

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE MEDICINA  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN SALUD PÚBLICA**



**Título de la investigación  
MODELADO DEL NICHU ECOLÓGICO DEL AEDES AEGYPTI PARA LA  
PREVENCIÓN Y CONTROL DEL DENGUE, AÑO 2024.**

**Tesis para optar al grado de:  
Maestra en Salud Pública**

**Presentado por:  
DRA. FÁTIMA LISSETH ZACARIAS RAMÍREZ  
LIC. CHRISTIAN JOSÉ PALACIOS PARADA**

**Asesora:  
MSP. MARGARITA ELIZABETH GARCIA GONZALEZ**

**Ciudad Universitaria, 26 de octubre de 2024**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE MEDICINA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRIA EN SALUD PUBLICA**



**MODELADO DEL NICHU ECOLÓGICO DEL AEDES AEGYPTI PARA LA  
PREVENCIÓN Y CONTROL DEL DENGUE, AÑO 2024.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN SALUD PUBLICA**

**AUTORES:**

**DRA. FÁTIMA LISSETH ZACARIAS RAMÍREZ**

**LIC. CHRISTIAN JOSÉ PALACIOS PARADA**

**ASESOR:**

**MSP. MARGARITA ELIZABETH GARCIA GONZALEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, 26 DE OCTUBRE DE 2024**

## Tabla de contenido

RESUMEN.....	V
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2    JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1    CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MOSQUITO VECTOR AEDES AEGYPTI.....	6
2.1.1 EL DENGUE.....	8
2.1.2 DENGUE EN EL SALVADOR.....	9
2.2    CLIMA DE EL SALVADOR.....	9
2.3    EL NICHU ECOLÓGICO.....	11
2.4    EL MODELO DE NICHU ACOLÓGICO.....	13
2.5    CONDICIONES AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO DEL AEDES AEGYPTI 15	15
2.6    MAXENT.....	16
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	19
3.1 TIPO Y DISEÑO GENERAL DEL ESTUDIO.....	19
3.2 LUGAR Y PERIODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
3.3 UNIVERSO.....	19
3.5 PROCEDIMIENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	19
3.7 PLAN DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	20
3.8 MÉTODOS Y MODELOS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS SEGÚN TIPO DE VARIABLES.....	21
3.9 PROGRAMA PARA UTILIZAR PARA ANÁLISIS DE DATOS.....	22
3.10 CONSIDERACIONES ÉTICAS EN LAS INVESTIGACIONES CON SUJETOS HUMANOS.....	23
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	24
4.1 ANÁLISIS DE OMISIÓN.....	24
4.3 CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES AL MODELO.....	33

<b>4.4 RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4.1 MAPAS DE IDONIEDAD Y PROBABILIDAD.....</b>	<b>37</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>44</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>FUENTES DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>50</b>

## **AUTORIDADES**

### **RECTOR**

**M.Sc. Juan Rosa Quintanilla**

### **VICERRECTOR ACADEMICO**

**Dra. Evelyn Beatriz Farfán**

### **VICERRECTOR ADMINISTRATIVO**

**M.Sc. Roger Armando Arias Alvarado**

### **SECRETARIO GENERAL**

**Lic. Pedro Rosalio Escobar Castaneda**

**AUTORIDADES DE LA FACULTA DE MEDICINA**

**DECANO**

**Dr. Saúl Díaz Peña**

**VICEDECANO**

**Lic. Franklin Arnulfo Méndez Durán**

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE CIENCIAS DE LA SALUD**

**Dr. Edwar Alexander Herrera Rodríguez**

**JEFE DE MAESTRIAS**

**Dra. Blanca Aracely Martínez de Serrano**

## RESUMEN

El estudio del nicho ecológico del mosquito *Aedes aegypti* en El Salvador tiene como fin identificar las áreas con mayor riesgo de transmisión de dengue, facilitando así la optimización de estrategias para su prevención y control. Para ello, se empleó el software MaxEnt junto con técnicas de análisis espacial, incorporando datos ambientales y geoespaciales como temperatura, precipitación y cobertura vegetal, los cuales influyen en la proliferación del mosquito. Estos factores se integraron en un modelo predictivo que analiza la presencia del *Aedes aegypti* en distintas regiones del país y estima su distribución potencial en función de las condiciones climáticas y ambientales locales. Los resultados incluyen una serie de mapas que destacan las zonas de mayor idoneidad para la presencia del *Aedes aegypti*. Estos mapas, que identifican áreas donde el riesgo de transmisión de dengue es elevado, representan una herramienta esencial para las autoridades de salud pública, ya que les permite ubicar con precisión las zonas de alto riesgo y enfocar sus esfuerzos de manera más efectiva. Gracias a esta información, es posible mejorar la ejecución de intervenciones preventivas, tales como la eliminación de criaderos y la implementación de medidas de control vectorial en zonas críticas. La validación del modelo fue realizada mediante métodos estadísticos, entre ellos la curva ROC, que demostró una alta precisión en la predicción de áreas de riesgo. Esto garantiza que los resultados del estudio son confiables y útiles para la planificación de estrategias de control del mosquito y la reducción de casos de dengue. En conclusión, esta investigación constituye una contribución relevante en la lucha contra el dengue en El Salvador, brindando una base científica robusta que facilita la toma de decisiones en salud pública. Al dirigir los esfuerzos a las áreas más vulnerables, como los departamentos de Santa Ana, Chalatenango, Cabañas, Ahuachapán, el centro y norte de La Libertad, Morazán y Cuscatlán, se espera lograr una reducción significativa en el impacto de esta enfermedad en la población. Este enfoque permitirá a las autoridades maximizar los recursos disponibles y aumentar la efectividad de sus intervenciones en las áreas más afectadas, mejorando la calidad de vida y la salud pública en general.

**Palabras clave:** *Aedes aegypti*, Dengue, Modelado de nicho ecológico, MaxEnt, Prevención, Control vectorial, Análisis espacial.

## INTRODUCCIÓN

El dengue continúa siendo una preocupación de salud pública global, con millones de casos reportados anualmente en todo el mundo. El vector principal de esta enfermedad, el mosquito *Aedes aegypti*, que ha demostrado una notable capacidad de adaptación y dispersión, lo que complica aún más los esfuerzos para prevenir y controlar la propagación del virus. En este contexto, el modelado del nicho ecológico del *Aedes aegypti* emerge como una herramienta invaluable para comprender mejor los factores que influyen en su distribución y abundancia, así como para diseñar estrategias efectivas de prevención y control del dengue.

Con los avances tecnológicos y metodológicos en el campo del modelado ecológico y la disponibilidad de datos geoespaciales cada vez más detallados, se abre una nueva ventana de oportunidad para abordar este desafío de manera más precisa y eficiente. Este estudio se propone modelar la integración de datos ambientales, epidemiológicos y de comportamiento del vector, generando un modelo predictivo que permite identificar áreas de alto riesgo de transmisión del dengue y orientar las intervenciones de control.

A través de este trabajo, se busca contribuir al fortalecimiento de las estrategias de prevención y control del dengue, proporcionando a los responsables de la salud pública herramientas basadas en evidencia para la toma de decisiones informadas. Además, se pretende sentar las bases para futuras investigaciones que exploren en mayor profundidad la dinámica eco-epidemiológica del dengue y otros arbovirus transmitidos por mosquitos.

El presente documento no se limita únicamente a una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el modelado del nicho ecológico del *Aedes aegypti*, sino que también incluye un estudio aplicado que desarrolla un modelo predictivo utilizando el software MaxEnt. Además de analizar la literatura existente sobre el mosquito vector, el trabajo integra datos ambientales y geoespaciales para identificar áreas de riesgo de transmisión de dengue en El Salvador, proporcionando recomendaciones prácticas para mejorar las estrategias de prevención y control del virus. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo la validación de los modelos desarrollados y su aplicación práctica en la identificación de áreas prioritarias para la intervención.

# CAPÍTULO I

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El *Aedes aegypti* es un mosquito vector que transmite el virus del dengue, una enfermedad viral que afecta a millones de personas en todo el mundo, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. La prevención y el control del dengue dependen de diferentes medidas de intervención, que incluyen entender y predecir el nicho ecológico del *Aedes aegypti*, es decir, las condiciones ambientales óptimas para su supervivencia, reproducción y dispersión. Según datos del Ministerio de Salud de El Salvador, durante el 2023 se reportaron más de 28,000 casos sospechosos de dengue en el país, lo que representó un aumento significativo en comparación con años anteriores. En el mismo periodo, el número de casos confirmados superó los 6,000, con más de 30 muertes atribuidas a la enfermedad. Los departamentos con mayor incidencia incluyeron San Salvador, La Libertad y Santa Ana, debido a factores como la densidad poblacional y las condiciones climáticas favorables para la proliferación del mosquito. Este aumento en la carga de la enfermedad subraya la necesidad urgente de implementar y fortalecer estrategias integrales de prevención y control.

Sin embargo, el modelado preciso del nicho ecológico del *Aedes aegypti* presenta varios desafíos debido a la complejidad de los factores ambientales que influyen en su distribución y abundancia. Estos factores incluyen la temperatura, humedad, disponibilidad de agua estancada para la reproducción, la urbanización y otros aspectos del paisaje humano, así como la interacción con otras especies de mosquitos y animales vertebrados.

En nuestro país, hasta este momento no se cuenta con la experiencia de utilización de esta herramienta que permite predecir la distribución del vector del dengue, identificando las zonas de riesgo para orientar los esfuerzos nacionales dirigidos a dichas zonas.

Por lo tanto, el problema principal radica, la presente investigación tiene como propósito desarrollar una aproximación de modelado del Nicho Ecológico del *Aedes aegypti* que permita predecir con precisión su distribución espacial y temporal, identificar áreas de alto riesgo de transmisión del dengue para que a partir de esta información se diseñen estrategias de prevención y control eficaces. Para desarrollar dicho modelado, se deben

integrar datos biológicos, climáticos, geoespaciales y socioeconómicos en modelos predictivos que puedan guiar las acciones de salud pública y reducir la carga de enfermedad asociada al dengue.

Por lo anterior, y con el propósito de aportar herramientas de intervenciones efectivas para el control del dengue, el presente estudio busca responder a la siguiente pregunta de investigación:

**¿Es posible desarrollar una aproximación para modelar el nicho ecológico del *Aedes aegypti* que permita predecir con precisión su distribución espacial y temporal, identificar áreas de alto riesgo de transmisión del dengue?**

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El dengue representa una carga significativa para la salud pública a nivel mundial, con millones de casos reportados anualmente y un aumento constante en la incidencia de la enfermedad. La transmisión del virus del dengue por el mosquito *Aedes aegypti* es una preocupación particular debido a la falta de vacunas y tratamientos específicos, lo que resalta la importancia de estrategias de prevención y control efectivas.

La comprensión del nicho ecológico del *Aedes aegypti* es crucial para abordar la prevención de la transmisión del dengue, ya que las condiciones ambientales juegan un papel fundamental en la distribución y abundancia del mosquito transmisor. Los modelos de nicho ecológico no solo permiten predecir dónde y cuándo es probable que el mosquito esté presente, así como también ayuda a identificar las condiciones óptimas para su reproducción y de esta manera poder predecir cuales son las zonas geográficas que representan mayor probabilidad para la reproducción del mosquito y por ende zonas de alto riesgo de presentación de casos de dengue.

Al delinear las áreas de alto riesgo de transmisión del dengue, a través del modelo de nicho ecológico se brinda la información para que permita guiar las acciones de prevención y control de forma más efectiva a través de la identificación de zonas de alto riesgo para la eliminación de criaderos de mosquitos, el uso de insecticidas y la implementación de medidas de control vectorial integrado. Además, al proporcionar información sobre cómo el

cambio climático y la urbanización pueden afectar la distribución del *Aedes aegypti*, estos modelos ayudan a anticipar y mitigar los riesgos emergentes para la salud pública.

Por lo tanto, desarrollar una aproximación efectiva para modelar el nicho ecológico del *Aedes aegypti* no solo es crucial para la prevención y el control del dengue, sino que también tiene implicaciones más amplias para la gestión de enfermedades transmitidas por vectores en un mundo en constante cambio.

La aplicación de herramientas para predecir la distribución del vector del dengue, como el modelado del nicho ecológico del *Aedes aegypti*, no solo es vital para la prevención y el control de esta enfermedad, sino que también puede brindar importantes beneficios para la salud pública a nivel nacional. Al comprender mejor los factores que influyen en la distribución y la abundancia de este mosquito transmisor, los programas de salud pública pueden dirigir de manera más precisa sus esfuerzos de control y prevención. Esto podría incluir la implementación de medidas de control vectorial específicas en zonas identificadas como de alto riesgo, la asignación de recursos de manera más eficiente y la planificación de campañas de concientización y educación para comunidades vulnerables. Además, en última instancia, la aplicación de estas herramientas no solo aporta a proteger la salud de la población, sino que también puede generar ahorros significativos en términos de costos de atención médica.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una aproximación para modelar el nicho ecológico del *Aedes aegypti* para la prevención y control del Dengue.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar y analizar datos biológicos, climáticos y geoespaciales relevantes para la distribución del *Aedes aegypti*.
- Identificar los factores ambientales clave que influyen en la distribución y abundancia del *Aedes aegypti* en áreas endémicas de dengue.
- Construir modelos predictivos del nicho ecológico del *Aedes aegypti* utilizando técnicas avanzadas de modelado espacial y análisis estadístico.
- Validar y refinar los modelos de nicho ecológico mediante comparaciones con datos observacionales y evaluaciones en campo.

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MOSQUITO VECTOR AEDES**

#### **AEGYPTI.**

El mosquito *Aegypti* es considerado como el mayor y más peligroso de todos los mosquitos a nivel mundial, debido a su gran capacidad de transmitir todo tipo de enfermedades arbovirales en comparación a todas las especies de mosquitos del género *Anopheles*. Este mosquito originario de África, se cree que fue introducido al continente americano en las primeras embarcaciones colonizadoras entre los siglos XIII y XV, estableciéndose principalmente entre los trópicos y subtropicos entre las latitudes 45° N y 35° S (Secretaría de Salud. 2014).

El mosquito pertenece a la familia *Culicidae* y pertenece al orden de la *Diptera*, suelen considerarse como los artrópodos hematófagos más importantes, por su capacidad de alimentarse del hombre y de otros mamíferos como aves, bovinos, caballos, cerdos, peces, reptiles y anfibios. Además, es capaz de transmitir virus patógenos a todos los seres vivos de los que se alimenta, con excepción de los peces (Harwood, R. F., & James, M. T. 1987).

Los mosquitos son los principales vectores responsables de transmitir una serie de patógenos ya conocidos en todo el mundo como lo son: el Paludismo, la Fiebre amarilla, la Malaria, el Dengue clásico y Dengue hemorrágico, la Chikungunya, la Fiebre del Zika y el virus Mayaro (Harwood, R. F., & James, M. T. 1987).

Los mosquitos *Aegypti* encuentran su mayor protección dentro de las viviendas humanas, debido a que encuentran la mayor protección contra las inclemencias del tiempo, gracias a los hábitos domésticos del hombre (Secretaría de Salud. 2014). Lo que hace que el mosquito *Aegypti* tenga una enorme capacidad de transmitir enfermedades arbovirales al hombre (capacidad vectorial) y se debe principalmente a sus características biológicas como son su forma de alimentarse preferentemente hacia los humanos, sus hábitos de picadura, sus preferencias por un huésped humano, su gran susceptibilidad a ser vector del dengue clásico, la densidad con la que puede llegar a reproducirse y las variables ambientales, que juegan un rol muy importante en su desarrollo como lo son: la temperatura, la precipitación pluvial, la humedad, la altitud, el tipo de vegetación y sus diferentes tipos de hábitos larvarios. La interacción de todas estas variables biológicas y

ambientales son las que determinan en gran medida el desarrollo de algún serotipo de dengue clásico, dependiendo de la región geográfica y es mediante todos estos factores los que conllevan a generar transmisiones y epidemias más intensas (Reyes-Cárdenas, O., et al. 2019).

