



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**



**INSTITUTO INTERAMERICANO DE
TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA
(IITCA)**

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL
Aedes aegypti ACTUAL Y SU TRANSFERENCIA
ESPACIO-TEMPORAL PARA MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AGUA

**Presenta: Lic. En Geología Ambiental y Recursos Hídricos Víctor Josué
Arriaga Núñez**

Tutor Académico

Dr. en C.A. Miguel Ángel Gómez Albores

Tutor Adjunto

Dr. en C.A. Raymundo Ordoñez Sierra

Toluca, México

Diciembre de 2020

INDICE

Capítulo 1 Introducción	10
1.1.- Antecedentes	12
1.1.1.- La GIRH y la salud	12
1.1.2.- Método de clasificación climática	13
1.1.3.-Dengue	19
1.1.4.- Modelación de la distribución potencial del <i>Aedes aegypti</i> basado en un modelo de nicho.....	20
1.2.- Justificación contextual y científica	22
1.3.- Hipótesis	23
1.4.- Objetivos	23
1.4.1.- Objetivo General	23
1.4.2.- Objetivos Específicos.....	23
Capítulo 2 Marco teórico conceptual.....	24
2.1.- ¿Qué es un vector?	24
2.2.- Sistema de clasificación de enfermedades	25
2.3.- Enfermedad del dengue.....	25
2.4.- Ciclo de vida del <i>Aedes Aegypti</i>	27
2.5.- Nicho Ecológico	28
2.5.1.- Modelado de nicho ecológico vs áreas de distribución potencial.....	29
2.6.- Variables bioclimáticas.....	31
2.7.- Métodos de Validación.....	33
2.8.- Modelos de circulación global	34
2.8.1.- Forzamientos radiativos.....	35
2.9.- DAYMET	40
2.10.- Maxent	41
2.11.- Humedad relativa.....	42
2.12.- Variables socioeconómicas.....	44
2.13.- Sobreajuste de modelos	45
2.14.- Sensor MODIS	46
2.14.1- Índices de vegetación	47
2.15.- Sistemas de clasificación de datos para categorizar	48
2.16.- Análisis clúster	49
Capítulo 3 Metodología	50
3.1.- Zona de estudio	50
3.2.- Recopilar registros de la especie <i>Aedes Aegypti</i>	54

3.3.- Depuración de las bases de datos de salud	56
3.3.1.- Cálculo de las tasas de incidencia	57
3.3.1.1.- Estructuración para cálculo de tasas de incidencia	57
3.3.1.2.- Indicadores de Frecuencia.....	57
3.4.- Generar las variables ambientales: las bioclimáticas, la humedad relativa y el índice NDVI.	59
3.4.1.- Variables bioclimáticas	59
3.4.2.- NDVI	62
3.4.3.- Humedad Relativa	63
3.4.4.-Variables socioeconómicas	64
3.4.5.- Modelos de circulación global.....	67
3.6.- Modelar la distribución potencial con base en la caracterización ambiental de nicho el <i>Aedes aegypti</i>	68
3.6.1.- Generar la matriz de correlación y selección de variables	68
3.7.- Evaluar la fiabilidad del modelo	69
3.8.- Calculo de la incidencia acumulada por zonas	71
3.9.-Transferencia del modelo de mayor rendimiento resultante al 2050 y 2070..	72
3.10.-Dinámica de áreas de distribución potencial futuras	73
3.11.-Ensamble de modelos.....	75
Capítulo 4 Resultados.....	77
4.1.- Datos de presencia	77
4.2.- Tasas de incidencia, mortalidad y letalidad por localidad del dengue.....	79
4.3.- Modelo resultante	84
4.4.-Relación de casos/modelo.....	88
4.5.- Zonas de riesgo	89
4.6.- Escenarios de cambio climático.....	93
4.6.1.- Extracción de valores promedio de las variables futuras.....	95
4.6.2.- Mapas de escenarios de cambio climático	97
4.6.3.- Mapas de ensamble de modelos	102
Capítulo 5 Conclusiones	111
Capítulo 6 Referencias bibliográfica.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA EN MÉXICO	18
<i>FIGURA 2-1 CICLO DE VIDA DEL Aedes Aegypti</i>	28
FIGURA 2-2 DIAGRAMA DE BAM.....	29
FIGURA 2-3 FORZAMIENTOS RADIATIVOS.....	36
<i>FIGURA 2-4 VALORES DEL NDVI Y SU ASOCIACIÓN A LAS PLANTAS</i>	47
FIGURA 3-1 MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	50
FIGURA 3-2 MAPA DE ALTITUD DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	52
FIGURA 3-3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA A EMPLEAR.....	53
FIGURA 3-4 MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE PRESENCIAS LEJANAS A LOCALIDADES CON CASOS DE DENGUE	55
FIGURA 3-5 MÉTODO DE ELIMINACIÓN DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL DE LAS PRESENCIAS DEL <i>Aedes Aegypti</i>	55
FIGURA 3-6 RELACIÓN DE LAS 3 BASES DE DATOS: POBLACIÓN, DENGUE Y DEFUNCIONES.....	57
FIGURA 3-7 USO DEL MÓDULO GDAL	59
FIGURA 3-8 MACROMODELADOR PARA GENERAR PROMEDIO MENSUAL	60
FIGURA 3-9 USO DEL MÓDULO BIOCLIMATIC VARIABLES.....	60
FIGURA 3-10 MAPA DEL PROMEDIO DEL NDVI EN MÉXICO	62
FIGURA 3-11 MACROMODELADOR PARA EL CÁLCULO DE LA HUMEDAD RELATIVA.....	63
FIGURA 3-12 MAPA DE LA HUMEDAD RELATIVA EN MÉXICO	63
FIGURA 3-13 BASE DE DATOS DEL ITER 2010 EN TERRSET	64
FIGURA 3-14 PORCENTAJE DE VIVIENDA CON ACCESO A DRENAJE A NIVEL MUNICIPAL..	65
FIGURA 3-15 USO DEL MÓDULO HABITAT BIODIVERSITY	69
FIGURA 3-16 EXTRACCIÓN DE LOS CASOS EN EL MODELO	71
FIGURA 3-17 ALGEBRA DE MAPAS PARA OBTENER TASA DE INCIDENCIA	72
FIGURA 3-18 USO DEL MÓDULO CROSSTAB	73
FIGURA 3-19 SALIDA DEL MÓDULO CROSSTAB.....	74
FIGURA 3-20 MACROMODELADOR DE MÁSCARAS DE MODELOS CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES	75
FIGURA 3-21 USO DEL MÓDULO CLÚSTER	76
FIGURA 4-1 MAPA DE PRESENCIA DEL Aedes Aegypti.....	78
FIGURA 4-2 MAPA DE TASA DE INCIDENCIA ACUMULADA DEL DENGUE CLÁSICO EN MÉXICO POR LOCALIDAD PARA EL PERIODO 2009-2015	79
FIGURA 4-3 MAPA DE TASA DE INCIDENCIA ACUMULADA DEL DENGUE HEMORRÁGICO EN MÉXICO POR LOCALIDAD PARA EL PERIODO 2009-2015	80
FIGURA 4-4 MAPA DE TASA DE INCIDENCIA ACUMULADA DEL DENGUE CLÁSICO Y HEMORRÁGICO EN MÉXICO POR LOCALIDAD PARA EL PERIODO 2009-2015	81
FIGURA 4-5 MAPA DE TASA DE MORTALIDAD DEL DENGUE EN MÉXICO POR LOCALIDAD PARA EL PERIODO 2009-2015	82
FIGURA 4-6 MAPA DE LETALIDAD DEL DENGUE EN MÉXICO POR LOCALIDAD PARA EL PERIODO 2009-2015	83
FIGURA 4-7 CURVA ROC DEL MODELO RESULTANTE	85
FIGURA 4-8 MAPA DE IDONEIDAD AMBIENTAL DEL Aedes Aegypti.....	87
<i>FIGURA 4-9 MAPA BINARIO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL Aedes Aegypti</i>	87
FIGURA 4-10 DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA GENERAR LAS 4 CATEGORÍAS DE RIESGO	88
FIGURA 4-11 MAPA DE ZONAS DE RIESGO PARA LA TRANSMISIÓN DEL DENGUE.....	89
FIGURA 4-12 GRÁFICA DE LAS ÁREAS POR MODELO Y RCP PARA EL 2050.....	93
FIGURA 4-13 GRÁFICA DE LAS ÁREAS POR MODELO Y RCP PARA EL 2070.....	94
FIGURA 4-14 DINÁMICA DEL MODELO GFDLM_CM3 PARA 2050, 2070 CON RCP 4.5 Y 8.5....	98
FIGURA 4-15 DINÁMICA DEL MODELO MPIESMLR PARA 2050, 2070 CON RCP 4.5 Y 8.5	99
FIGURA 4-16 DINÁMICA DEL MODELO CNRMC5 PARA 2050, 2070 CON RCP 4.5 Y 8.5.....	100
FIGURA 4-17 DINÁMICA DEL MODELO HADHEM2ES PARA 2050, 2070 CON RCP 4.5 Y 8.5	101
FIGURA 4-18 ENSAMBLE DEL MAPA DE RIESGO RCP 4.5 AÑO 2050	103

