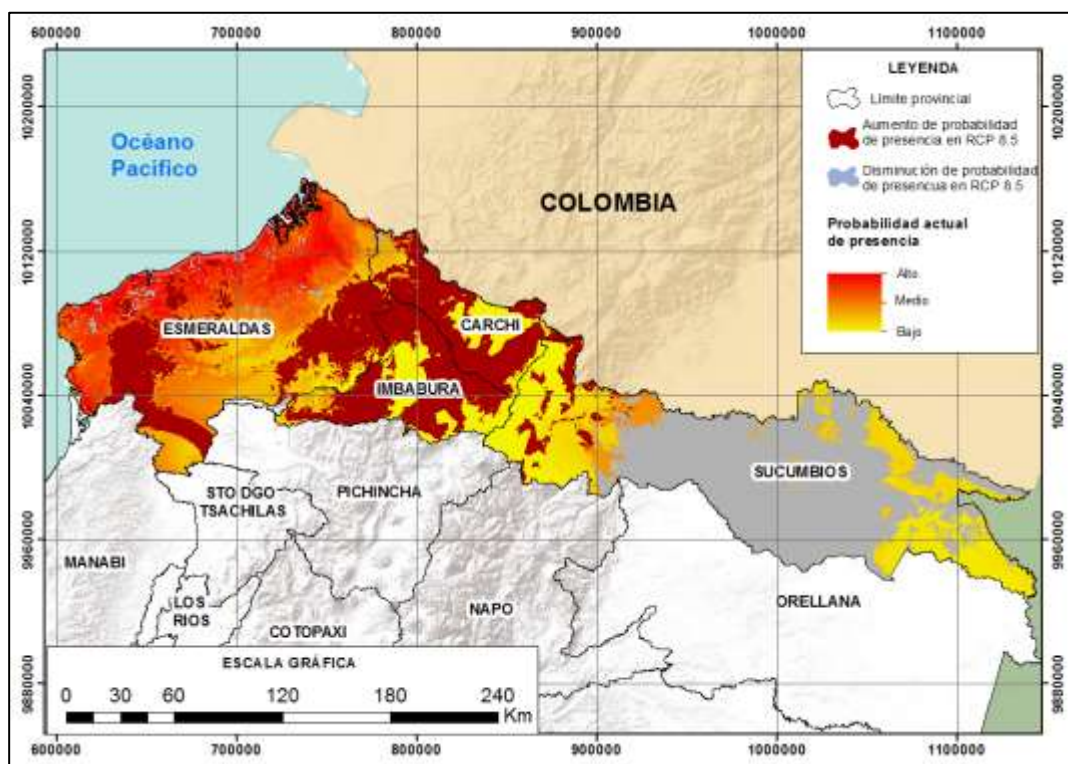


Figura 48. Comparación de la distribución actual y el escenario RCP 8.5

Los resultados obtenidos para este estudio son consistente con los modelos generados en el estudio elaborado por (Lippi et al., 2018), los modelos de distribución del vector *Aedes aegypti* del estudio también se los hizo para el año 2050 con los cuatro escenarios de emisión, construidos utilizando DesktopGarp utilizando tres modelos de circulación general (GCM): BCC-CSM-1 del Centro del Clima de Beijing, CCSM4 del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de la Comunidad, y HADGEM2-ES del Centro de modelamiento globales ambientales Hadley. Lippi et al., realiza sus estudios a mayor escala a nivel del Ecuador continental, sin embargo los modelos generados y comparándolos para la zona norte del país generado en este estudio son conscientes y predice la usencia del mosquito en la parte oriental.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los resultados del modelo de distribución actual y los modelos de distribución potencial futura del vector *Aedes aegypti* para el año 2050, considerando los cuatros escenarios de emisión para los tres Modelos de Circulación General (GCM): GISS-E2-R, MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR. Las conclusiones y recomendaciones se encuentran alineados al área de Salud Pública y Vigilancia epidemiológica ya que los potenciales rangos de distribución son un recurso dentro de la toma de decisiones por parte de las entidades competentes.