*Aegypti* se relaciona con el ser humano ya que su nicho ecológico se encuentra íntimamente relacionado con las costumbres domésticas. *Aegypti* se cría y reproduce en cualquier objeto capaz de retener agua, entre los que destacan llantas, tinas, tanques, en cavidades naturales como son cáscaras de fruta, cavidades y huecos en los árboles. Generalmente las hembras del *Aegypti*, utilizan los recipientes de boca ancha y que les brindan suficiente sombra con la finalidad de depositar sus huevecillos de forma segura (Secretaría de Salud. 2014).

El desarrollo de los huevos ocurre por lo general durante las primeras 48 horas después de la fecundación cuando las condiciones climáticas son húmedas y cálidas (Secretaría de Salud. 2014). Una vez que los huevecillos son depositados las primeras 48 horas, la humedad relativa y la temperatura es fundamental. El rango de humedad relativa en que se desarrolla *Aegypti* durante las primeras 48 horas está entre 500 y 650 mm, mientras que la temperatura se encuentra entre 10°C y temperaturas no mayores a 42°C para su desarrollo y supervivencia óptima. Una vez que el huevecillo tiene contacto con el agua, la larva emerge en 15 minutos debido a la acción bacteriana de la materia orgánica que disminuye la tensión de oxígeno y facilita la eclosión. Las larvas pueden alimentarse de microorganismos que se encuentran en el agua, debido a ello se les considera omnívoras (Secretaría de Salud. 2014).

En la figura 1 y 2 (ver ANEXOS) se muestra el ciclo de vida del mosquito *Aegypti* el cual debe de pasar por cuatro fases esenciales, para completar su ciclo de vida natural (Harwood, R. F., & James, M. T. 1987). Una vez que la hembra ha emergido y completado su desarrollo, tiene la capacidad de aparearse de manera casi inmediata. Una vez que la hembra es copulada por el macho, está es capaz de producir huevecillos de manera proporcional a la cantidad de sangre que la hembra haya ingerido. Las hembras tienen la capacidad de producir huevos fértiles todo el tiempo, siempre y cuando se mantengan ingiriendo cantidades de sangre suficientes en cada ovipostura. Cuando la hembra esta lista

para depositar los huevos, por lo general suele buscar objetos naturales o artificiales como recipientes o cavidades en los árboles, con la finalidad de depositarlos, completando así su ciclo de vida (Jeefoo, P., Tripathi, N. K., & Souris, M. 2011).

Este tipo de mosquitos por lo general prefieren los ambientes cálidos con temperaturas que oscilen entre los 15 y 40°C, además de incluir nichos ecológicos con precipitaciones pluviales altas. Anteriormente los mosquitos portadores de dengue clásico solían habitar en las zonas selváticas y rurales alrededor del mundo, sin embargo conforme fue pasando el tiempo y la población se fue incrementando la proliferación de mosquitos fue aumentando en los entornos urbanos, por lo tanto esta re infestación junto con los cambios bruscos de temperatura y el calentamiento global, la dinámica de proliferación y el ciclo de infección se incrementó de manera drástica entre las poblaciones urbanas más vulnerables del mundo (Thiri6n-Icaza, J. 2003).

### **2.1.1 EL DENGUE**

El dengue es una enfermedad vírica febril y aguda que se caracteriza por comienzo repentino, fiebre que dura de tres a cinco días (rara vez más de siete días y suele ser bifásica), cefalea intensa, mialgias, artralgias, dolor retroorbital, anorexia, alteraciones del aparato gastrointestinal y erupción. En algunos casos aparece tempranamente eritema generalizado. Para cuando comienza la defervescencia, suele presentarse una erupción maculopapular generalizada. En cualquier momento durante la fase febril pueden aparecer fenómenos hemorrágicos de poca intensidad, petequias, epistaxis o gingivorragia. En las personas de piel oscura, la erupción a menudo no es visible. A causa de los cambios patológicos fundamentales, los adultos posiblemente muestren graves fenómenos hemorrágicos, como hemorragia de las vías gastrointestinales en casos de úlcera péptica o menorragia. En la sección correspondiente al Dengue hemorrágico se presentan las infecciones por Dengue que tienen mayor permeabilidad vascular, manifestaciones hemorrágicas extraordinarias y ataque de 6rganos específcos. La recuperación puede acompañarse de fatiga y depresión duraderas. Son frecuentes la linfadenopatía y la leucopenia con linfocitosis relativa; con menor frecuencia se observan trombocitopenia ( $< 100 \times 10^3/\text{mm}^3$ ; unidades SI:  $< 100 \times 10^9/\text{l}$ ) e incremento de las transaminasas (aminotransferasas). Las epidemias tienen carácter “explosivo”, pero la tasa de letalidad es

muy baja siempre que no se presente Dengue hemorrágico (Chin, J. 2001); Las personas con fiebre hemorrágica del Dengue o síndrome de choque por Dengue tendrán los síntomas habituales de la fiebre del Dengue entre 2 y 7 días. Una vez que la fiebre cede, otros síntomas empeoran y pueden provocar una hemorragia más grave, problemas gastrointestinales (entre los que tenemos náuseas, vómitos o dolor abdominal agudo) y problemas respiratorios como dificultad para respirar.

### **2.1.2 DENGUE EN EL SALVADOR.**

El Salvador tiene una extensión territorial de 21,041 kilómetros cuadrados y una población de 5, 744,113 millones de habitantes, según el censo de población y vivienda 2007 (Ministerio de Economía, 2007). De este total de habitantes, la mayor parte de la población se concentra en los siguientes departamentos: En San Salvador 1, 567,156, seguido por el departamento de Santa Ana con 523,625; Sonsonate con 438,960; San Miguel, con 434,003 y Usulután, con 344,235. El mismo estudio registra 1, 372,854 viviendas ocupadas de un total de 1, 668,227 censadas; un 17% de las viviendas se encuentran desocupadas, a nivel nacional. Otro dato importante a destacar en este trabajo académico, es el hecho de que el 78% de los hogares posee televisor (87% en el área urbana y el 62% en el área rural) (Ministerio de Economía, 2007).

En la historia más reciente, El Salvador fue afectado por una epidemia de dengue en el año 2000, según los informes del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (2002), esta epidemia provocó la muerte de 26 personas, el control de la enfermedad se salía de las manos, por lo que fue necesaria la presencia de especialistas extranjeros en el manejo de la enfermedad. En esa ocasión circulaba el serotipo 2, se registraban 14,374 casos de dengue, de esa cifra 491 correspondían a casos de dengue hemorrágico.

En el año 2002 los casos vuelven a incrementarse, en esa ocasión, había 5,076 casos confirmados de dengue (4,671 de dengue clásico y 405 casos de dengue hemorrágico) se contabilizaron 11 víctimas mortales; a diferencia de la epidemia del 2000, se detectó la circulación de los cuatro serotipos del dengue.

## **2.2 CLIMA DE EL SALVADOR**

El Salvador está situado en la parte exterior del cinturón climático de los trópicos, en la zona climática de la planicie costera de América Central, en donde, durante todo el año,

existentes condiciones térmicas más o menos iguales, con oscilaciones diurna de la temperatura varias veces más grandes que la anual. Otra de los trópicos externos son los alisios, vientos predominantes de rumbo Nor-Este y un buen desarrollo de brisa del mar y tierra en las zonas costera. Por otra parte, se pueden distinguir claramente dos periodos de transiciones, una lluviosa y una seca, con dos periodos de transición. Se presenta también una estación seca secundaria (canícula) dentro de la estación de lluvia (PNUD, 1982).

**TABLA 1:Épocas del año en El Salvador. Fuentes: (PNUD, 1982).**

Época del año	Duración promedio			
	Principio	final	días	semanas
Estación seca	14 Nov.	19 Ab.	157	22 1/2
Transición seca- lluviosa	20 Ab.	20 May.	31	4 1/2
Estación lluviosa	21 May.	16 Oct.	149	21 4
Transición lluviosa - seca	17 Act.	13 Nov.	28	4
	Total		365	52

De acuerdo a su ubicación geográfica y condición fisiográfica, el clima de El Salvador se encuentra determinado por sus elevaciones entre los 0 msnm y lo 2700 msnm, así como por su posición en la latitud norte del cinturón tropical del globo terrestre y dentro de la zona de convergencia intertropical la cual se caracteriza por mantener temperaturas estables y cálidas en la mayor parte del país.

Bajo estas condiciones se distinguen tres zonas climáticas de acuerdo a la clasificación Koppen, Sapper y lauer (Figura 3) con temperaturas en el rango de 22 y 28 °C (0 a 800 msnm) en las planicies costeras y los valles intermedios; entre 19 y 22°C en las planicies altas y zonas alomadas (800 a 1200 msnm); y entre los 10 y 19 °C en las zonas montañosas con elevaciones entre los 1200 y 2700 msnm, tal como se indica en el mapa II. Sin embargo, ocasionalmente, en las zonas más altas entre los 2000 y 2700 msnm, se pueden tener temperaturas cercanas a los 0 °C en los primeros meses de la época seca (noviembre – enero), los cuales se ven influenciados por vientos del noreste y vientos nortes que traen

aire fresco originados en las regiones polares de Norteamérica, pero que se calientan en gran medida al ingresar al golfo de México en su camino a Centroamérica.

La humedad relativa media diaria a nivel nacional varía entre 30% y 40% llegando alcanzar niveles de humedad hasta 55% en la mayor parte del país. En algunas zonas de valles interiores presenta humedades medias anuales en el orden de 70%, en la zona oriental del país en el orden de 65%, en la zona costera presenta valores medios anuales de 75% y en las zonas altas y norteñas montañosas entre un 80% y 90% (SNET, 2004).

Entre los eventos meteorológicos, las sequías se presentan periódicamente repitiéndose con menor o mayor intensidad. Regularmente se presentan al inicio de la época lluviosa, alargando el periodo de transición época seca - época lluviosa en el mes de mayo, o bien, al final de la época lluviosa acortando el periodo de la misma en el mes de octubre y en otras ocasiones durante la canícula en el mes de agosto. Este fenómeno ocurre casi todos los años en la zona oriental del país, generando impactos negativos en la economía y la agricultura, esto varía de acuerdo a cada zona climática las cuales se pueden identificar en la (ANEXOS Figura 3).

### **2.3 EL NICHO ECOLÓGICO**

El concepto de nicho ecológico, fundamental en ecología, tiene aplicaciones significativas en el campo de la salud pública. Así como Hutchinson (1957) definió el nicho ecológico como un "hipervolumen n-dimensional" que determina la viabilidad de una especie en un ecosistema, este concepto puede extenderse para comprender la dinámica de las enfermedades y los patógenos en poblaciones humanas. En el contexto de la salud pública, el nicho ecológico de un patógeno incluye factores como las condiciones ambientales propicias para su supervivencia, los vectores que lo transmiten, y las características del huésped que facilitan su propagación. Por ejemplo, el mosquito *Aedes aegypti*, vector de enfermedades como el dengue, tiene un nicho ecológico específico que incluye factores como temperatura, humedad y disponibilidad de agua estancada para su reproducción. Comprender estos nichos es crucial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y control de enfermedades. Además, los cambios en los nichos ecológicos debido a factores

como el cambio climático o la urbanización pueden alterar la distribución de enfermedades, lo que subraya la importancia de este concepto en la vigilancia epidemiológica y la planificación de políticas de salud pública. Este enfoque ecológico en salud pública permite una comprensión más holística de la interacción entre patógenos, vectores, humanos y el ambiente, facilitando intervenciones más efectivas y sostenibles.

Si queremos referirnos al modelado de especies, debemos definir, en primera instancia, el concepto de nicho. Éste incluye a todos los factores bióticos y abióticos con los cuales cualquier organismo se relaciona, en un tiempo y espacio determinado. Formalmente, el nicho ha sido descrito como un hipervolumen de n-dimensiones, donde cada dimensión corresponde a uno de los factores antes descritos. De esta forma, el nicho involucra a todos los recursos presentes del ambiente, las adaptaciones de los organismos y cómo se relacionan estos dos, sensu Grinnell (1917) o Hutchinson (1957). Este concepto general de nicho puede ser delimitado a lo que ha sido llamado nicho ecológico, en donde hace referencia al tiempo actual en el cual se desarrolla el organismo, y cómo éste interactúa con los factores ambientales que lo rodean. Para una discusión más extensa del concepto de nicho ver Peterson (2006).

A pesar de ser utilizados constantemente como concepto en ecología, el concepto de nicho ecológico cuenta con diversos significados. Una manera de dividir estos conceptos es en nichos Eltoniano y nicho Grinnelliano. El nicho Eltoniano es aquel que se enfoca en cuestiones pertinentes a los recursos, su consumo y las interacciones biológicas, mientras que el nicho Grinnelliano se refiere a la serie de condiciones ambientales que favorecen el crecimiento poblacional de la especie (Jackson & Overpeck, 2000b; Soberón, 2007).

Los modelos de nichos ecológicos (MNE) dependen de los conceptos de nichos fundamentales y nichos realizados. El nicho fundamental en los MNE se define como el espacio geográfico que reúne las condiciones necesarias para la existencia de poblaciones de la especie, mientras que el nicho realizado es un subconjunto de estos espacios donde la especie se distribuye en la actualidad (Kearne, 2006). En general, podemos encontrar espacios geográficos que reúnen las condiciones idóneas para una especie pero que no se superponen con su distribución. Estos espacios suelen ser localidades que reúnen las condiciones ambientales idóneas pero que son inaccesibles a la especie por limitantes como

pueden ser montañas, cuerpo de agua, o la capacidad de dispersión de la especie (Robert D. Holt, 2003).

La relación entre el nicho y el espacio geográfico puede ser mejor entendidas por medio del diagrama BAM (Soberón & Peterson, 2005) representada en la figura 4 de los anexos.

En el caso de las especies no-nativas, la limitante de accesibilidad a la zona geográficas donde se introducen se ve eliminada gracias a la acción humana. Cuando una especie es introducida en un espacio geográfico nuevo, existen dos respuestas: la especie puede rastrear el nicho realizado dentro de su rango nativo, o cambiar su nicho realizado (Guisan et al., 2014; Peterson et al., 1999). El cambio en el nicho realizado de una especie en su área de introducción puede ser un reflejo de una parte del nicho fundamental al cual la especie no tiene acceso en su área nativa debido a la interacción bióticas o simplemente porque no se encuentra en un sitio análogo accesible (Broennimann & Guisan, 2008; Guisan et al., 2014).

Existen otras explicaciones para el cambio en el nicho realizado de una especie. Es posible (aunque menos probable) que el cambio observado en el nicho realizado sea consecuencia de un cambio evolutivo en el nicho fundamental (Broennimann & Guisan, 2008). Actualmente no es posible derivar la totalidad del nicho fundamental de una especie basándonos en datos de observación, esta complejidad sumada a los resultados obtenidos por distintos investigadores (Broennimann & Guisan, 2008) han llevado a la idea de que la mayoría de cambios observados en el nicho realizado de especies introducida no son derivadas de un cambio en el nicho fundamental de la especie o son producto de artefactos metodológicos (Soberón & Peterson, 2005; Guisan et al., 2014).