FIGURA 4-19 ENSAMBLE DEL MAPA DE RIESGO RCP 8.5 AÑO 2050	105
FIGURA 4-20 ENSAMBLE DEL MAPA DE RIESGO RCP 4.5 AÑO 2070	107
FIGURA 4-21 MAPA DE RIESGO RCP 8.5 AÑO 2070	110

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1-1 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA EN MÉXICO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE GARCÍA, 2004.)	14
TABLA 1-2 MODIFICACIÓN A LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA (GENERAL)	15
TABLA 1-3 CONDICIONES DE OSCILACIÓN TÉRMICA ANUAL DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES.....	15
TABLA 1-4 MODIFICACIÓN AL CLIMA AF	15
TABLA 1-5 MODIFICACIONES AL CLIMA AM	16
TABLA 1-6 MODIFICACIONES AL CLIMA AW	16
TABLA 1-7 MODIFICACIONES AL GRUPO DE CLIMAS BS	16
TABLA 1-8 CONDICIONES DE CLIMAS SECOS (TEMPERATURA)	16
TABLA 1-9 TIPOS DE CLIMA CF Y CW DE KÖPPEN	17
TABLA 1-10 MODIFICACIONES AL CLIMA C(W)	17
TABLA 1-11 MODIFICACIONES A LOS CLIMAS CS	17
TABLA 1-12 MODIFICACIONES AL GRUPO E	18
TABLA 2-1 FIEBRES VIRALES TRANSMITIDAS POR ARTRÓPODOS Y FIEBRES VIRALES HEMORRÁGICAS	25
TABLA 2-2 RELACIÓN ENTRE NICHOS Y ÁREAS	30
TABLA 2-3 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES BIOCLIMÁTICAS.....	31
TABLA 2-4.-MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL	37
TABLA 3-1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES BIOCLIMÁTICAS.....	61
TABLA 3-2 CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES FINALES.....	66
TABLA 3-3 VARIABLES DESCARGADAS PARA CADA MODELO	67
TABLA 4-1 EXTRACCIÓN DE CASOS PREDICHOS DENTRO DEL MODELO POR AÑO	90
TABLA 4-2 VALORES PROMEDIO DE LAS VARIABLES POR CATEGORÍA DE RIESGO.....	91
TABLA 4-3 CARACTERÍSTICAS POR CATEGORÍA.....	92
TABLA 4-4 VALORES PROMEDIO DE LAS VARIABLES POR MODELO PARA EL AÑO 2050 ...	95
TABLA 4-5 VALORES PROMEDIO DE LAS VARIABLES POR MODELO PARA EL AÑO 2070 ...	96
TABLA 4-4-6 POBLACIÓN TOTAL EN ZONA DE RIESGO.....	108

Resumen

El estudio actual de las principales enfermedades transmitidas por vectores deber ser constante y enfocarse en la dinámica de su principal vector de transmisión, el dengue transmitido por el mosquito *Aedes aegypti* tiene la capacidad de desarrollarse en la República Mexicana, dicha enfermedad se ha visto en aumento por ello es de suma importancia conocer las zonas propensas donde se puede desarrollar el mosquito.

El presente trabajo modeló y transfirió al futuro la distribución potencial del vector *Aedes aegypti* que transmite el dengue en México, dicho modelo analizó y encontró áreas con mayor riesgo para la transmisión del dengue, y se realizó en 5 fases o etapas: 1) revisión y búsqueda de literatura de las características del mosquito y sus presencias georreferenciadas en México, el filtrado y análisis de tasas de incidencia de casos del dengue a nivel nacional en el periodo 2009 a 2015 con sus respectivos indicadores de frecuencia (tasa de incidencia acumulada del dengue clásico y dengue hemorrágico, tasa de mortalidad del dengue, letalidad del dengue) a nivel localidad, 2) generación de las variables para el modelamiento como lo fueron las 19 variables bioclimáticas, promedio del NDVI (índice diferencial de vegetación normalizado) en épocas de lluvia, porcentaje de casas con acceso a drenaje a nivel municipal en el país y la humedad relativa del aire del periodo de lluvias 3) generación y transferencia del modelo, primero con las 22 variables, seleccionando las del mayor aporte al modelo, quedando el NDVI, la humedad relativa del aire, el porcentaje de drenaje, las bio 6 (temperatura media del cuarto más cálido), bio 10 (precipitación del mes más seco), y la bio 16 (precipitación del cuarto más húmedo del año, 4) Validación del modelo con métodos de remuestreo como el bootstrap y cross-validation teniendo un valor de área bajo la curva de 0.89 considerando que el modelo es bueno prediciendo, 5) en esta fase se realizaron mapas de riesgo para la transmisión del dengue.

Dentro de los principales resultados obtenidos fueron los mapas de idoneidad ambiental a nivel nacional y distribución potencial, donde el primero señala la probabilidad de que la especie en este caso el mosquito se pueda desarrollar en esa zona, siendo 0% lo menos idóneo para su desarrollo y 100% lo más apto para su ciclo de vida completo, y el segundo señalando completamente sí en el área señalada se puede desarrollar o no el mismo.

Otro resultado importante fue la identificación de zonas principales de transmisión y su asociación con los casos que se encontraron dentro de estas mismas zonas, teniendo una tasa de incidencia acumulada para 3 categorías de riesgo en todo el país (bajo, medio y alto), donde la categoría con mayor riesgo presentaba la mayor tasa de incidencia.

También gracias a la transferencia de dichos modelos a futuro se proyectaron a 2 escenarios futuros (2050 y 2070) con características tanto pesimistas (RCP 8.5) como optimistas (RCP 4.5) encontrando así zonas en el futuro donde se podrá desarrollar el mosquito, también a partir de estos datos y modelos se generaron 4 únicos modelos de riesgo: año 2050 RCP 4.5, año 2050 RCP 8.5, año 2070 RCP 4.5 y año 2070 RCP 8.5.