4.5. Conclusiones

- Se determinó que la presencia del vector *Aedes aegypti*, bajo condiciones actuales se centra en la provincia de Esmeraldas y en la parte oriental de la zona, las cuales se encuentran sujetas a un gran riesgo de exposición del mosquito y a las enfermedades asociadas al vector, sin embargo la presencia de la especie en la Amazonía es menor que el de la zona costera. En contraste, se evidenció la ausencia de la especie en las áreas de mayor elevación correspondientes a la Cordillera de los Andes las cuales en la actualidad tienen un porcentaje bajo de registros de las enfermedades transmitidas por la especie.
- El modelamiento de la distribución potencial de la especie bajo los cuatro escenarios de Cambio Climático mostraron un evidente aumento de la probabilidad de presencia del vector en elevaciones más altas a lo largo de las estribaciones orientales y occidentales de la Cordillera de los Andes, por lo que estas zonas pueden ser una potencial preocupación dentro de la salud pública.

- Se logró estructurar una base de datos de presencia del vector *Aedes aegypti* a partir de registros de índices aélicos los cuales permitieron la espacialización del vector para la generación de modelos de distribución considerando variables proyectadas a futuro bajo escenarios de cambios climáticos.
- La escala del análisis de este estudio presentó un factor limitante a nivel local debido a la baja resolución espacial de las variables utilizadas para los modelamientos, por lo tanto los resultados se consideran como un medio para discutir los cambios a nivel regional en la distribución de las enfermedades transmitidas por el vector.
- Se evidenció a partir de los resultados de la significancia estadística de predicción de los modelos de distribución espacial del vector *Aedes aegypti* que es posible determinar posibles rangos de expansión a futuro del mosquito utilizando diferentes técnicas de modelamientos, lo que genera una pauta para la planificación del control epidemiológico relacionado con la especie.
- Se generó doce modelos utilizando datos de proyecciones climáticas al año 2050 los cuales tuvieron buenos desempeños en función de las pruebas de omisión, de la curva de ROC y el área bajo la curva (AUC) para los cuatros escenarios de cambio climático.
- Al comparar la distribución de la especie en condiciones actuales y los modelos proyectados bajo escenarios de Cambio Climático, se identificó un incremento gradual en el porcentaje de aumento de la probabilidad de presencia del vector en cada uno de los escenarios.
- Bajo condiciones proyectadas para la trayectoria de emisión RCP 8.5, el cual considera condiciones extremas de cambio climático, la presencia del vector disminuye en la zona de la Amazonía lo cual puede estar relacionado directamente con las bajas precipitaciones

proyectadas para este escenario y al tener en cuenta que el ciclo de vida del vector depende en gran medida de la disponibilidad de agua de su medio, su presencia sería limitada en esta área.