A pesar de que el supuesto de conservadurismo de nichos es debatible, se ha documentado una tendencia de las especies a participar en un rastreo de su nicho encontrándose en el área invadida en sitios que son climáticamente y ambientalmente similares a su rango nativo (Peterson, 2011; Wiens & Graham, 2005)

## **2.4 EL MODELO DE NICHO ACOLÓGICO**

En general, en la literatura son a menudo usados indistintamente los nombres “modelos de nicho ecológico” y “modelos de distribución”, e incluso conceptualmente pueden ser muy

semejantes. Los modelos de nicho ecológico son modelos usados para desarrollar relaciones entre los valores ambientales y los datos de presencia, presencia-ausencia y/o abundancia conocidos de las especies (Graham et al., 2004). Por otro lado, los modelos de distribución de especies son modelos que relacionan las observaciones de campo de los taxones con variables ambientales predictivas, basadas en una respuesta estadística o teórica (Guisan y Zimmermann 2000, Guisan y Thuiller 2005). Sin embargo, aunque parecen lo mismo, pensamos que existe una diferencia, aunque sutil, entre ambos conceptos.

modelado de su nicho ecológico. Un modelo de nicho ecológico (MNE) es un conjunto de técnicas correlativas utilizadas con el fin de identificar las condiciones ambientales donde una especie está presente, modelando Los modelos de distribución de especies, utilizando el nicho ecológico como base teórica, son herramientas muy útiles para resolver preguntas de ecología aplicada, conservación y biogeografía, debido a las bases ecológicas y evolutivas subyacentes (Guisan y Thuiller 2005). Se han desarrollado varios modelos que ayudan a comprender algunas de las dimensiones ambientales y ecológicas en las que se encuentra un taxón, principalmente aquellas relacionadas con factores abióticos (precipitación, temperatura, entre otras) y bióticos (tipos de vegetación en las cuales se puede encontrar). El desarrollo de algoritmos matemáticos permite, cada vez más, modelar con mayor precisión el nicho ecológico de los taxones. Entre los diferentes algoritmos de modelado que existen, podemos mencionar principalmente a BIOCLIM (Busby 1991), GARP (Stockwell y Peters 1999) y Maxent (Phillips et al. 2006). Cada uno de ellos presenta un acercamiento diferente al problema del modelado del nicho ecológico, ya sea a partir del uso de algoritmos de envolturas climáticas (BIOCLIM), de algoritmos genéticos (GARP) o de algoritmos de máxima entropía (Maxent).

Una herramienta en el estudio de las invasiones biológicas es la predicción de zonas vulnerables a la expansión de la distribución de una especie no-nativa por medio de la dimensión ambiental que ocurra la especie y proyectándola a la dimensión geográfica por medio de variables ambientales y datos georreferenciados de presencias (y en ocasiones ausencias) (Jiménez- Valverde et al., 2011a; Warren, 2012; Zurell & Engler, 2019).

Los modelos de nichos ecológicos operan bajo el concepto de nicho ecológico Grinnelliano, el cual se puede definir como el subconjunto de un espacio multivariado de condiciones ambientales donde una especie puede establecer poblaciones sin necesidad de inmigración repetida de individuos, restringiendo a aquellas variables ambientales que no son consumidas o directamente afectadas por la especie (Jiménez- Valverde et al., 2011<sup>a</sup>; Soberon, 2007). La teoría de nicho Grinnelliano permite de manera operacional relacionar el nicho con el espacio geográfico (Jiménez- Valverde et al., 2011a). en la practica del MNE, esta relación se establece a partir de datos de presencias (y de ser posible ausencias) de la especie, partiendo del supuesto de que hay conservadurismo de nicho, los MNE generan predicciones a partir de estos datos.

Los datos de presencia utilizados por lo MNE son observaciones georreferenciadas de las especies de interés, frecuentemente obtenidas de bases de datos de colecciones científicas, museos, investigaciones de campo y de bases de datos de ciencia ciudadana (Beck et al, 2014). Los datos de ausencias son datos de puntos geográficos donde se ha confirmado que la especie está ausente. El problema con los datos de ausencias es que puede asumirse que una especie está ausente simplemente porque el observador fallo en detectarla, lo cual se conoce como detección imperfecta (Lahoz-Monfort et al., 2014). Gracias a la detección imperfecta, es más frecuente tener información de presencias (ya que podemos asumir que la mayoría de las presencias son reales) que de ausencias reales.

Dentro del modelo de nicho ecológico, existen modelos que trabajan solo con datos e presencia, lo cual ha sido criticado (Jiménez- Valverde et al., 2011a). la omisión de los datos de ausencias reales resulta frecuentemente en un MNE que sobre-predice la distribución de una especie, y que en realidad refleja un nicho más aproximado al fundamental que el realizado (y, por ende, la distribución potencial) de la especie (Brotons, Thuiller, Araujo & Hirzel, 2004). Esta sobre-predicción de la distribución es un problema cuando se busca determinar la distribución actual de las especies, pero puede considerarse no-nativas.

## **2.5 CONDICIONES AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO DEL AEDES AEGYPTI**

El *Aedes aegypti*, mosquito vector de enfermedades como el dengue, zika, chikungunya y fiebre amarilla, prospera en condiciones ambientales específicas que favorecen su reproducción y supervivencia. Este insecto se ha adaptado notablemente a los entornos urbanos y periurbanos, donde encuentra un hábitat ideal para su desarrollo (WHO, 2020).

Las temperaturas cálidas son cruciales para el *Aedes aegypti*. El mosquito se desarrolla óptimamente en un rango de 25 a 30°C, aunque puede sobrevivir en temperaturas que oscilan entre los 10 y 40°C (Brady et al., 2013). Esta preferencia térmica explica su prevalencia en regiones tropicales y subtropicales. Además de la temperatura, la humedad juega un papel importante, con el mosquito prefiriendo ambientes donde la humedad relativa se sitúa entre el 60% y el 80% (Reinhold et al., 2018).

El agua estancada es esencial para el ciclo de vida del *Aedes aegypti*. Las hembras depositan sus huevos en recipientes con agua, tanto naturales como artificiales (Barrera et al., 2019). En entornos urbanos, objetos como llantas abandonadas, latas, botellas y otros contenedores que acumulan agua de lluvia se convierten en criaderos ideales. Esta característica hace que las precipitaciones sean un factor significativo, ya que las lluvias aumentan los sitios potenciales de reproducción (Trewin et al., 2013).

La altitud también influye en la distribución del mosquito. Generalmente, se encuentra por debajo de los 2,000 metros sobre el nivel del mar, aunque esto puede variar según las condiciones locales (Lozano-Fuentes et al., 2012). En cuanto a la iluminación, el *Aedes aegypti* muestra preferencia por áreas sombreadas para descansar y poner sus huevos, lo que explica su afinidad por zonas con vegetación abundante (Chadee et al., 1998).

La estacionalidad afecta la actividad del mosquito, siendo más activo durante las épocas cálidas y lluviosas del año (Vezzani et al., 2008). Esto coincide con las condiciones que favorecen la proliferación de sus sitios de cría. Interesantemente, el *Aedes aegypti* muestra cierta tolerancia a aguas con algún grado de contaminación orgánica, lo que amplía sus posibilidades de reproducción en diversos entornos urbanos (Burke et al., 2010).

La comprensión de estas condiciones ambientales es fundamental para implementar estrategias efectivas de control vectorial. Las medidas de prevención se centran principalmente en la eliminación de sitios de cría y en la protección personal contra las picaduras de mosquitos (Achee et al., 2019). El manejo ambiental, junto con la educación comunitaria, juega un papel crucial en la reducción de las poblaciones de *Aedes aegypti* y, por ende, en la prevención de las enfermedades que transmite (WHO, 2020).

## **2.6 MAXENT**

MaxEnt es un software basado en machine learning que utiliza solo datos de presencia para determinar la distribución de la probabilidad de una especie con la máxima entropía posible (es decir, la explicación estadísticamente más cercana a ser uniforme), lo cual es una ventaja sobre otras técnicas que requieren datos de ausencias para obtener resultados

precisos (Elith et al., 2011) por lo tanto, MaxEnt toma estos datos de presencias para generar predicciones del valor de probabilidad en un pixel dado, de manera porcentual (Hernandez et al., 2008). Maxent se ha popularizado en los últimos años, y consecuentemente ha incrementado los estudios comparando su efectividad contra otros métodos utilizados para realizar el MNE.

Al contrastar la efectividad de Maxent con otros métodos para realizar MNE, diversos autores han, encontrado que los resultados obtenidos por Maxent se encuentran entre la mejor capacidad predictiva (Aguirre-Gutierrez et al., 2013; Elith et al., 2006; Wisz et al., 2008). Otro punto que contribuye a la popularidad de Maxent es que, a la par del software oficial, existe paquetería R para ejecutar, evaluar y transferir el modelo.

Maxent cuenta con varios ajustes que tienen influencia sobre el resultado final del modelo. Entre los factores que se encuentran deben considerar el usar Maxent se encuentra la selección del área de calibración (zona geográfica de donde se tomaron los puntos y los valores de las variables para el modelo), la elección de parámetros en el modelado, la calidad de nuestros datos de presencias y la manera en que valida la capacidad predictiva del modelo final (Merow et al., 2013). Para seleccionar apropiadamente estos ajustes, se debe considerar el propósito de la investigación, así como el origen y precisión de nuestros datos de presencias.

Los resultados visualizados en el producto final de correr un modelo en Maxent dependen de la selección del usuario. Dentro de los resultados más importantes se encuentra el mapa de idoneidad, la curva ROC y la tasa de omisión. La curva ROC representa de manera grafica la razón de verdaderos positivos contra los falsos positivos según varía el umbral de discriminación, en otras palabras, según varía el punto a partir del cual consideramos un positivo. Su aplicación en los MNE nos permite contrastar con la curva ROC de otros modelos y así evaluar cual es el modelo con mejor desempeño (Young et al., 2011). La tasa de omisión evalúa la probabilidad de que una observación seleccionada al azar caía en un pixel del ráster con un valor de probabilidad de ocurrencia mayor que un punto de ausencia seleccionado al azar (Kigen et al., 2013). Por lo tanto, los valores de omisión ideales deben ser similares a la omisión predicha.

La salida logística mejora la idoneidad del modelo (Phillips and Dudík 2008) debido a que estima la probabilidad de presencia, asumiendo que el diseño del muestreo es tal que las típicas localizaciones de presencias tienen una probabilidad de presencia de alrededor 0.5 (Phillips 2020).

Si bien los investigadores deberán sentirse en la libertad de modificar las especificaciones antes descritas, a efecto de ajustar mejor sus modelos y sacarles el máximo provecho a los resultados, se sugiere que se tome en cuenta los aportes de diversas contribuciones científicas y se fundamente muy bien los cambios.

Para efectos ilustrativos, se exponen algunos resultados de datos reales de Amazona auropalliata, especie en peligro según el listado Oficial de Especies Amenazadas y en Peligro de Extinción vigente (MARN 2015). Los datos de presencia fueron obtenidos el 16 de julio de 2020, mediante la extensión de QGis Load GBIF ocurrences. También, se utilizaron las 19 variables bioclimáticas de WorldClim versión 1.3. En la configuración de MaxEnt se utilizaron 500 iteraciones, cinco réplicas, salida logística y el 25% del total de los registros se utilizó para entrenamiento.

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1 TIPO Y DISEÑO GENERAL DEL ESTUDIO**

Se aplicará la metodología de investigación cuantitativa, aplicando el método deductivo, con un estudio propuesto que adopta un enfoque observacional y descriptivo, combinado con elementos de modelado predictivo. Se estructura como un estudio transversal, lo que implica la recopilación de datos en un único punto temporal. En este sentido, se aprovecharán datos históricos sobre la distribución espacial del *Aedes aegypti* y los casos de dengue, junto con información ambiental pertinente para el modelado del nicho ecológico.

### **3.2 LUGAR Y PERIODO DE LA INVESTIGACIÓN**

La investigación se centrará en El Salvador durante el año 2024, abordando áreas urbanas, suburbanas y rurales donde el *Aedes aegypti* es endémico y el dengue es una preocupación de salud pública. Se recopilarán datos actualizados sobre la distribución del mosquito, casos de dengue y variables ambientales.

### **3.3 UNIVERSO**

El universo de datos nacionales de un periodo de 30 años (1991 a 2020) según norma climatológica de variables ambientales descritas en la sección 3.8, y los datos de presencias de la especie en los años 2019 a 2024.

La presente investigación abarca todas las áreas de El Salvador donde el *Aedes aegypti* es endémico y el dengue es una preocupación de salud pública, incluyendo entornos urbanos, suburbanos y rurales.

### **3.5 PROCEDIMIENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.**

En primer lugar, se procederá a recopilar una amplia gama de datos. Esto incluirá información sobre la distribución geográfica del *Aedes aegypti* y los casos de dengue en El Salvador, así como datos ambientales descritos en la tabla de la sección 3.8.

Una vez recopilados los datos, se llevará a cabo un exhaustivo proceso de preprocesamiento. Esto implica limpiar los datos para eliminar cualquier valor atípico o

faltante que pueda distorsionar los resultados. Además, se normalizarán o estandarizarán los datos para asegurar que estén en la misma escala y sean comparables entre sí.

Se realizará un análisis exploratorio de los datos para comprender mejor su distribución y variabilidad. Se utilizarán técnicas estadísticas descriptivas y visualizaciones gráficas para este fin, incluyendo la creación de mapas que muestren la distribución espacial del *Aedes aegypti* y los casos de dengue.

### **3.7 PLAN DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

El análisis será el modelado del nicho ecológico del *Aedes aegypti*. Se emplearán técnicas especializadas, como los modelos de distribución de especies, para predecir la distribución potencial del mosquito en función de las variables ambientales recopiladas. Estos modelos serán validados utilizando métodos geoestadísticos de evaluación de precisión.

Una vez completado el modelado, se procederá a identificar áreas de alto riesgo para la transmisión del dengue. Esto se logrará utilizando los resultados de los modelos de nicho ecológico para identificar áreas con condiciones ambientales favorables para la presencia del mosquito y la propagación de la enfermedad.

Se llevará a cabo un análisis detallado de los factores de riesgo, investigando la relación entre las variables ambientales y la presencia del *Aedes aegypti*, así como la incidencia de casos de dengue. Se buscará identificar los factores ambientales que contribuyen significativamente al riesgo de transmisión de la enfermedad.

Los resultados de estos análisis se integrarán para desarrollar recomendaciones prácticas que favorezcan las intervenciones efectivas para la prevención y control del dengue. Se generarán mapas de riesgo que comuniquen de manera efectiva las áreas prioritarias para la intervención, y se evaluará la efectividad de las estrategias de control implementadas en estas áreas.