A partir de estas proyecciones además se encontraron 5 focos principales de riesgo a nivel nacional que son tanto constantes en cada una de las proyecciones como nuevos respecto al escenario base, y que además coinciden con grandes zonas urbanas como lo son: el valle de México, Valle de Toluca, Puebla, Guadalajara, Monterrey, Sinaloa en su mayor extensión territorial y la península de Yucatán que será una constante tanto en el modelo base como en cada uno de los escenarios.

Con lo anterior se analizó que existirá tanto un incremento en el área afectada así como nuevas áreas de desarrollo del mosquito y posible desarrollo de la enfermedad del dengue, por lo que es muy probable que dichas áreas y poblaciones no se encuentren preparadas en cuestión de salud pública y prevención para dicha enfermedad.

Capítulo 1 Introducción

El agua es un factor muy importante en el desarrollo económico y social y, al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. A pesar de ello, el agua es solo uno de los recursos naturales vitales y resulta por ello imperativo que los temas hídricos no sean tratados de forma aislada; los gestores, tanto gubernamentales como del sector privado, han de tomar decisiones complicadas sobre la asignación del agua. Con mayor frecuencia, éstos se enfrentan a una oferta que disminuye frente a una demanda creciente. Factores como los cambios demográficos y climáticos también incrementan la presión y cambios en la dinámica sobre los recursos hídricos, dicha dinámica de los recursos hídricos debido al cambio climático está propiciando que existan nuevos riesgos ambientales-sanitarios dentro de las cuencas hidrosociales, estos riesgos son factores determinantes para el desarrollo de la sociedad y la importancia en temas de salud como lo son las enfermedades ocasionadas por el cambio climático (GWP, 2014).

Hoy en día, una de las enfermedades de mayor importancia a nivel mundial en el sector salud es la enfermedad del dengue. Este virus es transmitido por el vector *Aedes aegypti* y se encuentra distribuido en zonas tropicales. Según una estimación reciente, se producen 390 millones de infecciones por dengue cada año, de los cuales 96 millones se manifiestan clínicamente, cerca de 500 millones de personas en las Américas están actualmente en riesgo de contraer dengue (OPS/OMS, 2020), donde México presenta este tipo de climas, lo que ocasiona una mejor transmisión del virus a través del territorio nacional, de acuerdo con registros recopilados por instituciones oficiales, en los últimos años en el altiplano central mexicano se ha incrementado la presencia de casos de Fiebre por Dengue (FD), pese a las condiciones poco favorables para el desarrollo del vector en comparación con regiones costeras donde se conoce la existencia de una presencia endémica (Ordoñez, 2018).

Por dicha razón es de suma importancia analizar la distribución potencial en el territorio mexicano, para poder así aplicar medidas de prevención y disminución de la distribución de este virus, el presente trabajo tiene por objeto generar, validar y transferir un modelo de distribución potencial del vector *Aedes aegypti* para el territorio mexicano de la misma manera hay que tomar en cuenta que no solo basta conocer la distribución, sí no tratar de zonificar o determinar zonas de mayor importancia para que los tomadores de decisiones puedan tener una referencia mucho más centrada o específica donde dirigir los recursos, programas para prevenir la distribución del mosquito, gracias al IPCC podemos tener

información acerca de escenarios climáticos, con lo cual esperamos poder anticipar las zonas potenciales de distribución del vector al año 2050 y 2070.

1.1.- Antecedentes

1.1.1- La GIRH y la salud

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un concepto empírico que nace de la propia experiencia de campo de los profesionales. Los indicios de dicho concepto datan desde la primera conferencia global en Mar del Plata en 1977. Sin embargo, no fue hasta después de la Agenda 21 y de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible en 1992 en Río cuando el concepto de GIRH fue objeto de profundos debates que incluían sus implicaciones en la práctica. La definición que da la Asociación Mundial para el Agua de la GIRH es hoy la más aceptada: “La GIRH es un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.” (GWP, 2014).

La seguridad hídrica puede definirse como **la “provisión confiable de agua cuantitativa y cualitativamente aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua”** (GWP, 2009) .

Un mundo con seguridad hídrica reduce la pobreza, promueve la educación y aumenta los estándares de vida, por el contrario, la calidad en el agua, el saneamiento y la higiene tienen consecuencias importantes sobre la salud y distintas enfermedades. Es un mundo en donde hay una mejor calidad de vida para todas las personas alcanzada mediante la buena gobernanza del agua (GWP, 2009).

Las enfermedades relacionadas con el uso y consumo de agua incluyen aquellas causadas por microorganismos y sustancias químicas presentes principalmente en el agua potable; enfermedades como la esquistosomiasis, que tiene parte de su ciclo de vida en el agua; la malaria y el dengue, cuyos vectores y su desarrollo están relacionados con el agua (OMS, 2019).

1.1.2.- Método de clasificación climática

Las características que definen los climas son resultado del funcionamiento del sistema climático y reflejan la influencia de los distintos componentes que actúan en conjunto sobre él. En el estudio de su comportamiento, se analizan diferentes elementos meteorológicos (temperatura, precipitación, viento, presión atmosférica, humedad, etc.) referidos a distintos rangos que dependen de la ubicación geográfica de los mismos, que pueden ser considerados de forma aislada o combinada. En este último caso el acoplamiento de los valores dados para un lugar define la naturaleza de su clima. Estas combinaciones conducen a parámetros e índices más o menos complejos, cuyos valores son utilizados para establecer tipos climáticos (Pita & Cuadrat, 2006)

El agrupamiento sistemático de estos elementos en clases se fundamenta en diferentes parámetros e índices. El método de clasificación debe elaborarse en función del objetivo perseguido, aunque no siempre los parámetros y los datos de los que se dispone son adecuados o suficientes, ni están en consonancia con los fines de las distintas disciplinas (geografía, botánica, agronomía). Establecer un esquema tipológico universal, único y válido para las diferentes disciplinas y objetivos es algo utópico dado la disparidad y complejidad de los propósitos (Pita & Cuadrat, 2006)

En México, García, (1964) realizó una serie de modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, (1948) los climas son definidos por los valores medios anuales y mensuales de las temperaturas y las precipitaciones, lo que permite diferenciar varios grupos y subgrupos climáticos que se identifican mediante un código de letras. Köppen, (1948) divide a los climas del mundo en cinco grupos principales, identificados por una primera letra mayúscula; cada uno de ellos se divide en subgrupos, los que a su vez lo hacen en tipos, con referencias a la distribución estacional de la precipitación (régimen de lluvias). Las modificaciones realizadas afectan, entre otras, a la consideración del índice de Lang (cociente precipitación total anual/temperatura media anual), del porcentaje de lluvia invernal, de la zonificación térmica y de la utilización de la planta llamada gobernadora (*Larrea tridentata*) como referente de distribución de las regiones áridas del norte de México y suroeste de Estados Unidos; esto último permitió la delimitación más fina de uno de los subgrupos de los secos (García et al., 1961).

A continuación, se describen los diferentes tipos de clima en México (Tabla 1-1), de acuerdo con Enriqueta García (Fig. 1-1) (García, 2004).

Tabla 1-1-1 Clasificación climática en México (Fuente: Elaboración propia a partir de García, 2004.)