4.6. Recomendaciones

- Para obtener mejores resultados predictivos en los modelos de distribución espacial de un especie bajo diferentes condiciones, se sugiere realizar un análisis de correlación entre las variables utilizadas para que de esta manera se evite un sobre ajuste de los modelos por colinealidad o que cada presencia no cuente con un grado de libertad adecuado.
- En cuanto a la información de las variables relacionadas con el modelamiento a futuro de la especie se recomienda utilizar datos proyectados a la fecha de estudio como el caso de uso y cobertura de suelo e inundaciones, las que podrían aportar de mejor manera al rendimiento predictivo de los modelos.
- En la línea de salud se recomienda que se lleve registros de presencia o ausencia de las especies relacionadas directamente con la transmisión de enfermedades para realizar investigaciones que contribuyan al control epidemiológico.
- Se propone realizar estudios similares con diferentes técnicas de modelamiento de distribución de especies y mayor escala de las que han utilizado en esta investigación, para que de esa manera se realice comparaciones directas entre los modelos y se identifique resultados análogos para centrar decisiones dentro de áreas con mayor potencial de riesgo debido a los cambios en las condiciones climáticas.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., & Chung, E.-S. (2019). Selection of multi-model ensemble of GCMs for the simulation of precipitation based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1-35.
- Araujo, H., Carvalho, D., Ioshino, R., & Costa-da-Silva, A. C. (2015). *Aedes aegypti* Control Strategies in Brazil: Incorporation of New Technologies to Overcome the Persistence of Dengue Epidemics. *Insects*, 6(2), 576-594.
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. (2003). *Biología: la vida en la tierra*. Pearson Educación.
- Bacallao, G., & Quintana, O. (2013). Dengue. Revisión bibliográfica. *Acta Médica del Centro*, 7(1).
- Barrales, L., Peña, I., & Pedro, D. I. (2004). Validación de Modelos: Un enfoque aplicado. *Agricultura técnica*, 64(4), 66-73.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365-377.
- Benito, B. (2011). *Modelos de distribución de flora para asistencia a la toma de decisiones de conservación*.
- Bhatt, S., Gething, P., Brady, O., Messina, J., Farlow, A., Moyes, C., . . . Hay, S. (2013). The global distribution and burden of dengue. *Nature*, 496(7446), 504-507.
- Brathwaite, O., San Martín, J., Montoya, R., & del Diego, J. (2012). The history of dengue outbreaks in the Americas. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 87(4), 584-593. doi:10.4269/ajtmh.2012.11-0770
- Bush, A., Mokany, K., Catullo, R., Hoffman, A., Kellermann, V., Carla, S., . . . Ferrier, S. (2016). Incorporating evolutionary adaptation in species distribution modelling reduces projected vulnerability to climate change. *Ecology letters*, 19(12), 1468-1478.
- Campbell, L., Luther, C., Moo-Llanes, D., Ramsey, J., Danis-Lozano, R., & Peterson, T. (2015). Climate change influences on global distributions of dengue and chikungunya virus vectors. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1665), 20140135.
- Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. (2018). *Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density*,

Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).
Obtenido de <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11>

Elith, J., Phillips, S., Hastie, T. D., En Chee, Y., & Yates, C. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.

Espinoza, J., Ronchail, J., Lavado, W., Carranza, J., Cochonneau, G., De Oliveira, E., . . . Loup, J. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias de la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque sobre la región Andina. *Revista peruana Geo-Atmosférica RPGA* , 99-130.

European Centre for Disease Prevention and Control. (2016). *Aedes aegypti - Factsheet for experts.*
Obtenido de <https://www.ecdc.europa.eu/en/disease-vectors/facts/mosquito-factsheets/aedes-aegypti>

Galacho, F., & Arrebola, J. (2010). Metodología aplicada para la evaluación con SIG y EMC de senderos según las condiciones físicas del Terreno. *Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, 466-481.

Gómez, J., & Mesa, A. (2017). Determinación de densidades urbanas sostenibles en base a metodología relativa al acceso solar: caso área metropolitana de Mendoza, Argentina. *Revista de Urbanismo*(36), 131-145.

GREENPEACE. (2018). *Imágenes y datos: Así nos afecta el Cambio Climático.* GREENPEACE.

Gubler, D. (1998). Dengue and Dengue Hemorrhagic Fever. *Clinical microbiology reviews*, 11(3), 480-496.

Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8(9), 993-1009.

Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8(9), 993-1009.

Guisan, A., & Zimmermann, N. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186.

Hannah, E. (2012). Predicting the Current and Future Potential Distributions of Lymphatic Filariasis in Africa Using Maximum Entropy Ecological Niche Modelling. *PLoS One*, 7(2), e32202.

Harte, J. (2011). *Maximum Entropy and Ecology: A Theory of Abundance, Distribution, and Energetics.* Oxford: OUP Oxford.

- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*(25), 1965-1978.
- Hirzel, A., & Lay, G. (2008). Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, 45(5), 1372-1381.
- Illoldi-Rangel, P., & Tania, E. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 7-12.
- INSPI. (2016). *Mapa de Riesgo de Transmisión de Arbovirus por Aedes aegypti vector del Dengue, Chikungunya y Zika*. Obtenido de <https://www.investigacionsalud.gob.ec/webs/episig/investigacion/>
- IPCC. (2013). *Glosario. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. (T. Q.-K. Stocker, Ed.) Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013a). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (ed.)). Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. (IPCC, Ed.) Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2019). *About the IPCC*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/about/>
- Jasen, C., & Beebe, N. (2010). The dengue vector *Aedes aegypti*: what comes next. *Microbes and infection*, 12(4), 272-279.
- Jualiano, S., & Lounibos, P. (2005). Ecology of invasive mosquitoes: effects on resident species and on human health. *Ecology letters*, 8(5), 558-574.
- Kearney, M., Wintle, B., & Porter, W. (2010). Correlative and mechanistic models of species distribution. *Conservation Letters*, 3(3), 203-213.
- Kent, M. (2000). *Advanced Biology*. OUP Oxford.