### 3.8 MÉTODOS Y MODELOS DE ANÁLISIS DE LOS DATOS SEGÚN TIPO DE VARIABLES.

TABLA 2: Variables bioclimáticas

Nombre de la variable	Descripción	Definición
Bioclim 1	Temperatura promedio anual (°C)	Representa la temperatura media de un lugar durante un año completo.
Bioclim 2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)	Variación de temperatura que ocurre dentro de un período de 24 horas, específicamente entre el día y la noche.
Bioclim 3	Isotermalidad (°C) = $BIO2/BIO7*100$	Propiedad de un área o región de mantener una temperatura relativamente constante a lo largo del tiempo.
Bioclim 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)	Cambios predecibles en las temperaturas a lo largo del año, en relación con las estaciones.
Bioclim 5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)	Temperatura media más alta registrada durante la estación o período del año en que las temperaturas son más altas.
Bioclim 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura más baja registrada durante el mes del año en el que las temperaturas son generalmente más frías.
Bioclim 7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (BIO5-BIO6)	Temperatura que ocurre a lo largo del año, específicamente entre las temperaturas máximas y mínimas registradas durante diferentes estaciones.
Bioclim 8	Temperatura media del mes más húmedo (°C)	Promedio de las temperaturas registradas durante el mes del año en el que la precipitación es generalmente más alta.
Bioclim 9	Temperatura media del mes más seco (°C)	Promedio de las temperaturas registradas durante el mes del año en el que la precipitación es generalmente más baja.
Bioclim 10	Temperatura media del trimestre más cálido (°C)	Promedio de las temperaturas registradas durante los meses más calurosos del año en una determinada región.
Bioclim 11	Temperatura media del trimestre más frío (°C)	Promedio de las temperaturas registradas durante los meses que constituyen el período más frío del año en una región determinada.
Bioclim 12	Precipitación anual (mm)	Cantidad total de agua en forma de lluvia, nieve, granizo o cualquier otra forma de agua que cae sobre una determinada área durante un período de un año calendario completo.
Bioclim 13	Precipitación del periodo más húmedo (mm)	Cantidad total de agua en forma de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período del año en el que las condiciones de humedad son más altas.
Bioclim 14	Precipitación del periodo más seco (mm)	Cantidad total de agua en forma de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período del año en el que las condiciones de humedad son más bajas.
Bioclim 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)	Patrones de variación de la cantidad de lluvia u otras formas de precipitación a lo largo del año, específicamente en relación con las estaciones.
Bioclim 16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	Cantidad total de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período de tres meses en el que se registran las condiciones de humedad más altas del año.
Bioclim 17	Precipitación del trimestre más seco (mm)	Cantidad total de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período de tres meses en el que se registran las condiciones de humedad más bajas del año.
Bioclim 18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)	Cantidad total de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período de cuatro meses en el que se registran las temperaturas más altas del año.
Bioclim 19	Precipitación del trimestre más frío (mm)	Cantidad total de lluvia u otras formas de precipitación que caen sobre una determinada área durante el período de cuatro meses en el que se registran las temperaturas más bajas del año.

### **3.9 PROGRAMA PARA UTILIZAR PARA ANÁLISIS DE DATOS**

MaxEnt requiere la instalación previa del lenguaje de programación Java 1.4 o superior, que puede ser descargado gratuitamente de <https://www.java.com/es/>. Es necesario verificar que la versión de Java sea compatible con el sistema operativo de la computadora en que se realizarán los análisis.

MaxEnt puede descargarse gratuitamente en el sitio web [https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/). La carpeta en formato .zip debe descomprimirse. En su interior contiene archivos con extensiones .jar, .bat, .sh y .txt, que deben ser ubicadas en una única carpeta en la computadora de trabajo. El archivo .txt contiene las instrucciones para efectuar la instalación.

Para ejecutar MaxEnt, se requiere que los datos bioclimáticos estén en formato ASCII (.asc) y posean encabezados coincidentes, además, deben contener los mismos tamaños de celda y límites geográficos para evitar fallos en la ejecución del programa. Se debe indicar si se trata de variables continuas o categóricas, según la naturaleza de los datos disponibles.

Por defecto, las variables de WorldClim se descargan en formato ráster GeoTiff con información a escala global, que debe ser consistentemente recortada a los límites del área de estudio, en este caso El Salvador. Para ello, se sugiere el uso de ArcGis, Qgis o algún otro software de análisis geográfico disponible, a efecto de iterar las operaciones de recorte de las capas utilizando una máscara vectorial, en un mismo proceso, que debería incluir su transformación del formato ráster tiff a Ascii.asc para evitar interrupciones en el software (Scheldeman and Van Zonneveld 2011).

Las variables de presencia de las especies seleccionadas para el estudio deben estar contenidas en un archivo de valores separados por coma (“comma separated values”, extensión .csv) y deben contener los campos en el estricto orden de especie, longitud y latitud. Si bien el programa podría permitir columnas adicionales, serán ignoradas para el análisis.

Al ejecutar el archivo maxent.jar, se deberá indicar los directorios de las muestras (Samples), el directorio de las variables ambientales (Environmental Layers) y activar la

casilla correspondiente. También debe seleccionarse “crear curvas de respuesta” y “jackknife”. Por último, se debe indicar el directorio de salida (Output directory).

El formato de salida (output format) debe ser logístico y el tipo de archivo de salida (output file), ASCII. Además, en la ventana principal debe seleccionarse la opción configuraciones 3(settings). Aparecerá una nueva ventana con tres pestañas. En la primera pestaña, llamada Basic, se debe seleccionar la opción “remover duplicados” (remove duplicate presence records), colocar 25 en la prueba de porcentaje aleatoria (random test percentage) y 5 réplicas (replicates). En la segunda pestaña, “advanced”: desactivar la casilla resultados de casillas en blanco (write output grids).

Cabe destacar que los modelos fueron evaluados por medio de las pruebas curva de respuesta (análisis de omisión/comisión) y sensibilidad Curva Operada por el Receptor (ROC) - Área bajo la curva (AUC) (Elith et al. 2006), así como la prueba de Jackknife para medir los efectos de cada variable en el modelo (Shcheglovitova and Anderson 2013).

Se realizó un análisis de componentes principales (APC) utilizando la matriz estandarizada de contribución de cada variable bioclimática para conocer su comportamiento en función del modelo. Para estimar la correlación de las variables, se realizó un dendrograma jerárquico con distancia de Mahalanobis y se estimó el valor de agrupamiento de la varianza en el modelo de APC. Todos los análisis fueron realizados con el Software estadístico PAST (Paleontological statistics software package for education and data analysis) (Hammer, Harper, and Ryan 2001)

### **3.10 CONSIDERACIONES ÉTICAS EN LAS INVESTIGACIONES CON SUJETOS HUMANOS.**

Se priorizará la beneficencia, procurando que los beneficios científicos y sociales superen cualquier riesgo potencial, evitando causar daño innecesario, en línea con el principio de no maleficencia. La confidencialidad de la información personal será esencial, asegurando que los datos se utilicen de manera ética y responsable. Asimismo, se respetará la autonomía de los participantes, reconociendo su capacidad para tomar decisiones informadas y permitiéndoles retirarse de la investigación en cualquier momento. La justicia también

juega un papel fundamental, se garantiza una distribución equitativa de los beneficios y riesgos, así como una selección justa y acceso equitativo a la participación en la investigación.

## **CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1 ANÁLISIS DE OMISIÓN**

El gráfico de análisis de omisión y predicción (Figura 6) del área para *Aedes aegypti* proporciona una visión integral del desempeño del modelo MaxEnt en la predicción de la distribución potencial de esta especie vectorial. En él, la curva roja, que indica la fracción del área de fondo predicha, desciende a medida que aumenta el umbral acumulativo, lo que refleja una disminución progresiva en la superficie considerada adecuada para la presencia de la especie a medida que los criterios de idoneidad se vuelven más estrictos. Esta tendencia es esperada, ya que los umbrales más altos restringen la predicción a áreas con mayor probabilidad de presencia.

Las curvas de omisión para las muestras de entrenamiento y prueba, representadas en azul claro y oscuro respectivamente, se alinean en gran medida con la línea negra diagonal de omisión predicha. Esta alineación es crucial, ya que sugiere que el modelo está bien calibrado y mantiene una coherencia entre las predicciones realizadas en los datos de entrenamiento y los datos de prueba. La proximidad de estas curvas a la línea de referencia

indica que el modelo tiene una capacidad predictiva robusta y no está sobreajustado a los datos de entrenamiento, lo que es vital para su capacidad de generalización.

Es notable que la curva de omisión en las muestras de prueba sigue de cerca la de las muestras de entrenamiento, lo que demuestra que el modelo no solo es preciso en la predicción de los datos que ya conoce, sino que también mantiene su precisión en datos nuevos y no vistos. Esta consistencia reduce las preocupaciones sobre un posible sobreajuste y sugiere que el modelo es fiable para realizar predicciones sobre la distribución de *Aedes aegypti* en áreas no incluidas en el conjunto de entrenamiento.

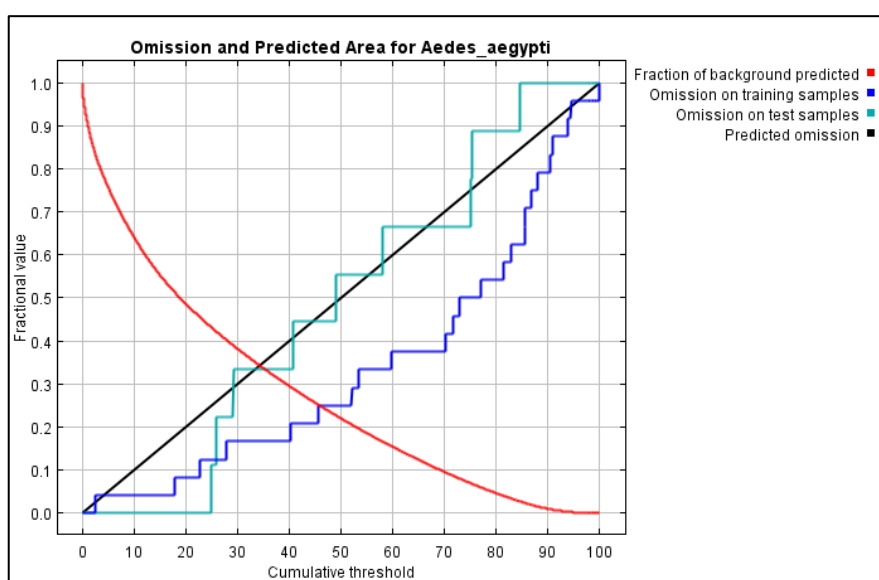


Figura 6: omisión/comisión para un modelo MaxEnt

El gráfico de curva ROC (Receiver Operating Characteristic) para *Aedes aegypti* (Figura 7) revela información crucial sobre la precisión del modelo MaxEnt utilizado para predecir la distribución de esta especie. En el eje X, se encuentra la tasa de falsos positivos, que representa la proporción de áreas incorrectamente identificadas como adecuadas para la especie, mientras que en el eje Y se muestra la sensibilidad, o la capacidad del modelo para identificar correctamente las áreas donde *Aedes aegypti* realmente está presente.

La curva ROC correspondiente a los datos de entrenamiento, representada en rojo, tiene un Área Bajo la Curva (AUC) de 0.841. Este alto valor sugiere que el modelo tiene un excelente desempeño en los datos que utilizó para aprender, siendo capaz de discriminar con precisión entre áreas adecuadas e inadecuadas para la especie. Por otro lado, la curva

ROC para los datos de prueba, mostrada en azul, presenta un AUC de 0.768, lo que, aunque ligeramente inferior, sigue indicando un buen rendimiento del modelo al enfrentarse a datos no vistos previamente. Esta diferencia entre los valores de AUC es indicativa de un pequeño grado de sobreajuste, donde el modelo se ajusta un poco más a los datos de entrenamiento que a los de prueba, pero no lo suficiente como para comprometer significativamente su capacidad predictiva.

La línea negra diagonal en el gráfico representa un modelo de predicción aleatoria, con un AUC de 0.5. El hecho de que tanto las curvas de entrenamiento como de prueba se encuentren por encima de esta línea confirma que el modelo MaxEnt supera con creces una predicción al azar, mostrando su validez y eficacia.

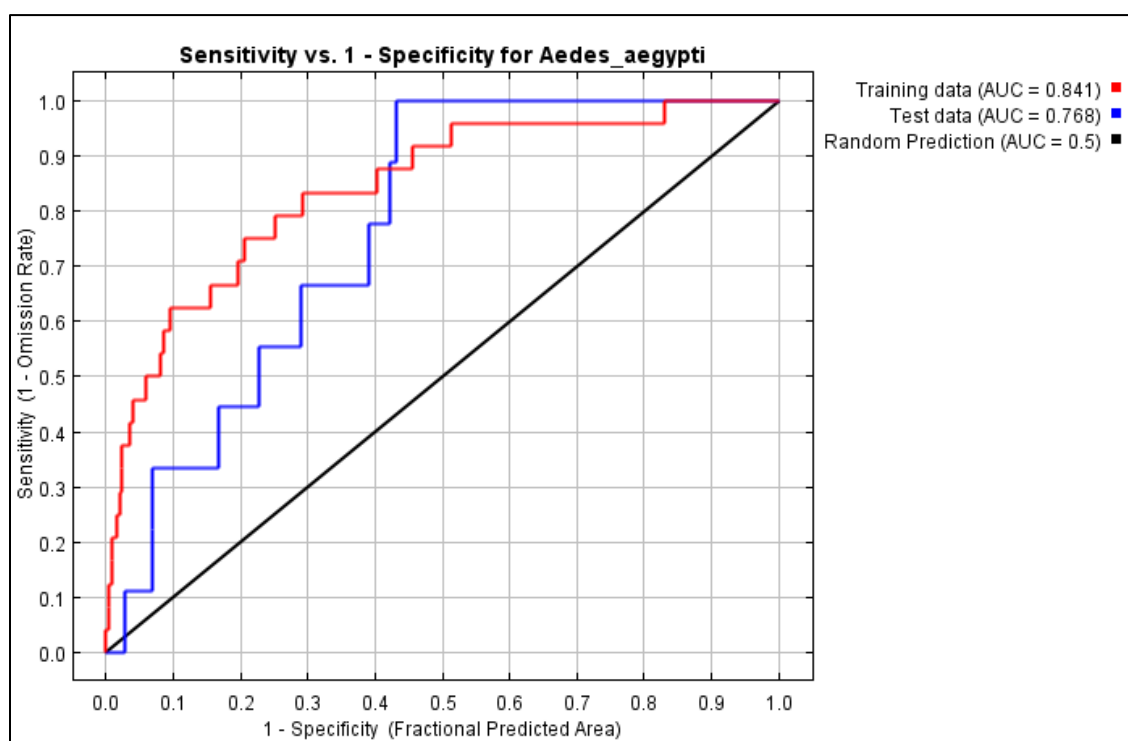


Figura 7: Desempeño del modelo (valores AUC)

Estas curvas muestran cómo cada variable ambiental afecta la predicción de Maxent. Las curvas muestran cómo cambia la probabilidad de presencia predicha a medida que se varía cada variable ambiental, manteniendo todas las demás variables ambientales en su valor de muestra promedio. Haga clic en una curva de respuesta para ver una versión más grande.

Tenga en cuenta que las curvas pueden ser difíciles de interpretar si tiene variables fuertemente correlacionadas, ya que el modelo puede depender de las correlaciones de maneras que no son evidentes en las curvas. En otras palabras, las curvas muestran el efecto marginal de cambiar exactamente una variable, mientras que el modelo puede aprovechar conjuntos de variables que cambian juntas. A

diferencia de las curvas de respuesta marginal anteriores, cada una de las siguientes curvas representa un modelo diferente, es decir, un modelo Maxent creado utilizando solo la variable correspondiente. Estos gráficos reflejan la dependencia de la idoneidad predicha tanto de la variable seleccionada como de las dependencias inducidas por las correlaciones entre la variable seleccionada y otras variables. Pueden ser más fáciles de interpretar si hay fuertes correlaciones entre las variables.