Clasificación	Régimen de Precipitación	de Régimen de Temperatura	de Ubicación en México
(Af) Cálido y Húmedo con lluvias todo el año	+60 mm mes más seco, anual entre 2000 a 4000 mm	La temperatura de todos los meses es superior a 18 °C, con una media anual entre 22 °C y 26 °C.	Se localiza al sur del paralelo 20°N, en la base del declive este de la Sierra Madre Oriental y al Norte de Chiapas.
(Am) Cálido Húmedo con lluvias en verano	Mayor precipitación se encuentra en verano y otoño, donde el mes más seco registra una precipitación menor a 60 mm. Precipitación anual mayor a 2500 mm		Se localiza al Sur del Trópico de Cáncer, en las llanuras Tabasqueñas, en la base y en el declive este de la Sierra Madre Oriental, y en el declive del Pacífico, al sureste de la Sierra Madre de Chiapas.
(Aw) Cálido Subhúmedo con lluvias en verano	Precipitaciones entre 1000 y 2000 mm anuales	Con temperaturas que oscilan de 22 °C a 26 °C,	Por la vertiente del Golfo, se encuentra al sur del paralelo 23 ° N, en algunas partes de la llanura costera, parte de la península de Yucatán, y parte de la depresión central de Chiapas.
(Cf) Templado Húmedo con lluvias todo el año.	El mes más seco registra valores superiores a los 40 mm y la precipitación anual entre 2000 a 4000 mm	La temperatura media anual es de 17.3 °C.	Se localiza en las vertientes del Atlántico de la Sierra Madre Oriental, y de las montañas del norte de Chiapas.
(Cw) Templado Subhúmedo con lluvias en verano	El mes más seco con valores inferiores a los 40 mm, y la precipitación anual promedio de 600 a 1000 mm.	La temperatura media del mes más frío la encontramos entre -3 y 18 °C.	Se localiza en la mayor parte de las montañas del centro y sur de México, porciones norte y centro de la Sierra Madre Occidental y norte de la Sierra Madre Oriental.
(Bw) Muy Seco	Registra precipitaciones anuales promedio de 100 a 300 mm	Temperatura promedio entre 18 °C a 22 °C	Se localiza en la parte norte de la Altiplanicie Mexicana a altitudes menores de 1500 msnm,
(Bs) Seco	300 a 600 mm anuales	18 °C y 26 °C.	En la parte norte de la Altiplanicie, así como en los declives de la Sierra Madre Occidental
(E) climas frío		Con temperaturas media es menor a 10 °C	Se localiza en las altas montañas del centro del país, donde la temperatura media del mes más caliente desciende debido al aumento de altitud

De la misma manera existen modificaciones a diferentes regímenes tanto de lluvia y temperatura tabla 1-2 (oscilación y límites).

Tabla 1-2 Modificación a las condiciones de temperatura (general) (Fuente: García, 2004).

Temperatura media anual				
Climas húmedos	Símbolo	Anual	del mes más frío	del mes más caliente
Muy cálido	A	Sobre 26°	Sobre 18°	
Cálido	A	entre (22° y 26°)	Sobre 18°	
Semicálido del grupo A	A(C)	entre (18° y 22°)	Sobre 18°	
Semicálido del grupo C	(A)C	Mayor de 18°	entre 3° y 18°	sobre 6.5°
Templado con verano cálido	Ca	entre 12° y 18°	entre 3° y 18°	sobre 22°
Templado con verano fresco largo	Cb	entre 12° y 18°	entre 3° y 18°	entre 6.5° y 22°
Semifrío con verano fresco largo	C(b')	entre 5° y 12°	entre 3° y 18°	entre 6.5° y 22°
Semifrío con verano fresco corto	Cc	entre 5° y 12°	entre 3° y 18°	Además menos de cuatro meses con temperatura mayor de 10°
Frío	E(T)C	entre 2° y 5°	Sobre 0°	entre 0° y 6.5°
	E(T)	entre 2° y 5°	Sobre 0°	entre 0° y 6.5°
Muy Frío	EF	menor de 2°		menor de 0°

Tabla 1-3 Condiciones de oscilación térmica anual de las temperaturas medias mensuales (Fuente: García, 2004).

Símbolo	Características	Tipo
i	Oscilación < 5°C	Isotermal
i'	Entre 5° y 7°C	con poca oscilación
e	Entre 7° y 14°C	extremoso
e'	Oscilación >14°C	muy extremoso

Tipo de clima Af de Köppen, precipitación del mes más seco mayor de 60 mm (Tabla 1-4).

Tabla 1-4 Modificación al clima Af (Fuente: García, 2004).

Símbolo	% de lluvia invernal con respecto a la anual
A(f)	Mayor de 18
Af(m)	Menor de 18

Tipo de clima Am de Köppen no debe tener necesariamente 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que el más seco (Tabla 1-5).

Tabla 1-5 Modificaciones al clima Am (Fuente: García, 2004).

Símbolo	% de lluvia invernal con respecto a la anual
Am(f)	Mayor de 10.2
Am	Entre 5 y 10.2
Am(w)	Menor de 5

Tipo de clima Aw de Köppen (subhúmedo con lluvias en verano) por lo menos 10 veces mayor de cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco (Tabla 1-6).

Tabla 1-6 Modificaciones al clima Aw (Fuente: García, 2004).

Símbolo	Cociente P/T	Designaciones
Aw ₀	Menor que 43.2	El más seco de los subhúmedos
Aw ₁	Entre 43.2 y 55.3	Intermedio entre Aw ₁ y Aw ₂
Aw ₂	Mayor que 55.3	El más húmedo de los subhúmedos

Modificaciones al grupo de climas B, secos (Tabla 1-7).

Tabla 1-7 Modificaciones al grupo de climas BS (Fuente: García, 2004).

Símbolo de los subtipos	Cociente P/T	Designaciones
BS ₀	Menor que 22.9	El más seco de los BS
BS ₁	Mayor que 22.9	El menos seco de los BS

Modificaciones al grupo de climas B respecto a la temperatura (Tabla 1-8).

Tabla 1-8 Condiciones de climas secos (temperatura) (Fuente: García, 2004).

Designaciones para describir las condiciones de temperatura	Símbolo	Temperatura Media		
		Anual	Del mes más frío	Del mes más caliente
(Cálido)	(h ')	sobre 22°	sobre 18°	
(Cálido)	(h ')h	sobre 22°	bajo 18°	
(Semicálido)	h '(h)	entre 18° y 22°	sobre 18°	
(Semicálido)	h	entre 18° y 22°	bajo 18°	
(Templado con verano cálido)	k	entre 18° y 22°	entre 3° y 18°	sobre 18°
(Templado con verano fresco)	k'	entre 18° y 22°	entre 3° y 18°	bajo 18°
(Semifrío)	(k'')	entre 5° y 12°	entre 3° y 18°	bajo 18°

Modificaciones al grupo de climas C, templados húmedos, con temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C y la del mes más caliente mayor de 6.5 °C (Tabla 1-9).

Tabla 1-9 Tipos de clima Cf y Cw de Köppen (Fuente: García, 2004).

Símbolo	Condición
C(f)	Precipitación del más húmedo de la mitad caliente del año menor de 10 veces la del más en régimen de lluvias de verano: precipitación del mes más húmedo de la mitad fría del año menor de 3 veces la del más seco en régimen de lluvias de invierno, y esta mayor de 40 mm (% de lluvias invernal mayor de 18 de la anual).
C(fm)	Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm, % de lluvia invernal respecto a la anual menor de 18.
C(m)	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm, % de lluvia invernal entre 5 y 10.2 a la anual.
C(m)(w)	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm, % de lluvia invernal menor de 5 de la anual.
C(w)	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm, por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el más seco.
C(w)(w)	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm, % de lluvia invernal menor a 5.