- Krebs, C., & Elwood, B. (2008). *The Ecological World View*. University of California Press.
- Lippi, C., Stewart, A., Bazaña, F., Dueñas, J., Espinoza, N., Blackburn, J., & Ryan, S. (2018). Geographic shifts in *Aedes aegypti* habitat suitability in Ecuador using larval surveillance data 3 and ecological niche modeling: Implications of climate change for public health vector control. *BioRxiv*.
- López, M. (2007). Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental. *Tesis de maestría*.
- Lowe, R., Stewart-Ibarra, A., Petrova, D., García-Díez, M., Borbor-Cordova, M., Mejía, R., . . . Rodó, X. (2017). Climate services for health: predicting the evolution of the 2016 dengue season in Machala, Ecuador. *The lancet Planetary health*, 1(4), e142-e151.
- Maciel, C., Manríquez, N., Octavio, P., & Sánchez, G. (2015). El área de distribución de las especie: revisión del concepto. *Acta univesitaria*, 25(2), 03-19.
- MAE. (2012). Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador.
- MAE. (2017). Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático . *Ministerio del Ambiente* , 1-630.
- Mateo, R., Felicísimo, Á., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
- Merow, C., Smith, M., & Silander, J. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, Fundación Biodiversidad, OECC. (2015). *Guía Resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo I*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Ministerio de Salud Argentina. (2013). *Enfermedades Infecciosas. Dengue. Guía para el Equipo de Salud*.
- Ministerio de Salud Pública. (2019). *Dirección Nacional de Vigilancia Epidemiológica*. Obtenido de <https://www.salud.gob.ec/direccion-nacional-de-vigilancia-epidemiologica/>
- Montegro, J., & Acosta, A. (2008). Innovatite program for habitat use and preference evaluation. *Universitas Scientiarum*, 13(2), 208-2019.

- Moore, M., Sylla, M., Goss, L., Warigia, M., Sang, R., Kamau, L., . . . Cormack, W. (2013). Dual African Origins of Global *Aedes aegyptis*. Populations Revealed by Mitochondrial DNA. *PLoS neglected tropical diseases*, 7(4), e2175.
- Moss, R., Mustafa, B., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., . . . Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- MSP. (2018). *Ecuador en alerta para prevenir el contagio del dengue*. Obtenido de <https://www.salud.gob.ec/estrategia-nacional-de-control-del-dengue/>
- Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio CLimático. *United nations Climate Change*, 1-27.
- Nealon, J., & Ebi, K. (2016). Dengue in a changing climate. *Environmental research*, 151, 115-123.
- NOAA. (2019). *Science On a Sphere*. Obtenido de <https://sos.noaa.gov/datasets/climate-model-temperature-change-rcp-26-2006-2100/>
- OMS. (2016). *cción multisectorial para un envejecimiento saludable basado en el ciclo de vida: proyecto de estrategia y plan de acción mundiales sobre el envejecimiento y la salud*. Ginebra: OMS.
- OMS. (2019). *Dengue*. Obtenido de <https://www.who.int/topics/dengue/es/>
- OMS. (2019). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Dengue y Dengue grave: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
- OMS. (2019). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Dengue: <https://www.who.int/topics/dengue/es/>
- OMS, OPS. (2019). *Actualización Epidemiológica. Dengue. 22 de febrero de 2019*.
- OMS, TDR. (2009). *DENGUE. Guías para el Diagnóstico, tratamiento, prevención y control*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2007). *Cambio Climático*. Obtenido de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- Pearson, R. (2007). Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. *Synthesis. American Museum of Natural History*, 50, 54-89.