TABLA 3: umbrales comunes y las tasas de omisión

Cumulative threshold	Logistic threshold	Description	Fractional predicted area	Training omission rate	Test omission rate	P-value
1.000	0.104	Fixed cumulative value 1	0.902	0.000	0.000	3.942E-1
5.000	0.199	Fixed cumulative value 5	0.755	0.042	0.000	7.978E-2
10.000	0.249	Fixed cumulative value 10	0.640	0.042	0.000	1.797E-2
2.545	0.151	Minimum training presence	0.831	0.000	0.000	1.883E-1
22.643	0.378	10 percentile training presence	0.456	0.083	0.000	8.511E-4
45.872	0.473	Equal training sensitivity and specificity	0.250	0.250	0.444	4.895E-2
52.064	0.493	Maximum training sensitivity plus specificity	0.206	0.250	0.556	9.363E-2
35.409	0.437	Equal test sensitivity and specificity	0.333	0.167	0.333	4.24E-2
24.990	0.392	Maximum test sensitivity plus specificity	0.431	0.125	0.000	5.127E-4
2.545	0.151	Balance training omission, predicted area and threshold value	0.831	0.000	0.000	1.883E-1
8.788	0.238	Equate entropy of thresholded and original distributions	0.665	0.042	0.000	2.543E-2

La tabla 3 proporciona los umbrales del modelo MaxEnt, donde se evalúa cómo diferentes niveles de umbrales afectan el rendimiento del modelo en términos de predicción de áreas habitables para el *Aedes aegypti*. Los umbrales logísticos más bajos, como 0.104, tienden a ser más inclusivos, prediciendo una mayor proporción del área como adecuada para la especie. Esto se refleja en una alta fracción de área predicha (0.902), lo que indica que el modelo está capturando una amplia gama de condiciones, aunque podría incluir algunas áreas no ideales.

A medida que el umbral logístico aumenta, el área predicha fraccional disminuye, lo que significa que el modelo se vuelve más conservador, prediciendo menos área como habitable. Esto se acompaña de un incremento en las tasas de omisión, tanto para los datos de entrenamiento como para los de prueba. Un umbral más alto hace que el modelo sea más

específico, identificando solo las áreas más probables para la presencia de la especie, pero a costa de dejar fuera algunas presencias conocidas, reflejado en mayores tasas de omisión.

La elección del umbral adecuado es crucial, ya que determina el balance entre la sensibilidad (captura de todas las áreas potencialmente habitables) y la especificidad (evitar falsos positivos). Se puede optar por un umbral más bajo para asegurar que no se pierdan posibles áreas habitables o un umbral más alto para enfocarse solo en las áreas más seguras, a costa de excluir algunas áreas donde la especie podría estar presente. Los valores P asociados con cada umbral proporcionan una medida de la confianza estadística en las predicciones del modelo a diferentes niveles de umbral, ayudando a guiar esta decisión.

## **4.2 CURVAS DE RESPUESTA**

Las curvas (Figura 8) muestran cómo cada variable ambiental afecta la predicción de Maxent. Las curvas muestran cómo cambia la probabilidad de presencia predicha a medida que se varía cada variable ambiental, manteniendo todas las demás variables ambientales en su valor de muestra promedio. Tenga en cuenta que las curvas pueden ser difíciles de interpretar si tiene variables fuertemente correlacionadas, ya que el modelo puede depender de las correlaciones de maneras que no son evidentes en las curvas. En otras palabras, las curvas muestran el efecto marginal de cambiar exactamente una variable, mientras que el modelo puede aprovechar conjuntos de variables que cambian juntas.

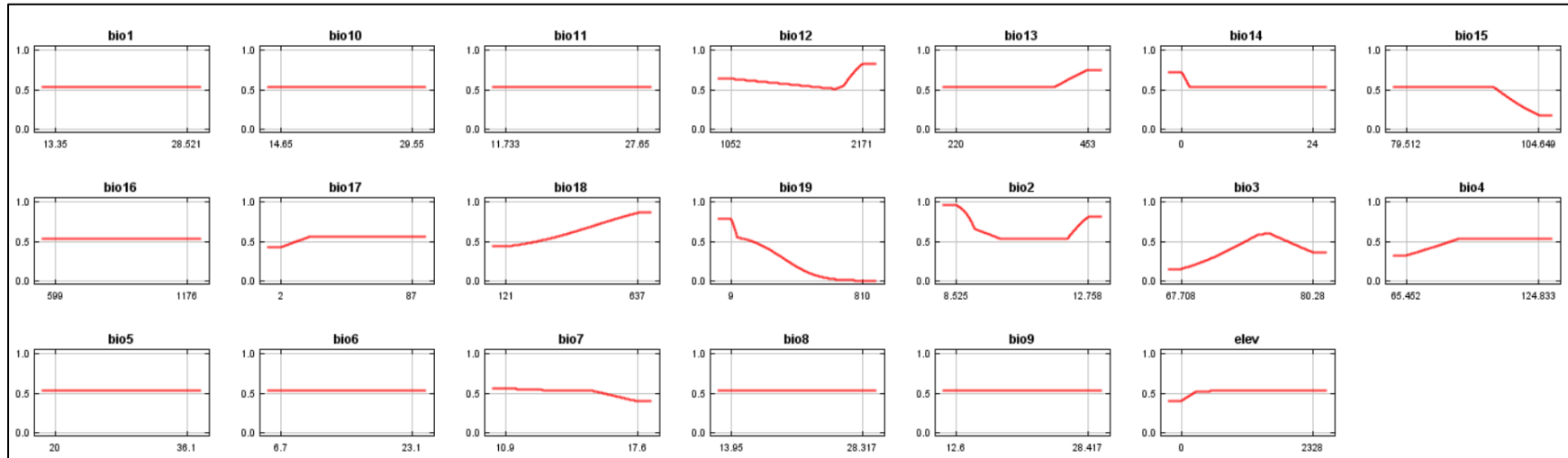


Figura 8: curvas de respuesta marginal

Las gráficas proporcionadas representan las curvas de respuesta para diversas variables bioclimáticas y la elevación, obtenidas a partir del modelo MaxEnt para predecir la distribución del mosquito **Aedes aegypti**. Estas curvas son esenciales para comprender cómo cada variable influye en la idoneidad del hábitat para esta especie, es decir, qué tan favorable es un área específica para su presencia.

En general, muchas de las curvas de respuesta presentan una tendencia plana, lo que indica que ciertas variables tienen un impacto limitado en la predicción del modelo. Por ejemplo, variables como la temperatura media anual (**bio1**), la temperatura media del cuarto trimestre (**bio10**), y la temperatura mínima del mes más frío (**bio11**) muestran muy poca variación en su influencia sobre la idoneidad del hábitat. Esto sugiere que estas variables no son factores determinantes en la distribución de **Aedes aegypti** según el modelo utilizado.

Sin embargo, algunas variables bioclimáticas muestran una relación más clara con la idoneidad del hábitat. La **precipitación anual**

(**bio12**), por ejemplo, muestra una curva en la que la idoneidad aumenta considerablemente a medida que aumenta la precipitación, hasta un cierto punto. Esto indica que **Aedes aegypti** encuentra condiciones más favorables en áreas con mayores niveles de precipitación anual. De manera similar, la **precipitación del mes más húmedo (bio13)** y la **precipitación del trimestre más cálido (bio18)** también tiene una influencia positiva en la idoneidad, sugiriendo que estos periodos de alta precipitación son críticos para la presencia del mosquito.

Por otro lado, la **precipitación del trimestre más frío (bio19)** muestra una relación inversa, donde una menor precipitación en el período más frío parece reducir la idoneidad del hábitat. Esto podría estar relacionado con la capacidad del mosquito para sobrevivir en condiciones más secas durante épocas de bajas temperaturas.

Finalmente, la **elevación** muestra una ligera tendencia ascendente, lo que sugiere que la idoneidad del hábitat podría aumentar con la altura, aunque el impacto de esta variable parece ser moderado.

A diferencia de las curvas de respuesta marginal anteriores de la Figura 8, cada una de las siguientes curvas (Figura 9) representa un modelo diferente, es decir, un modelo Maxent creado utilizando solo la variable correspondiente. Estos gráficos reflejan la dependencia de la idoneidad predicha tanto de la variable seleccionada como de las dependencias inducidas por las correlaciones entre la variable seleccionada y otras variables. Pueden ser más fáciles de interpretar si hay fuertes correlaciones entre las variables.

El análisis de las curvas de respuesta (Figura 9) revela que la especie estudiada muestra preferencias claras por ciertas condiciones climáticas. En general, la probabilidad de presencia disminuye a medida que las temperaturas aumentan, tanto en los meses más cálidos como en los más fríos. Esto sugiere que la especie prefiere climas moderados, evitando extremos térmicos que podrían ser desfavorables para su supervivencia. Además, el **Aedes aegypti** parece evitar áreas con grandes oscilaciones de temperatura a lo largo del año, lo que refuerza su afinidad por ambientes con condiciones climáticas estables.

En cuanto a la precipitación, el **Aedes aegypti** muestra una relación compleja con las variables hídricas. Por un lado, parece haber un rango óptimo de precipitación anual y

mensual, donde la probabilidad de presencia es mayor. Por otro lado, la especie prefiere áreas con precipitaciones más estables y evita entornos con variabilidad estacional o interanual significativa. Esto sugiere una dependencia de la especie en la disponibilidad de agua, especialmente durante los meses secos, lo que podría ser crucial para su distribución.

Finalmente, la elevación también juega un papel importante, ya que la probabilidad de presencia disminuye a medida que aumenta la altitud. Esto podría indicar que el *Aedes aegypti* está adaptada a vivir en altitudes más bajas, donde las condiciones ambientales, como la temperatura y la precipitación, son más favorables.

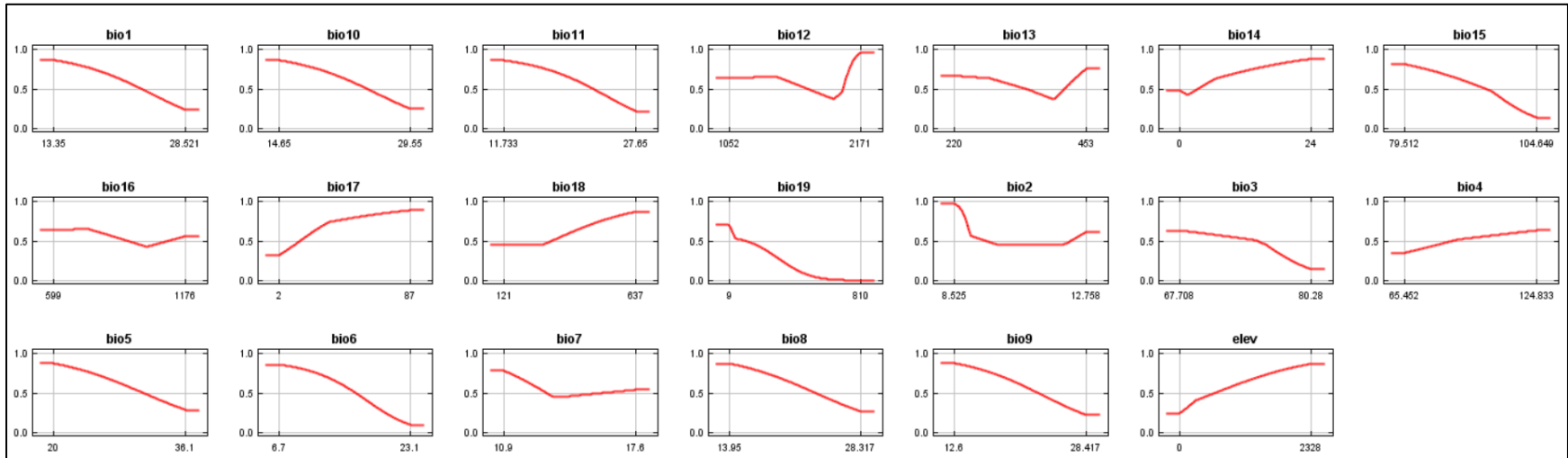


Figura 9: curvas de respuesta

### 4.3 CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES AL MODELO

La tabla 4 muestra las estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo Maxent. Para determinar la primera estimación, en cada iteración del algoritmo de entrenamiento, el aumento en la ganancia regularizada se suma a la contribución de la variable correspondiente, o se resta de ella si el cambio en el valor absoluto de lambda es negativo. Para la segunda estimación, para cada variable ambiental, a su vez, los valores de esa variable en los datos de presencia y antecedentes de entrenamiento se permutan aleatoriamente. El modelo se reevalúa en los datos permutados y la caída resultante en el AUC de entrenamiento se muestra en la tabla, normalizada a porcentajes. Al igual que con la variable jackknife, las contribuciones de las variables deben interpretarse con cautela cuando las variables predictoras están correlacionadas.

TABLA 4: contribuciones relativas de las variables ambientales (agregar nombre de variables)

<b>Variable</b>	<b>Contribución porcentual</b>	<b>Importancia de la permutación</b>
Bio19	53	54.8
Bio12	10.1	2.6
Elevación	9.5	2.3
Bio2	8.7	7.7
Bio3	6.9	14.8
Bio18	4.6	4.6
Bio15	2.9	0.9
Bio4	1.7	4.2
Biografía14	1	4.2
Bio7	0.9	1.4
Bio17	0,4	1.6
Biografía13	0,1	0.9
Bio16	0	0
Bio5	0	0
Bio6	0	0

Biografía 1	0	0
Bio9	0	0
Bio11	0	0
Bio10	0	0
Bio8	0	0

La Figura 10 muestra los resultados de la prueba jackknife de importancia variable. La variable ambiental con mayor ganancia cuando se utiliza de forma aislada es bio19, que por lo tanto parece tener la información más útil por sí misma. La variable ambiental que más disminuye la ganancia cuando se omite es bio19, que por lo tanto parece tener la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables.