Tipos de climas C(w), templado subhúmedo con lluvias en verano (Tabla 1-10).

Tabla 1-10 Modificaciones al clima C(w) (Fuente: García, 2004).

Símbolo de los subtipos	Cociente P/T	Designaciones
C(w₀)	Menor que 43.2	El más seco de los subhúmedos
C(w₁)	Entre 43.2 y 55	Intermedio entre C(w ₀) y C(w ₂)
C(w₂)	Mayor que 55	El más húmedo de los subhúmedos
C(w)´ (Se agrega a lo anterior)	Sí el máximo de precipitación se encuentra en otoño	
C(w)´´ (Se agrega a lo anterior)	Sí existen 2 máximos de precipitación por un periodo seco (Sequía intraestival, crear gráfica con precipitación mensual)	

Tipos de clima Cs templado húmedo con lluvias en invierno), por lo menos 3 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad fría del año que en el más seco (Tabla 1-11).

Tabla 1-11 Modificaciones a los climas Cs (Fuente: García, 2004).

Símbolo de los subtipos	% de lluvia invernal con respecto a la anual
C(s)(x´)	Menor de 36
C(s)	Mayor de 36

Modificaciones al grupo de climas E fríos (Tabla 1-12).

Tabla 1-12 Modificaciones al grupo E (Fuente: García, 2004).

Clima	Condición
E(T)H	Temperatura media del mes más caliente entre 0° y 6.5°, temperatura media anual entre -2° y 5 °C
EF	Temperatura media del mes más caliente menor que 0°, temperatura media anual menor que -2°

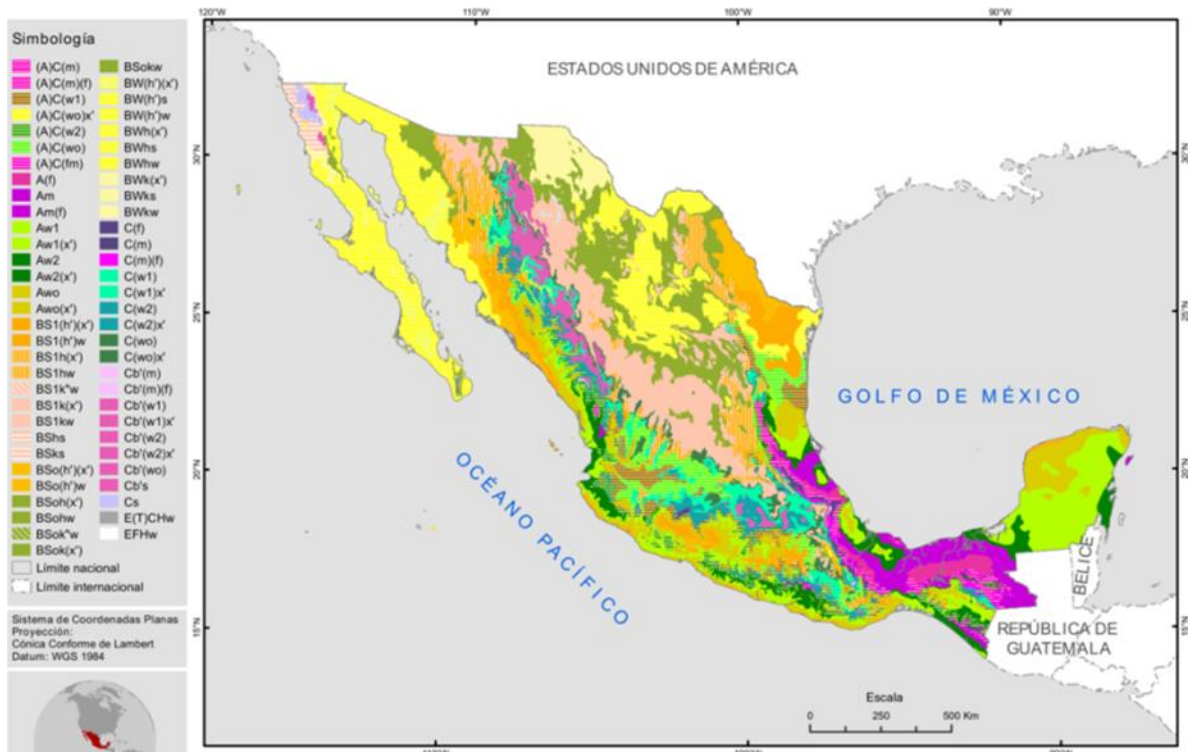


Figura 1-1 Clasificación climática en México (Fuente: García E. CONABIO, 1998)

1.1.3.-Dengue

Hoy en día, alrededor del 40% de la población mundial, vive en áreas donde existe un riesgo de transmisión del dengue. El dengue es endémico en al menos 100 países de Asia, el Pacífico, las Américas, África y el Caribe. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que entre 50 y 100 millones de infecciones se producen anualmente, incluidos 500,000 casos de dengue hemorrágico y 22,000 muertes, principalmente en niños (OMS, 2018).

El dengue se transmite a través de la picadura de la hembra del mosquito *Aedes aegypti* y se mantiene en la naturaleza a través de dos mecanismos principales; 1) Por transmisión biológica, en la que los mosquitos hematófagos pasan el virus de una persona enferma a otra susceptible, conocida como transmisión horizontal y 2) De manera transovárica, en la cual los mosquitos transmiten el virus a sus hijos (a los huevos) sin la participación de una persona, conocida como transmisión vertical. Cuando el mosquito se infecta de virus pasan aproximadamente ocho días para que el virus tenga su periodo de incubación, además permanece infectante durante su ciclo de vida. (Escobar-Mesa & Gómez-Dantés, 2003; Hsueh et al., 2012).

Las primeras manifestaciones de dengue en la Américas datan desde 1635 (Fajardo-Dolci et al., 2012), y hasta la actualidad ha presentado diversos episodios debido a que el virus tiene una rápida y fácil propagación (Dantés, 2007), extendiéndose en diferentes países, como Cuba en 1981, donde se presentó un brote por dengue, dando inicio a las primeras infestaciones hacia países vecinos, tales como Colombia con 80, 310 casos, seguido por Brasil con 55, 150, Venezuela con 54, 514, Puerto Rico con 41, 942 y Nicaragua con 36, 257 (Escobar-Mesa & Gómez-Dantés, 2003).

Para el caso de México, los primeros registros de casos de dengue fueron a partir de 1941 con 6,955, disminuyendo hasta 1963, declarándose en erradicación debido al reforzamiento de las campañas de salud, sin embargo para 1978 el vector transmisor se reintrodujo en el sur del país (Chiapas), extendiéndose por gran parte de territorio nacional, y para 1995 se presentó la primera epidemia de dengue hemorrágico (539 casos) debido a la reincidencia del virus por otros serotipos (DEN-1, DEN-2, DEN-3 Y DEN-4) (Robles & Gómez-Dantés, 1995; Torres-Galicia et al., 2014).