- Pearson, R., & Dawson, T. (2003a). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful. *Global Ecology & Biogeography*, 12(5), 361-371.
- Peterson, A. T. (2006). USES AND REQUIREMENTS OF ECOLOGICAL NICHE MODELS AND RELATED DISTRIBUTIONAL MODELS . *Biodiversity Informatic*, 59-72.
- Peterson, T., Papes, M., & Eaton, M. (2007). Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 30(4), 550-560.
- Peterson, T., Papes, M., & Soberón, J. (2008). Peterson, A. TRethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological modelling*, 213(1), 63-72.
- Phillips, S., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Phillips, S., Dudík, M., & Schapire, R. (2004). A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, 83.
- Phillips, S., Dudík, M., & Schapire, R. (2018). *Maxent software for modeling species niches and distributions* (Version 3.4.1). Obtenido de https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- PNUMA. (2007). *Cambio climático y Diversidad Biológica*.
- Pontificia Universidad Católica de Chile. (2017). *Cambio Global*. Obtenido de Glosario de términos: <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/variabilidad-climatica>
- Quiroz, D. (2013). Las ciudades y el cambio climático: el caso de la política climática de la Ciudad de México. *Estudios demográficos y urbanos*, 28(2), 343-382.
- Ramos, J., Reynoso, R., Ramos, A., García, X., Hernández, E., Vidal, J., & Sumaco, D. (2018). Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. *Acta botánica mexicana*, 124, 117-134.
- RCP Database. (2009). *RCP Database*. Obtenido de Versión 2.0.5: <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome#intro>

- Rey, J., & Lounibos, P. (2015). Ecología de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* en América y transmisión de enfermedades. *Biomédica*, 35(2), 177-185.
- Rodríguez, M., Mance, H., Barrera, X., & García, C. (2015). *Cambio Climático: lo que está en juego*. Universidad de los Andes, Friedrich Ebert Stiftung, WWF, FNA.
- Santamaría, J. (2010). Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1), 149-173.
- Saupe, E., Barve, V., Myers, C., Sorberón, J., Barve, N., Hensz, C., & Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 237, 11-22.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2019). *Zona de Planificación 1 - Norte*. Obtenido de <http://www.planificacion.gob.ec/zona-de-planificacion-1-norte/>
- SENPLADES, SNI. (2017). *Proyecciones y Estudio Demográficos*. Obtenido de <http://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>
- Sillero, N. B., Martínez-Freiría, F., & Real, R. (2010). Los modelos de nicho ecoólgico en la herpetología ibérica: pasado, presente y futuro. *Boletín de la Asociación Herpetológica Española*(21), 2-24.
- Soberon, J., & Petterson, T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and specie's distributional areas. *Biodiversity Informatic*, 2, 1-10.
- Soberón, J., & Townsend, P. (2005). interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distribution areas. *Biodiv. Inf. Biodiversity Informatics* 2.0.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencia conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441.
- Solhjoui-Fard, S., Sarafrazi, A., Minbashi, M., & Ahadiyat, A. (2013). Predicting Habitat Distribution of Five Heteropteran Pest Species in Iran. *Journal of Insect Science*, 13(1), 1-16.
- Sprackeln, D., & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9546-9552.
- Stewart-Ibarra, A., & Lowe, R. (2013). Climate and Non-Climate Drivers of Dengue Epidemics in Southern Coastal Ecuador. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 88(5), 971-981.

- United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights*. ST/ESA/SER.A/423.
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- Watson, J., Rao, M., Ai-Li, K., & Yan, X. (2012). Climate Change Adaptation Planning for Biodiversity Conservation: A Review. *Advances in Climate Change Research*, 3(1), 1-11.
- Weetman, D., Kamgang, B., Badolo, A., Moyes, C., Shearer, F., Coulibaly, M., . . . McCall, P. (2018). Aedes Mosquitoes and Aedes-Borne Arboviruses in Africa: Current and Future Threats. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 220.
- WorldClim. (2016). *Free climate data for ecological modeling and GIS*. WorldCLim- Global Climate Data. Obtenido de <https://www.worldclim.org/>
- WorldClim. (2016). *WorldCLim- Global Climate Data*. Obtenido de <https://www.worldclim.org/>
- WWF. (2015). *Impactos del cambio climático sobre las especies*.