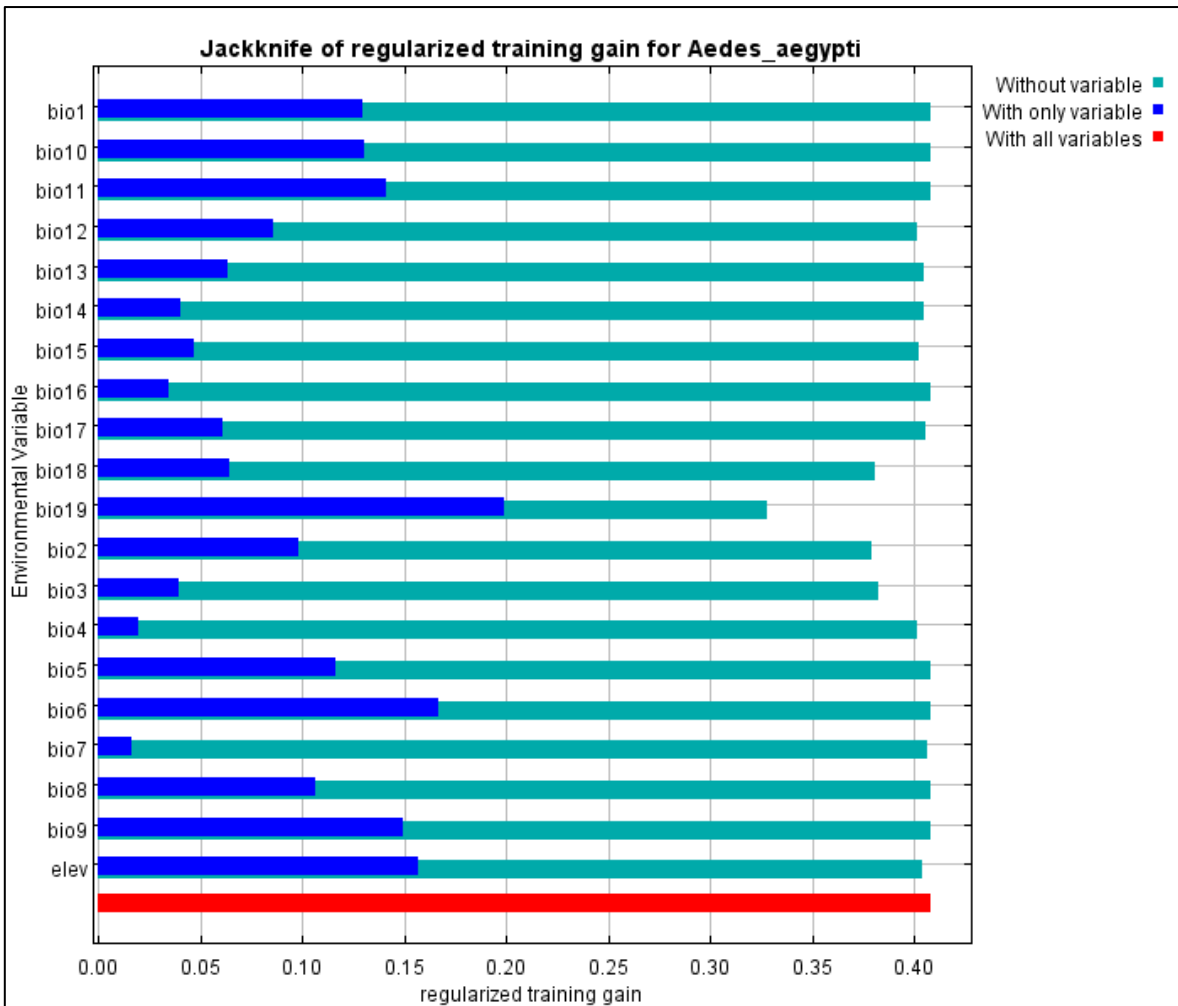


Figura 10: prueba jackknife

La Figura 11 muestra la misma prueba jackknife, utilizando la ganancia de prueba en lugar de la ganancia de entrenamiento. Tenga en cuenta que las conclusiones sobre qué variables son más importantes pueden cambiar, ahora que estamos viendo los datos de prueba.

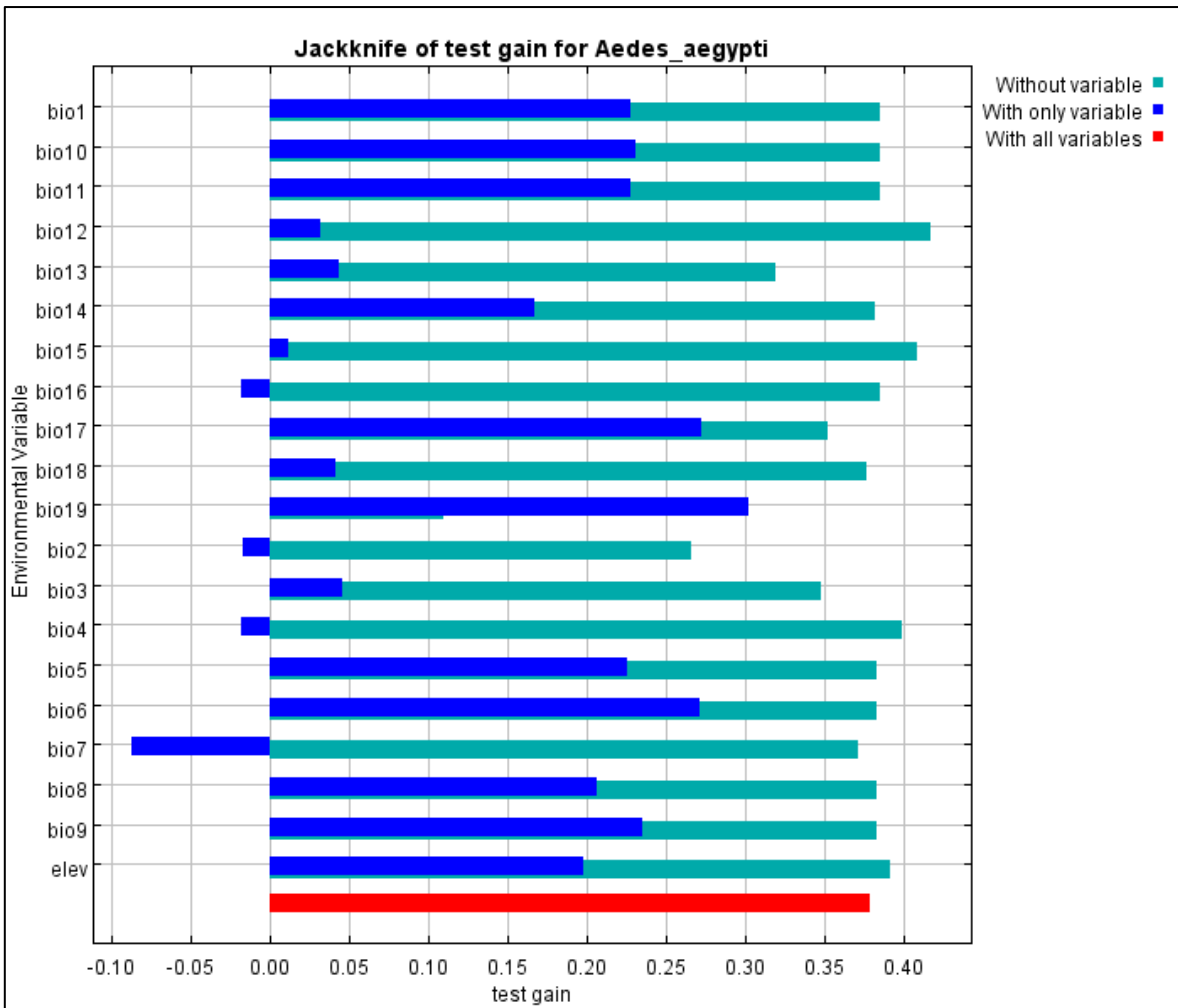


Figura 11: prueba jackknife

Por último, tenemos la misma prueba jackknife, utilizando AUC en los datos de prueba  
Figura 12.

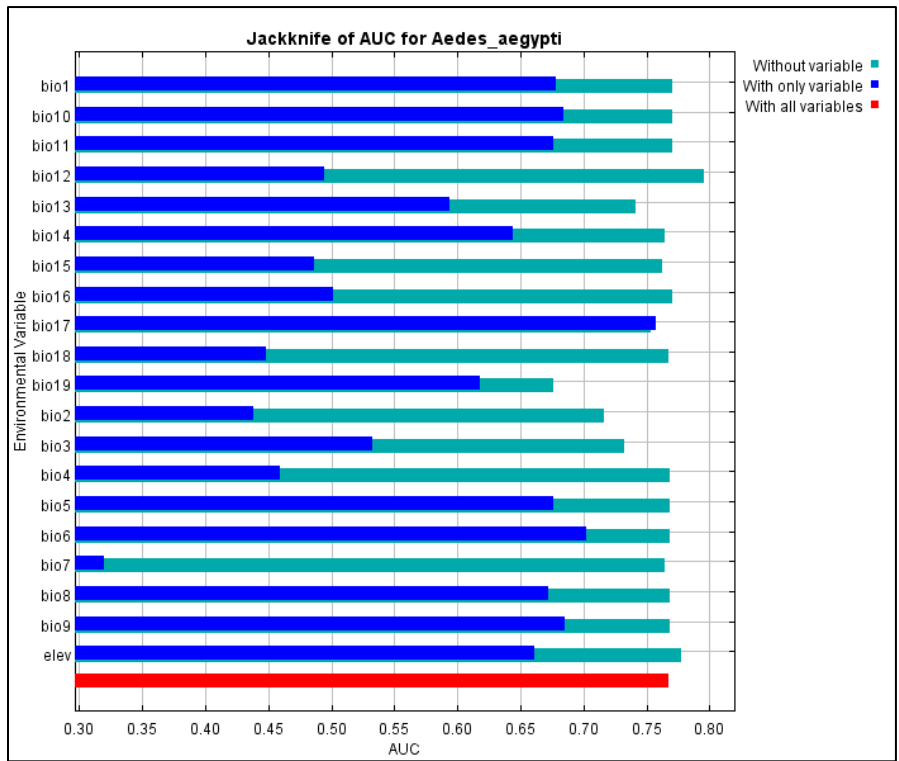


Figura 12: prueba jackknife

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 MAPAS DE IDONIEDAD Y PROBABILIDAD

En el mapa (Figura 13) se muestra los puntos donde se identificó la presencia del *Aedes aegypti* en El Salvador.

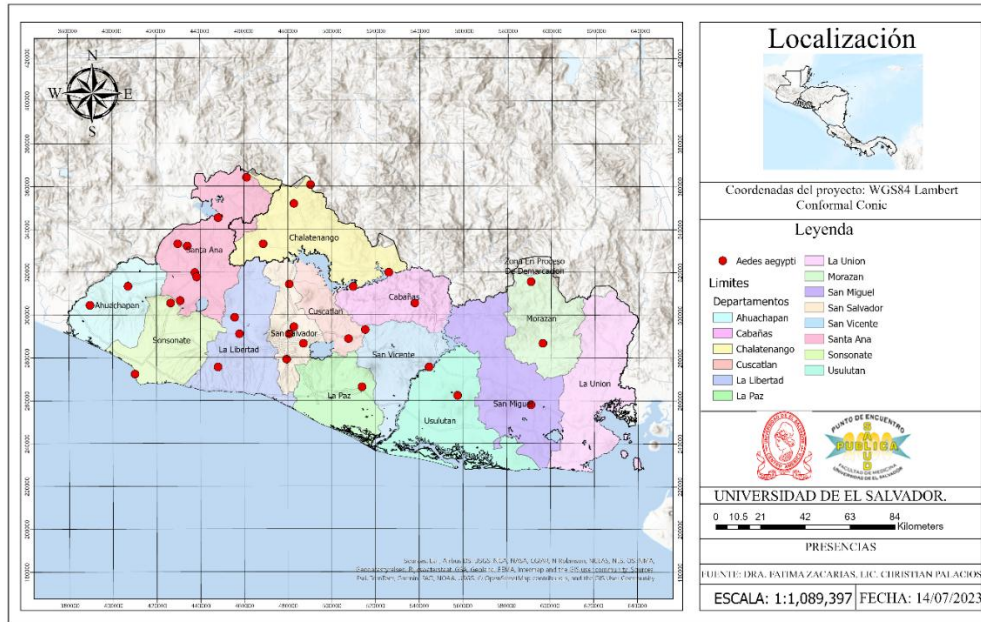


Figura 13: Ubicación de presencias del Aedes\_aegypti

La Figura 14 es una representación del modelo Maxent para Aedes\_aegypti. Los colores más cálidos muestran áreas con mejores condiciones pronosticadas. Los puntos blancos muestran las ubicaciones de presencia utilizadas para el entrenamiento, mientras que los puntos violetas muestran las ubicaciones de prueba. Haga clic en la imagen para ver una versión de tamaño completo.

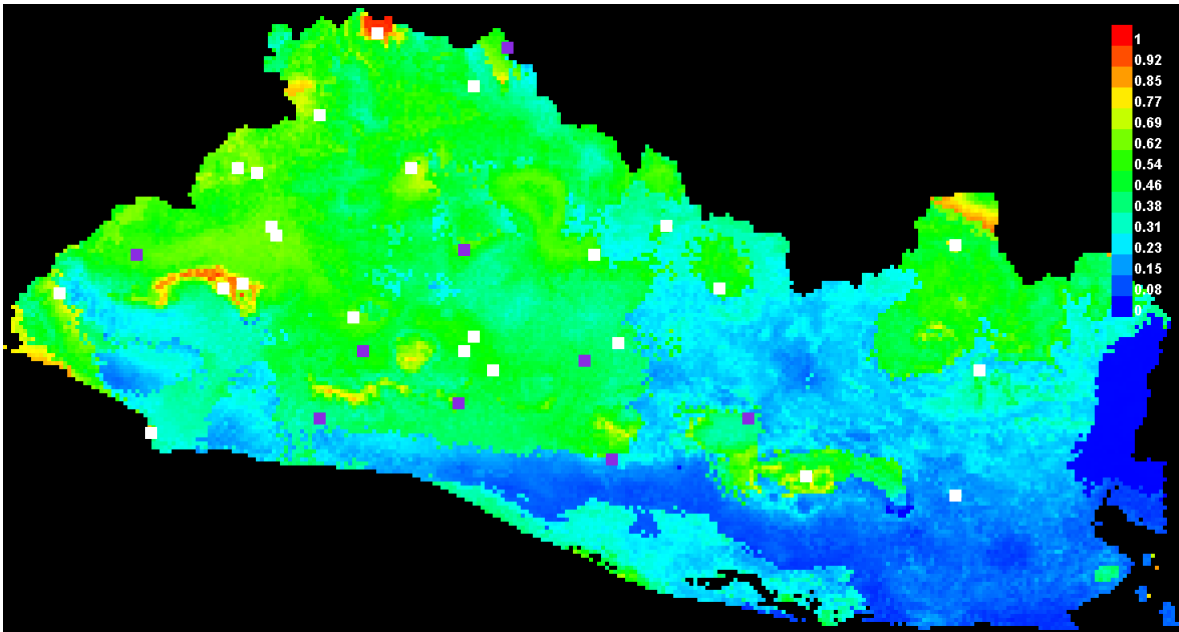


Figura 14: Modelo MAXENT

El mapa (Figura 15) que se presenta es una salida del modelo MaxEnt, utilizado para predecir la distribución potencial del mosquito *Aedes aegypti* en El Salvador. Este mosquito es un vector conocido de enfermedades como el dengue, zika y chikungunya, lo que hace que su monitoreo y control sean vitales para la salud pública.

El modelo MaxEnt utiliza datos de presencia de la especie junto con variables ambientales para estimar la idoneidad del hábitat en diferentes áreas geográficas. En este mapa, los resultados se representan con una escala de colores que va desde el azul oscuro, que indica baja probabilidad de presencia, hasta el amarillo, que sugiere una alta probabilidad de que el mosquito encuentre condiciones favorables en El Salvador.

Se puede notar que las áreas con colores más cálidos, como el amarillo y el verde, se encuentran predominantemente en el norte y algunas partes del oeste de El Salvador. Zonas como Santa Ana, Chalatenango y La Libertad aparecen como áreas críticas con alta idoneidad para *Aedes aegypti*. Estas regiones, por lo tanto, deberían ser priorizadas en esfuerzos de vigilancia y control de la especie.

En contraste, las áreas en azul oscuro, que cubren gran parte del sur del país, presentan una baja idoneidad para el mosquito, lo que indica que es menos probable que el *Aedes aegypti* prospere allí bajo las condiciones ambientales actuales.