En México, entre la semana 1 y la semana 52 de 2018 fueron notificados 12,706 casos confirmados de dengue, cifra inferior al número de casos confirmados para el mismo periodo en 2017 (14,490 casos). No obstante, al analizar el comportamiento de la enfermedad de acuerdo con la presentación clínica, se observa que el número total de casos de dengue grave, en 2018 fue superior a lo observado en 2017 (858 y 382,

respectivamente); comportamiento similar se observó en los casos con signos de alarma superando lo registrado en 2017 (3,619 y 2,548, respectivamente). Con los casos fatales con confirmación de infección por dengue (45 muertes), se observó una disminución en comparación con el año 2017 (65 muertes). En 2018, el 73% del total de defunciones ocurrieron en el estado de Chiapas, que, junto con Veracruz, Jalisco, Nuevo León y San Luis Potosí concentraron el 82% de los casos confirmados (OPS/OMS, 2020).

Las cifras son preocupantes, ya que la enfermedad no se ha podido erradicar a pesar de la aplicación de los planes de prevención, en lo que ha contribuido únicamente en el control temporal de la transmisión, pero nuevamente se presentan reemergencias y año con año han ido incrementando, ocasionando una complicación cada vez más en el manejo de la enfermedad por lo que se debe de realizar un monitoreo a detalle de las posibles condiciones que puedan detonar la transmisión (Ordoñez, 2018).

1.1.4.- Modelación de la distribución potencial del *Aedes aegypti* basado en un modelo de nicho

Otra forma de analizar el comportamiento del dengue es primero conocer bajo qué condiciones puede vivir y desarrollarse el principal transmisor del virus, como se mencionó anteriormente este es distribuido por un mosquito *Aedes (Stegomyia) aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae), el cual puede verse influenciada su presencia por otros factores que van más allá de solo la parte climática. Por lo tanto, se debe analizar en un contexto ecológico y de esta forma conocer su idoneidad para identificar las áreas vulnerables a la transmisión.

El interés por analizar el comportamiento de especies ha propiciado el uso de modelos de nicho ecológico en diferentes campos, como la ecología, geografía, salud, entre otros (Phillips & Dudík, 2008). Básicamente los modelos utilizan registros de presencia, presencia-ausencia y/o abundancia de especies en combinación con datos ambientales, obteniendo la correlación entre estas, para identificar las condiciones bióticas y abióticas que ayudan al desarrollo de la especie en su hábitat (Elith et al., 2011).

Dentro de la literatura se han encontrado modelos de distribución de vectores, estos modelos necesitan datos de presencia y ausencia para construir el modelo, algunos ejemplos son: *random forest*, *mixture discriminant analysis MDA*, *modelos lineales generalizados GLM*, *generalized linear models*, entre los que la regresión logística puede considerarse el método pionero, al que han seguido técnicas como *support vector machines SVM*, *modelos aditivos generalizados GAM*, *generalized additive models*, y *máxima entropía*, entre los que destaca *Maxent*. Maxent genera sus propias ausencias,

denominadas "background" por lo que no es necesario introducir datos de ausencia en el programa (Mateo et al., 2011).

Los trabajos encontrados son el hecho por Liria & Navarro, (2010) estimaron la distribución del mosquito del género *Haemagogus* considerado como uno de los principales transmisores de la fiebre amarilla en América del centro y sur. Por medio del algoritmo de máxima entropía se generó su distribución con 354 registros y 20 variables ambientales. Como resultados, la precipitación del trimestre más cálido y la temperatura diurna fueron las variables que más influencia mostraron en el modelo, además identificaron un aumento en la distribución de la especie, que va desde Brasil y Bolivia donde normalmente no se tenía registros de esta especie hasta México.

En el este de México Candelario-Mejía et al., (2015), estudió un modelo de distribución del *Aedes aegypti* para todo el este mexicano usando 55 registros obteniendo un modelo con 90% de similitud usando MAXENT, asimismo las variables ambientales que más aportaron a su modelo fueron las relacionadas con la temperatura.

Para modelaciones a nivel nacional encontramos a Yañez-Arenas et al., (2018) quien realizó una modelación de nicho ecológico y nicho fundamental a partir de MAXENT, encontrando variables que más aportan a los modelos son: el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), la temperatura media anual, la estacionalidad de la precipitación y la pendiente del terreno, el aporte principal fue la evolución de las áreas predichas quedando en 15% respecto al nacional en 2005, luego en 38% en 2010 y 58% en 2016, destacando así la importancia de los efectos de cambio climático y sus interacciones con una especie en México.

Por su parte (Ordoñez, 2018) encontró otras variables que detonaban la potencialidad de dicha especie, dicho estudio fue realizado para el altiplano mexicano, las variables que se ocuparon en el modelado debido al aporte fueron el NDVI, Bio15 (Precipitación estacional), y la Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío), con el 90% y la Bio13 (Precipitación del mes más húmedo) y la humedad relativa aportó el 10% restante, en el trabajo Ordoñez realizó una transferencia a los años 2050 y 2070, dicha transferencia es de gran aporte, ya que a partir de estas se puede analizar a futuro donde serán áreas prioritarias.

1.2.- Justificación contextual y científica

Muchas especies están modificando sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso (IPCC, 2014).

Según la (OMS, 2019):

1. Las enfermedades transmitidas por vectores representan más del 17% de todas las enfermedades infecciosas, y provocan cada año más de 700 000 defunciones.
2. Más de 3900 millones de personas, en más de 128 países, corren el riesgo de contraer dengue, con una estimación de 96 millones de casos al año.
3. No hay tratamiento específico del dengue ni del dengue grave, pero la detección oportuna y el acceso a la asistencia médica adecuada disminuyen las tasas de mortalidad por debajo del 1%.
4. La OMS coloca a México en el quinto lugar de incidencia en América Latina por dengue. Por dichas razones y en la manera en que el cambio climático influye en la distribución de los vectores que generan ciertas enfermedades es de suma importancia tener herramientas en la toma de decisiones que ayuden a identificar las zonas potenciales para el desarrollo del vector *Aedes aegypti* y así poder minimizar la transmisión de dicha enfermedad en México.

Gracias a las herramientas que generan modelos de distribución potencial de la especie *Aedes aegypti* se pueden identificar zonas de mayor riesgo para la transmisión de la enfermedad del dengue (Peterson et al., 2005).

1.3.- Hipótesis

El modelado de la distribución potencial del vector (*Aedes aegypti*) para México y su transferencia a futuro mediante escenarios de cambio climático permitirá identificar zonas de riesgo que apoyen a una mejor toma de decisión en el control de la enfermedad.

1.4.- Objetivos

1.4.1.- Objetivo General

Generar un modelo de distribución potencial del *Aedes aegypti* para México, para determinar zonas potenciales de presencia del vector y como ayuda en la toma de decisiones.

1.4.2.- Objetivos Específicos

- 1.- Recopilar datos de casos de dengue y registros de la especie *Aedes aegypti*, a partir de bases de datos de la Secretaría de Salud para su identificar la presencia espacio temporal.
- 2.- Estructurar las variables ambientales, los índices de vegetación y la humedad relativa y cálculo de índices de teledetección para su posterior uso en la modelación.
- 3.- Modelar y transferir al 2050 y 2070 con un RCP 4.5 y 8.5 la distribución potencial con base en la caracterización ambiental de nicho el *Aedes aegypti* en un ambiente SIG, para identificar áreas probables de transmisión del dengue.
- 4.- Calibrar y validar el modelo de distribución espacial con diferentes métodos de remuestreo para saber qué tan válido es el modelo.
- 5.- Delimitar zonas geográficas a través de la idoneidad ambiental para identificar aquellas con un mayor riesgo de contagio en la República Mexicana y aquellas zonas de distribución del mosquito en el futuro.

Capítulo 2 Marco teórico conceptual

2.1.- ¿Qué es un vector?

Los vectores vistos desde un punto de vista del sector salud son organismos vivos que pueden transmitir enfermedades infecciosas entre personas, o de animales a personas. Muchos de esos vectores son insectos hematófagos que ingieren los microorganismos patógenos junto con la sangre de un portador infectado (persona o animal), y posteriormente los inoculan a un nuevo portador al ingerir su sangre (OMS, 2019)

Los mosquitos son los vectores de enfermedades mejor conocidos, aunque también hay garrapatas, moscas, flebótomos, pulgas, triatominos y algunos caracoles de agua dulce que también son vectores de enfermedades (OMS, 2019)

Las enfermedades transmitidas por vectores son causadas por parásitos, virus y bacterias transmitidos por mosquitos, flebótomos, chinches triatomíneas, simúlidos, garrapatas, moscas tsetse, ácaros, caracoles y piojos. En todo el mundo se registran cada año más de 700 000 defunciones como consecuencia de enfermedades transmitidas por vectores, tales como el paludismo, dengue, esquistosomiasis, tripanosomiasis africana humana, leishmaniasis, enfermedad de Chagas, fiebre amarilla, encefalitis japonesa y oncocercosis (OMS, 2019).

En su conjunto, las enfermedades transmitidas por vectores representan aproximadamente un 17% de las enfermedades infecciosas. La mayor carga de estas enfermedades, que afectan de forma desproporcionada a las poblaciones más pobres, corresponde a las zonas tropicales y subtropicales. Desde 2014, grandes brotes de dengue, paludismo, fiebre chikungunya, fiebre amarilla y enfermedad por el virus de Zika han azotado a diferentes poblaciones, cobrándose vidas y abrumando los sistemas de salud en muchos países (OMS, 2019).

La distribución de las enfermedades transmitidas por vectores está determinada por complejos factores demográficos, medioambientales y sociales (OMS, 2019).

Los viajes y el comercio mundiales, la urbanización no planificada y los problemas medioambientales, como el cambio climático, pueden influir en la transmisión de patógenos, haciendo que la temporada de transmisión sea más prolongada o intensa, o que aparezcan algunas enfermedades en países que antes no las sufrían (OMS, 2019)

Los cambios en las prácticas agrícolas debidos a las variaciones de temperatura y precipitaciones pueden influir en la propagación de enfermedades transmitidas por vectores. El crecimiento de las localidades con alto grado de marginación, sin un suministro fiable de agua corriente ni sistemas de gestión de desechos sólidos, puede poner a grandes poblaciones urbanas en riesgo de padecer enfermedades víricas

transmitidas por mosquitos. Dichos factores pueden influir en el alcance de las poblaciones de vectores y las modalidades de transmisión de los patógenos (OMS, 2019).

2.2.- Sistema de clasificación de enfermedades

La CIE-10 es el acrónimo de la Clasificación internacional de enfermedades, 10.^a edición correspondiente a la versión en español de la versión en inglés ICD, siglas de International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems y determina la clasificación y codificación de las enfermedades y una amplia variedad de signos, síntomas, hallazgos anormales, denuncias, circunstancias sociales y causas externas de daños y/o enfermedad (World Health Organization, 1995)

Dentro de dicha clasificación se encuentran las enfermedades causadas por infecciones virales (Tabla 2-1)

Tabla 2-1 Fiebres virales transmitidas por artrópodos y fiebres virales hemorrágicas
(Fuente: World Health Organization, 1995)

Clasificación	Enfermedad
A90	Fiebre del dengue [dengue clásico]
A91	Fiebre del dengue hemorrágico

2.3.- Enfermedad del dengue

Para que en una ciudad, región o país se produzca transmisión de la enfermedad tienen que estar presente de forma simultánea: el virus, el vector y el huésped susceptible. El huésped cuando está infectado y se encuentra en fase de viremia (de cinco a siete días) constituye el reservorio de la enfermedad. Todos los vectores conocidos que puedan transmitir los cuatro serotipos del virus del dengue pertenecen al género *Aedes*, de los cuales el *Aedes aegypti* es el más importante. Esta especie acompaña al ser humano dentro de la vivienda y en sus alrededores, pues la hembra prefiere la sangre humana y pica principalmente durante el día a una o varias personas para procurar cada puesta de huevecillos, lo cual realiza en depósitos naturales o artificiales de agua, hasta que se convierten en larvas, pupas y mosquitos adultos (Martínez Torres, 2008).

El dengue solamente es capaz de infectar al hombre y primates superiores si son introducidos por la picada del vector. Esta es la única vía de importancia clínico-epidemiológica, pues el dengue no se transmite por vía oral, respiratoria ni sexual, como otros virus (Martínez Torres, 2008).

El dengue es una enfermedad de tipo gripal que afecta a bebés, niños pequeños y adultos, pero raras veces resulta mortal (Bhatt et al., 2013).

Se debe sospechar que una persona padece dengue cuando una fiebre elevada (40 °C) se acompaña de dos de los síntomas siguientes: dolor de cabeza muy intenso, dolor detrás de los globos oculares, dolores musculares y articulares, náuseas, vómitos, agrandamiento de ganglios linfáticos o salpullido. Los síntomas se presentan al cabo de un periodo de incubación de 4 a 10 días después de la picadura de un mosquito infectado y por lo común duran entre 2 y 7 días (Brady et al., 2012).

El dengue grave es una complicación potencialmente mortal porque cursa con extravasación de plasma, acumulación de líquidos, dificultad respiratoria, hemorragias graves o falla orgánica. Los signos que advierten de esta complicación se presentan entre 3 y 7 días después de los primeros síntomas y se acompañan de un descenso de la temperatura corporal (menos de 38 °C) y son los siguientes: dolor abdominal intenso, vómitos persistentes, respiración acelerada, hemorragias de las encías, fatiga, inquietud y presencia de sangre en el vómito. Las siguientes 24 a 48 horas de la etapa crítica pueden ser letales; hay que brindar atención médica para evitar otras complicaciones y disminuir el riesgo de muerte (Bhatt et al., 2013).

Es una enfermedad febril que afecta a lactantes, niños y adultos. La infección puede ser asintomática, o cursar con síntomas que van desde una fiebre moderada a una fiebre alta incapacitante, con dolor de cabeza intenso, dolor detrás de los ojos, dolor muscular y en las articulaciones, y sarpullidos. La enfermedad puede evolucionar a un dengue grave, caracterizado por choque, dificultad para respirar, sangrado grave y/o complicaciones graves de los órganos (OPS/OMS, 2020).

2.4.- Ciclo de vida del *Aedes aegypti*

Esta especie se caracteriza por su preferencia por climas de cálidos a semicálidos templados (de 15 a 40 °C) y con niveles de precipitación pluvial moderados y altos, donde se generan condiciones ambientales favorables para su reproducción (Hoyos et al., 2006). Su desarrollo se completa en condiciones favorables de nutrición y con temperaturas de 25° a 29°C, en 5 a 7 días (Coto & Tito, 2020).

Su desarrollo es poco favorable y probable a temperaturas inferiores a 10°C, superiores a 44° ó 46°C impidiéndose a menos de 13°C su pasaje a estadio pupal (Salvutella, 1996).

La proliferación y actividad de *Aedes aegypti*, mejoran con las temperaturas elevadas y con las precipitaciones frecuentes (Gubler & Clark, 1996).