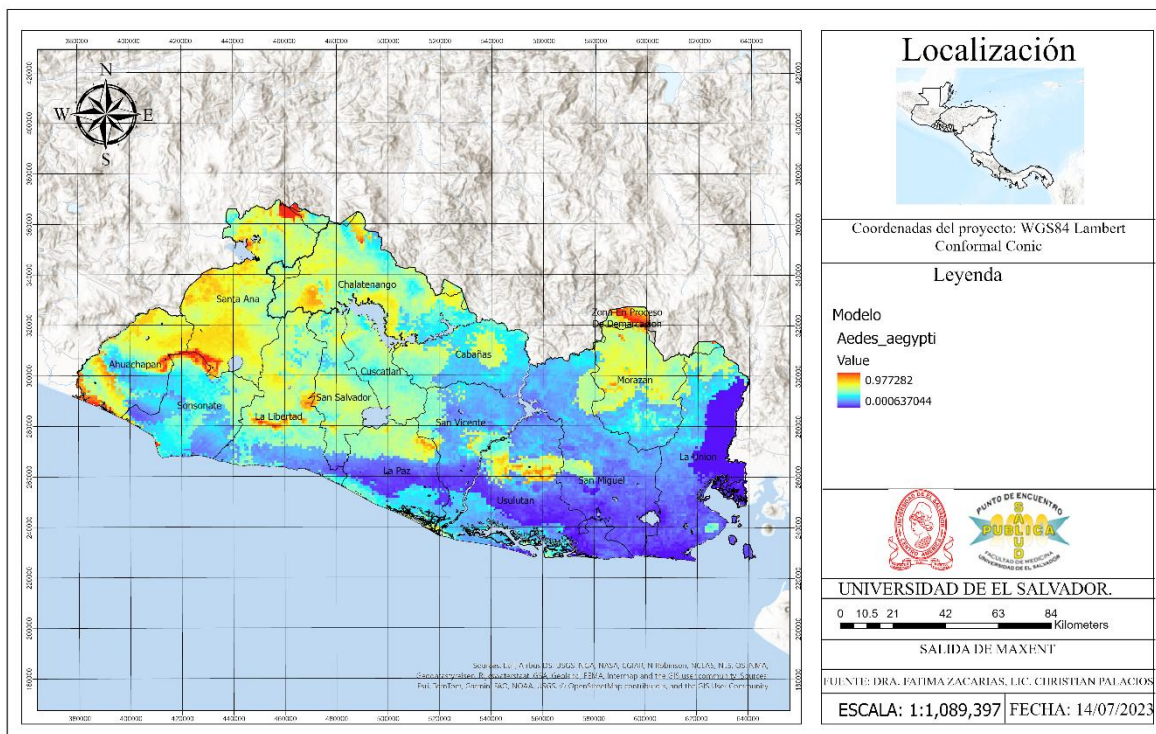


Figura 15: Salida de MAXENT

El mapa (Figura 16) ilustra la distribución potencial del mosquito *Aedes aegypti* en El Salvador, clasificando las áreas del país según la probabilidad de presencia de este vector. A través de una escala de colores, se destacan tres niveles de probabilidad: baja (azul), media (verde) y alta (rojo).

Las áreas en rojo representan zonas de alta probabilidad, donde las condiciones son más propicias para la presencia de *Aedes aegypti*. Estas zonas se encuentran principalmente en el noroeste del país, abarcando departamentos como Santa Ana y Chalatenango, así como en algunas regiones del centro-norte. Dado el alto riesgo que estas áreas presentan, deben ser el foco de las intervenciones de salud pública para prevenir brotes de enfermedades transmitidas por este mosquito.

Las áreas en verde indican una probabilidad media de presencia, y se extienden por partes del centro y norte de El Salvador, incluyendo áreas de San Salvador, Cabañas y La Libertad. Aunque estas regiones no son tan críticas como las rojas, requieren vigilancia constante, ya que pueden convertirse en zonas de mayor riesgo si cambian las condiciones ambientales.

Por último, las zonas en azul muestran áreas con baja probabilidad de presencia del mosquito, ubicadas principalmente en la región sur y este del país, en departamentos como Usulután, San Miguel y La Unión. Estas áreas, al presentar condiciones menos favorables para el *Aedes aegypti*, representan un riesgo menor para la salud pública en términos de transmisión de enfermedades.

Este mapa es una herramienta esencial para dirigir esfuerzos de prevención y control en las áreas de mayor riesgo, permitiendo a las autoridades de salud pública priorizar recursos y acciones en zonas donde el mosquito es más probable que prospere.

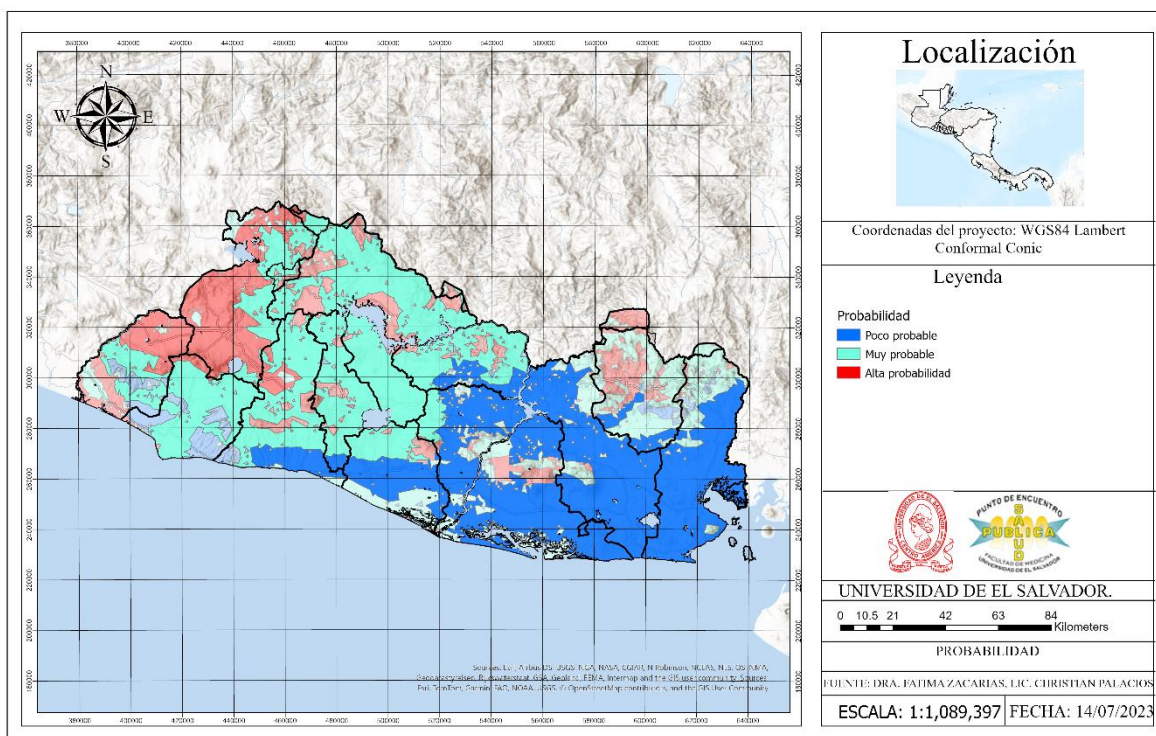


Figura 16: Distribución potencial

Este mapa (Figura 17) muestra la idoneidad de diferentes áreas de El Salvador para el desarrollo del mosquito *Aedes aegypti*, un vector clave en la transmisión de enfermedades como el dengue. En el mapa, las regiones se dividen en dos categorías: áreas idóneas, que están marcadas en rojo, y áreas no idóneas, que están marcadas en gris.

Las zonas en rojo representan áreas donde las condiciones ambientales son favorables para el desarrollo de *Aedes aegypti*. Estas condiciones pueden incluir factores como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de agua estancada, que son esenciales para la reproducción y supervivencia del mosquito. Geográficamente, estas áreas idóneas se concentran principalmente en la región norte del país, abarcando departamentos como Santa Ana, Chalatenango, Cabañas y Morazán, así como algunas partes del oeste, incluyendo áreas de Ahuachapán y La Libertad. Estas zonas representan un riesgo significativo para la proliferación del mosquito, y, por lo tanto, deberían ser priorizadas en las estrategias de monitoreo y control.

Por otro lado, las áreas en gris indican regiones donde las condiciones no son propicias para el desarrollo del mosquito, lo que reduce considerablemente la probabilidad de su presencia. Estas zonas se encuentran principalmente en el sur del país, incluyendo departamentos como San Miguel, Usulután y La Unión, y en algunas áreas costeras. Aunque estas regiones presentan un riesgo menor, es importante mantener una vigilancia constante para detectar cualquier cambio en las condiciones que pudiera hacerlas más susceptibles al desarrollo de *Aedes aegypti*.

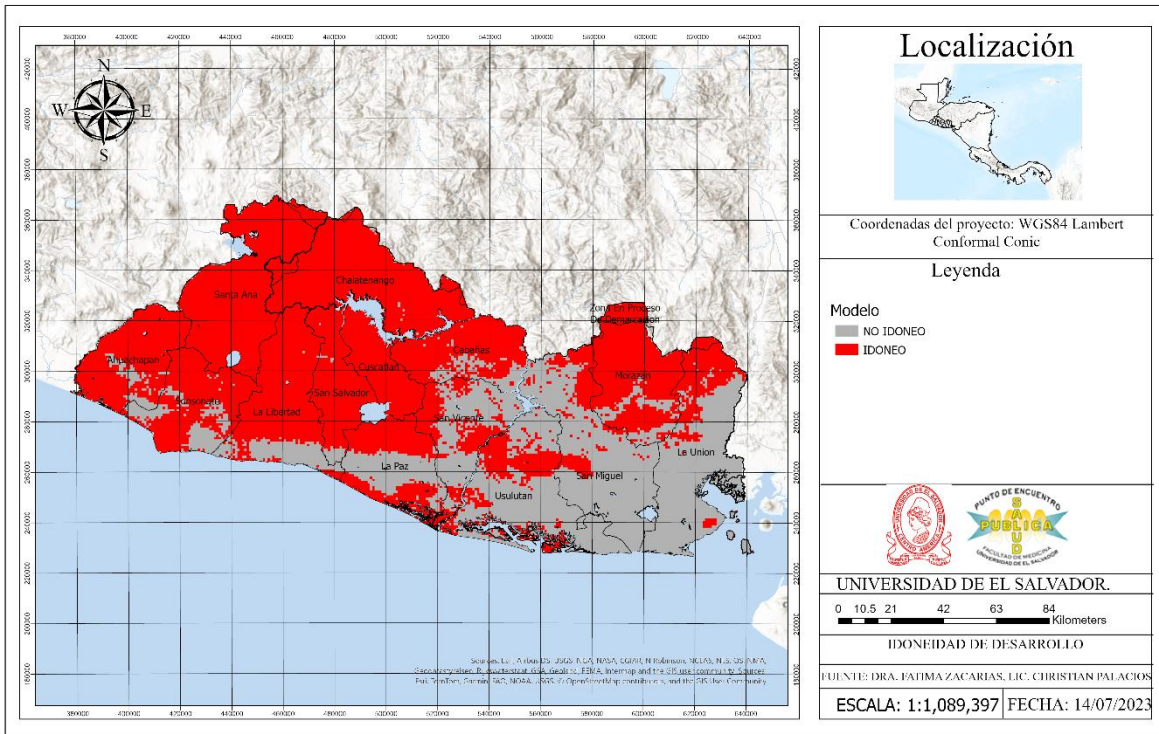


Figura 17: Idoneidad de desarrollo

## CONCLUSIONES

El modelo MaxEnt ha demostrado ser altamente eficaz en predecir la distribución potencial del mosquito *Aedes aegypti* en El Salvador. La precisión del modelo se evidencia en la alineación de las curvas de omisión con la línea de referencia y la consistente reducción de la fracción del área de fondo predicha, lo que valida su robustez y utilidad para la gestión y control de esta especie vectorial.

El análisis de la curva ROC refuerza la confiabilidad del modelo MaxEnt, mostrando una alta sensibilidad, especialmente en escenarios con bajas tasas de falsos positivos. Esto subraya la capacidad del modelo para identificar con precisión las áreas de riesgo, facilitando una planificación más efectiva y una mejor ejecución de las medidas de control dirigidas a *Aedes aegypti*.

Además, el estudio revela que no todas las variables bioclimáticas afectan de igual manera la idoneidad del hábitat para *Aedes aegypti*. Las variables relacionadas con la precipitación resultan ser las más influyentes, mientras que las temperaturas extremas y la estacionalidad tienen un impacto menor. Este hallazgo es crucial para enfocar las estrategias de control en las condiciones y áreas que realmente favorecen la presencia del mosquito.

El análisis sugiere que *Aedes aegypti* está mejor adaptado a climas moderados, con condiciones estables en temperatura y precipitación, evitando así los extremos climáticos y grandes variaciones que podrían comprometer su supervivencia. Esta adaptabilidad climática del mosquito es un factor clave a considerar en la planificación de programas de control de vectores.

La participación de la Universidad de El Salvador en este análisis añade un nivel de confiabilidad y relevancia a los datos presentados. La calidad de la información utilizada es fundamental para guiar políticas de salud pública y estrategias de control de vectores, con el objetivo de reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por *Aedes aegypti* en la región.

Finalmente, el mapa generado proporciona una visión clara y categorizada de las zonas de El Salvador donde la presencia de *Aedes aegypti* es más o menos probable. Las áreas

identificadas en rojo, con alta probabilidad, deben ser priorizadas en las acciones de prevención y control, mientras que las áreas verdes y azules, aunque de menor riesgo, también requieren monitoreo para evitar la expansión del mosquito en el futuro.

## **RECOMENDACIONES**

**Fortalecimiento de la vigilancia epidemiológica:** Es necesario implementar un sistema de vigilancia epidemiológica proactiva en las áreas identificadas como de alto riesgo, como Santa Ana, Chalatenango y La Libertad, para detectar de manera temprana los brotes de dengue. Esto incluye la recolección continua de datos sobre la incidencia de casos y la densidad del vector, lo que permitirá a las autoridades anticiparse a posibles brotes y dirigir las intervenciones con mayor precisión.

**Desarrollo de un programa integral de control vectorial:** Se recomienda diseñar e implementar un programa de control vectorial integrado que no solo se enfoque en el uso de insecticidas, sino también en la reducción de criaderos, promoviendo la participación comunitaria. Esto debería incluir la distribución de materiales preventivos, campañas de fumigación focalizadas y educación sobre medidas de protección personal, especialmente en las áreas más vulnerables.

**Monitoreo y adaptación a las condiciones climáticas:** Integrar las variables climáticas en los sistemas de salud pública para ajustar las intervenciones en función de las condiciones ambientales cambiantes. El aumento de la temperatura y la precipitación favorecen la proliferación del *Aedes aegypti*, por lo que es crucial que las políticas de salud pública adapten sus estrategias según los patrones climáticos para anticiparse a los picos de transmisión.

**Implementar campañas de prevención estacional:** Desarrollar campañas de salud pública dirigidas específicamente a las temporadas de mayor actividad del mosquito, como las épocas de lluvia. Estas campañas deben incluir la distribución de insecticidas, mosquiteros, y la promoción de la eliminación de posibles criaderos en viviendas y espacios públicos. Además, es importante capacitar a la población sobre los síntomas del dengue para una detección temprana.

**Fortalecer la coordinación intersectorial:** La lucha contra el dengue requiere una respuesta intersectorial. Se debe fomentar la colaboración entre el Ministerio de Salud, las autoridades locales, y otras instituciones públicas y privadas. Esto asegurará una intervención más coordinada en áreas como la gestión de residuos sólidos, el saneamiento y la provisión de servicios básicos, esenciales para reducir los criaderos de mosquitos.

**Uso de tecnología y modelos predictivos para la toma de decisiones:** Promover el uso de herramientas tecnológicas como el modelado del nicho ecológico (MaxEnt) en la

planificación y evaluación de las intervenciones de salud pública. Estas herramientas permiten identificar con mayor precisión las zonas de riesgo y optimizar el uso de recursos, lo que es clave para una respuesta eficiente y efectiva ante el dengue.

## FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Ancaes M, Peterson AT. 2006. Climate change effects on neotropical manakin diversity based on ecological niche modeling. *The Condor* 108: 778–791.
2. Araújo MB, Thuiller W, Williams PH, Reginster I. 2005. Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: Implications for conservation planning. *Global Ecology and Biogeography* 14: 17–30.
3. Busby JR. 1991. BIOCLIM - A Bioclimatic Analysis and Prediction System. *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*. Margules CR, Austin MP eds. pp. 64-68. CSIRO, Canberra.
4. Crisci JV, Sala OE, Katinas L, Posadas P. 2006. Bridging historical and ecological approaches in biogeography. *Australian Systematic Botany* 19: 1-10.
5. Escalante T. 2007. Integrando biogeografía histórica y ecológica: El caso de los mamíferos terrestres de México. *Biogeografía* 2: 13-16.
6. Escalante T, Sánchez-Cordero V, Morrone JJ, Linaje M. 2007. Areas of endemism of Mexican terrestrial mammals: A case study using species' ecological niche modeling, Parsimony Analysis of Endemicity and Goloboff fit. *Interciencia* 32(3): 151-159.
7. Espinosa D, Aguilar C, Escalante T. 2001. Endemismo, áreas de endemismo y regionalización biogeográfica. *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: Teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*. Lorente J, Morrone JJ eds. pp. 31-37. Las Prensas de Ciencias, México, D. F.
8. Grinnell J. 1917. The niche-relationships of the California thrasher. *Auk* 34: 427-433.
9. Graham CH, Ferrier S, Huettman F, Moritz C, Peterson AT. 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution* 19(9): 497- 503.
10. Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993–1009.

12. Guisan A, Zimmermann NE. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147–186.
13. Hutchinson GE. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology* 22: 415–427.
14. Illoldi-Rangel P, Sánchez-Cordero V, Peterson AT. 2004. Predicting distributions of Mexican mammals using Ecological Niche Modeling. *Journal of Mammalogy* 85(4): 658–662.
15. McMahon JP, Hutchinson MF, Nix HA, Ord KD. 1996. ANUCLIM Version 1. User's Guide. Canberra: ANU, CRES. [ANUCLIM 5.0: <http://cres.anu.edu.au/outputs/anuclim.html>.]
16. Morrone JJ. 1994. On the identification of areas of endemism. *Systematic Biology* 43: 438-441.
17. Nix HA. 1986. A biogeographic analysis of Australian Elapid snakes. In: *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. (ed.) R. Longmore pp. 4–15. Australian Flora and Fauna Series Number 8. Australian Government Publishing Service: Canberra.
18. Peterson AT. 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics* 3:59-72.
19. Peterson AT, Ball LG, Cohoon KP. 2002a. Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods. *Ibis* 144 (on-line): E27–E32
20. Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Sanchez-Cordero V, Soberon J, Buddemeier RH, Stockwell DRB. 2002b. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416: 626-629
21. Peterson AT, Nakazawa Y. 2008. Environmental data sets matter in ecological niche modeling: An example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography* 17: 135-144.
22. Phillips, SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: Brodley, CE (ed.), *Machine Learning: Proceedings of the Twenty-first Century International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada. ACM Press, p. 655-662.
23. Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231 259.

24. Rojas-Soto OR, Alcántara-Ayala O, Navarro AG. 2003. Regionalization of the avifauna of the Baja California Peninsula, México: A parsimony analysis of endemism and distributional modeling approach. *Journal of Biogeography* 30: 449-461.
25. Ruggiero A, Ezcurra E. 2003. Regiones y transiciones biogeográficas: Complementariedad de los análisis en biogeografía histórica y ecológica. Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía. Morrone JJ, Llorente J eds. Pp. 141–154. Las Prensas de Ciencias, UNAM, Mexico, D. F.
26. CALDERÓN-ARGUEDAS O, TROYO A, SOLANO M E. La participación comunitaria como recurso para la prevención del dengue en una comunidad urbana de San José, Costa Rica. *Rev Costar Sal Pub* 2005; 14: 51-7.
27. PIANKA E. Competition and niche overlap. A method of measuring them. *Ecology* 1976; 53: 687-92.

## ANEXOS

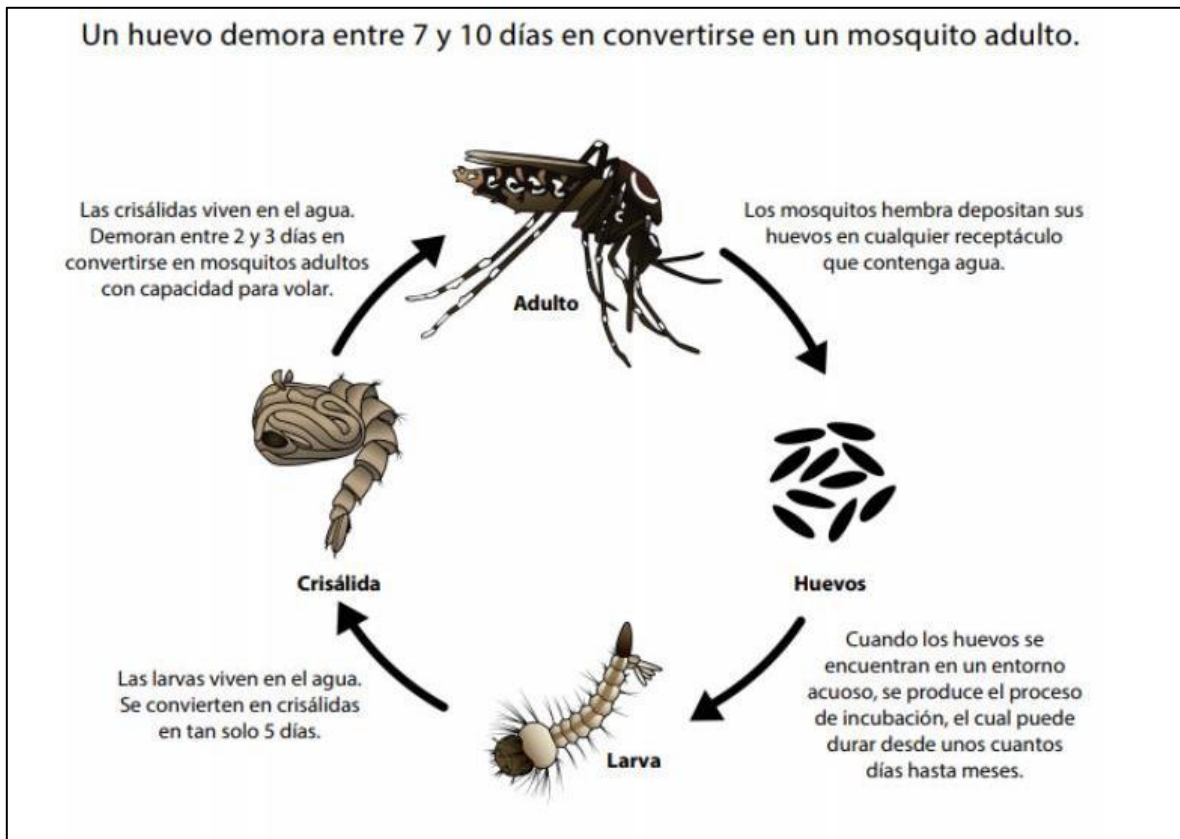


Figura 1: Ciclo de vida del mosquito *Aedes aegypti*. Fuente: Briones et al., 2018 (23).

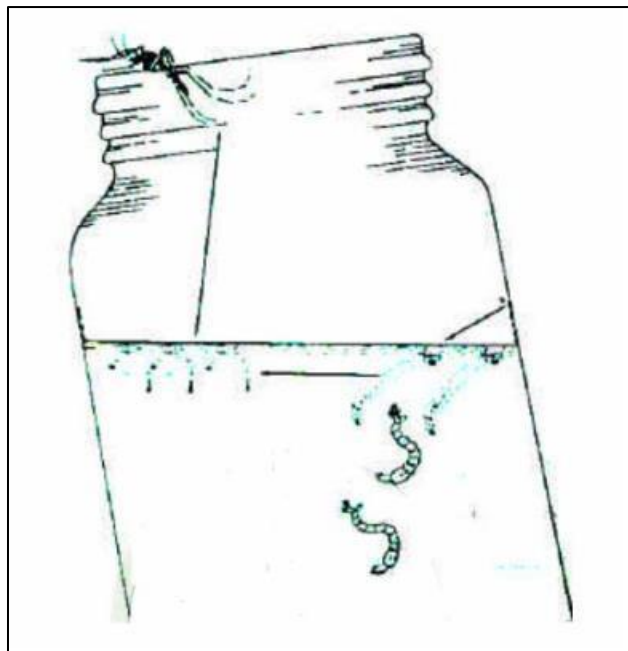


Figura 2: Ciclo de vida del Aedes Aegypti Fuente: Thirión-Icaza, J. 2003 (31).

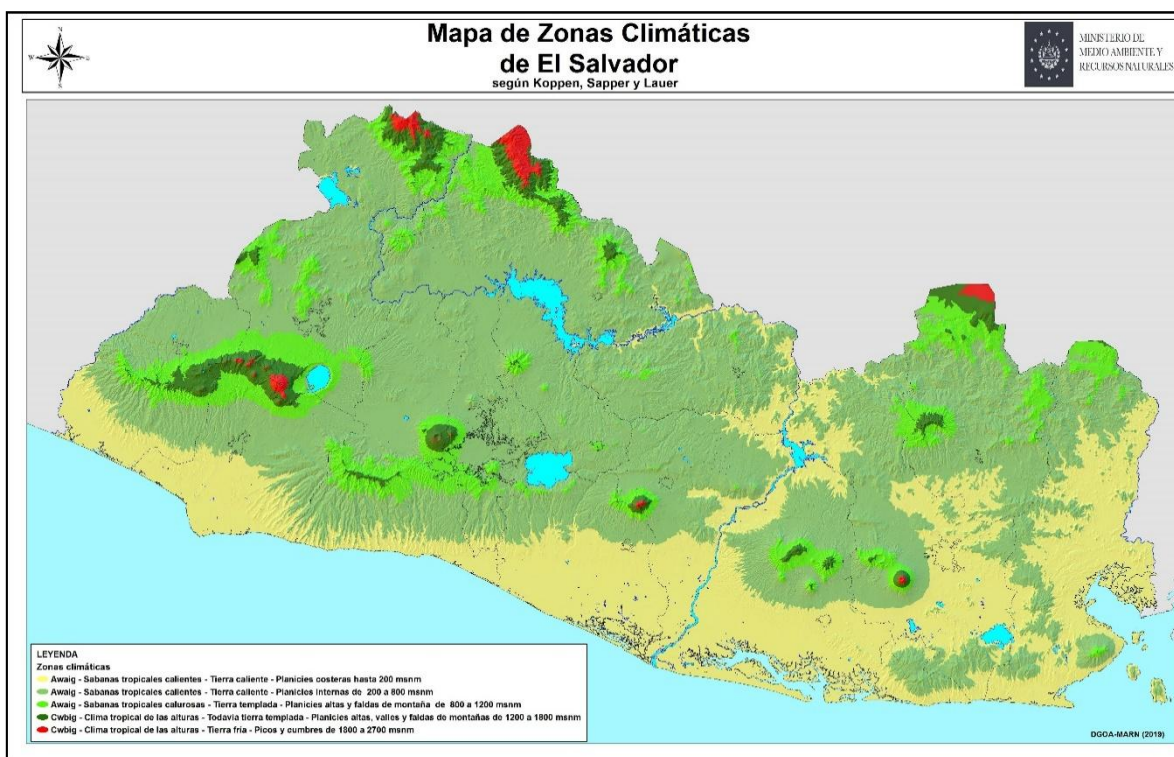


Figura 3: Zonas climáticas según Koppen en El Salvador Fuente: MARN.

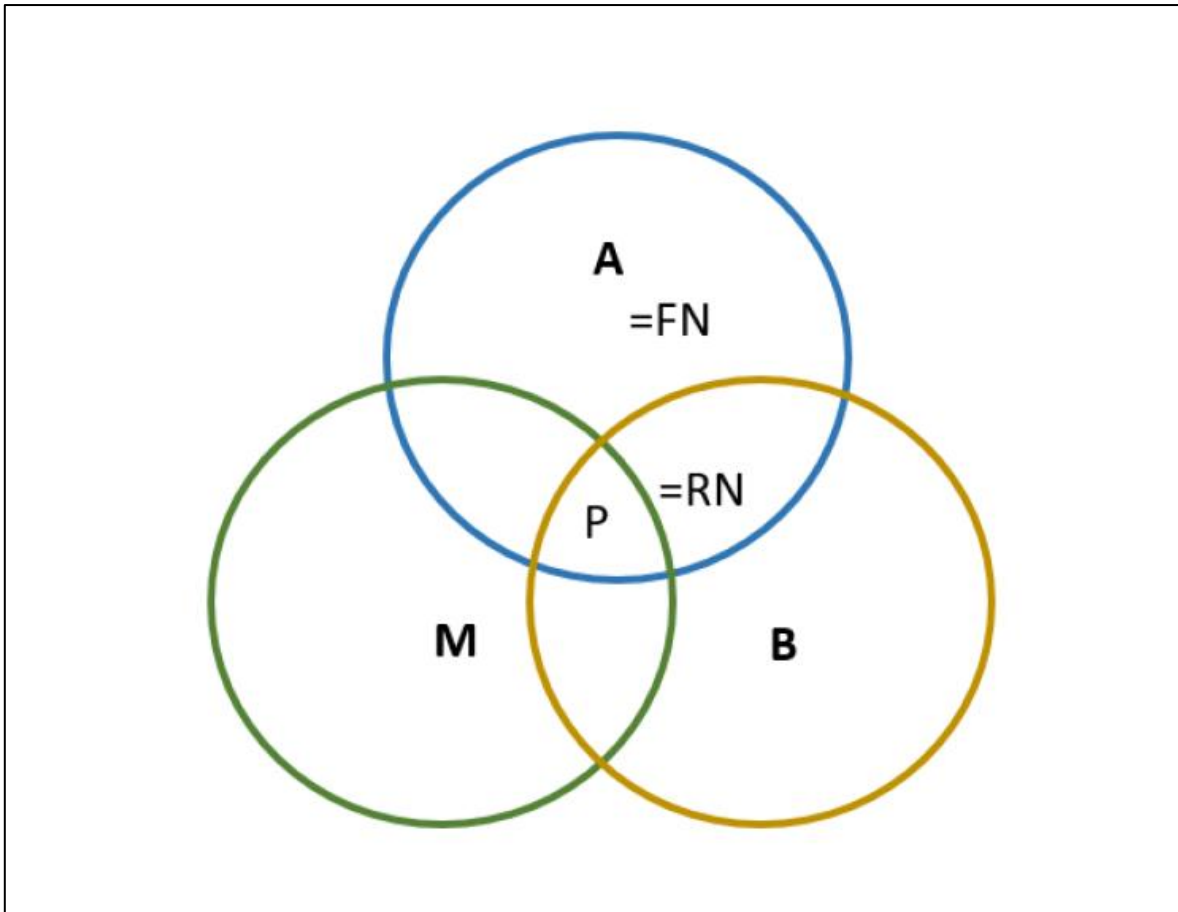


Figura 4:El diagrama BAM de Soberón y Peterson (2005) ilustra el concepto de nicho utilizando en el modelo de nicho ecológico. La A representa el nicho fundamental (FN) expresado en un espacio geográfico. B representa a los requisitos bióticos de la especie, por lo que la intersección entre A y B representa el espacio geográfico del nicho realizado. M representa las áreas accesibles para la especie. Por lo tanto, P en este diagrama refleja la distribución real de la especie.