- a) Los mosquitos hembra adultos depositan sus huevos sobre las paredes internas de recipientes con agua, las cuales están húmedas (Gubler & Clark, 1996).
- b) Los huevos pueden sobrevivir sin estar dentro del agua por un período de hasta 8 meses, su desarrollo se completa en condiciones favorables de nutrición y con temperaturas de 25 a 29°C, en 5 a 7 días están dotadas de movimientos característicos verticales, entre fondo y superficie, se disponen en forma de ese (S) durante los mismos. Son incapaces de resistir temperaturas extremas, impidiéndose a menos de 13°C su pasaje a estado pupal. Se alimentan del zoo y fitoplancton de los recipientes que habitan (OMS, 2018).
- c) Las larvas viven en el agua. Salen de los huevos de mosquito, presenta coloración oscura, aspecto de coma, con 2 segmentos: cefalotórax y abdomen. Es móvil, no se alimenta. Entre 28° y 32°C completa su desarrollo hasta la emergencia del adulto en 1 a 3 días.
Las variaciones extremas de temperatura pueden dilatar este período. Las crisálidas viven en el agua. De la crisálida sale el mosquito adulto, el cual se desplaza volando hacia diversos lugares hasta 400 m en toda su vida (CENAPRECE, 2020)
- d) Los mosquitos hembra adultos pican a personas y animales.
- e) Los mosquitos necesitan sangre para poner huevos (Brady et al., 2012) el ciclo de huevo a adulto se completa en óptimas condiciones de temperatura y alimentación, en 10 días. Infectante 8 a 20 días luego de la alimentación contaminante.

Presenta una sobrevivencia de 30 días (OMS, 2018). (Fig. 2-1).

Un huevo demora entre 7 y 10 días en convertirse en un mosquito adulto.

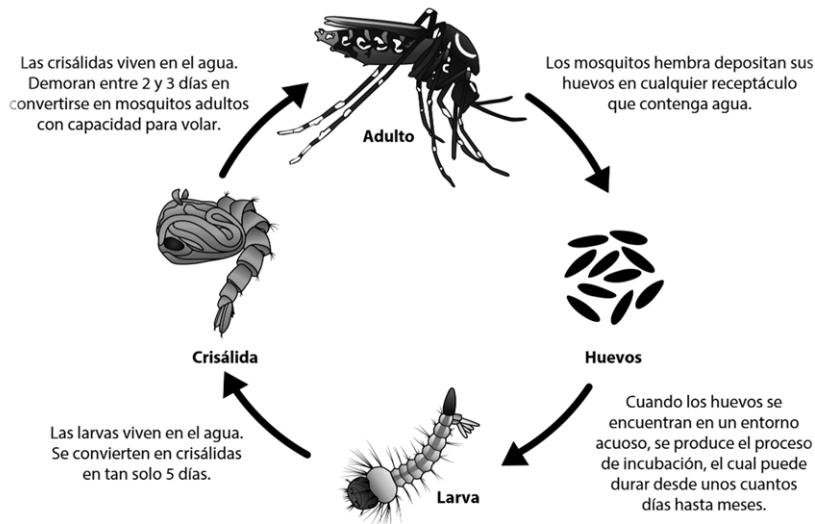


Figura 2-1 Ciclo de vida del *Aedes aegypti* (Fuente: CDC, 2018)

2.5.- Nicho Ecológico

Se denomina así a la estrategia de supervivencia utilizada por una especie, que incluye la forma de alimentarse, de competir con otras, de cazar, de evitar ser comida. En otras palabras, es la función, “profesión” u “oficio” que cumple una especie animal o vegetal dentro del ecosistema (Kormondy, 1991).

Se refiere no sólo al espacio físico ocupado por un organismo (nicho espacial o de hábitat), sino también a su papel funcional en la comunidad (nicho trófico) y a su posición en los gradientes ambientales de temperatura, humedad, pH, suelos, etc. (nicho multidimensional o de hipervolumen) (Kormondy, 1991).

Hutchinson define el nicho de una especie como un espacio n-dimensional donde cada dimensión representa la respuesta de una especie a la variación de una determinada variable. Las variables son independientes unas de otras y estarían representadas por todas aquellas condiciones ambientales y recursos que afectan al rendimiento de las especies en un determinado instante de tiempo t. El concepto de nicho multidimensional según Hutchinson está basado en la teoría de conjuntos, que permite analizar variables no lineales, como la respuesta de los organismos vivos a la variación en la intensidad de una condición ambiental (Hutchinson, 1957).

2.5.1.- Modelado de nicho ecológico vs áreas de distribución potencial

El diagrama BAM (Fig. 2-2) muestra que una especie tiene altas probabilidades de ser observada en aquellas regiones geográficas donde se presenten condiciones abióticas, bióticas y de movilidad similares (Soberón et al., 2017):

- i) Condiciones abióticas óptimas: A
- ii) Condiciones bióticas favorables: B
- iii) hayan estado accesibles a la dispersión de la especie desde la región de su origen histórico M, la movilidad que tiene la especie.

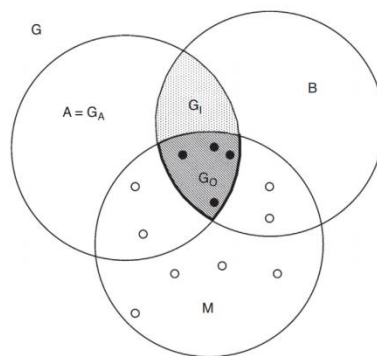


Figura 2-2 Diagrama de BAM (Fuente: Soberón et al., 2017)

La zona denotada por G_O , o área ocupada es la intersección de condiciones favorables biótica y abiótica, y de accesibilidad: por definición, las variables ambientales en G_O constituyen el nicho realizado (N_R). La zona G_I es una región con condiciones favorables pero que se ha mantenido fuera de movilidad de la especie. La región A es favorable a la especie si se hace abstracción de las interacciones biológicas y por lo tanto su medio ambiente corresponde a la idea de **nicho fundamental** de (Hutchinson, 1957), aunque más específicamente, a la parte del **nicho fundamental existente** en una región, en un tiempo (Jackson & Overpeck, 2000) y que simbolizamos con $N_{F_i}^*$, o el nicho existente. Las relaciones entre nichos y áreas se describen en la tabla 3-2.

Tabla 2-2 Relación entre nichos y áreas (Fuente: Soberón et al., 2017)

Espacio G	Espacio E
A: área potencial	N^*_F : nicho existente
G_0: área ocupada	N_R : nicho realizado
G_i: área invadible	Nicho realizado acotado por movimientos
Observaciones	Modelo de nicho (Posible intermedio entre N^*_F y N_R)

Cuando se utilizan algoritmos correlativos para modelar distribuciones de especies, el algoritmo combina las presencias y las capas ambientales para generar un objeto (tabla, fórmula, conjunto) en el espacio E, que es posteriormente proyectado a G como consecuencia de la dualidad de Hutchinson (Guisan & Zimmermann, 2000; A. Peterson et al., 2011). Sin embargo, en los modelos correlativos el investigador muy raramente incluye explícitamente las capas B y M. Así, en una modelación correlativa, ni las interacciones bióticas ni los factores históricos y M son tomados en cuenta directamente (Barve et al., 2011). En este caso se modelan los ambientes A, y la proyección a G es una distribución potencial (Peterson et al., 2015).

Vemos entonces que SDM se refiere a modelar objetos en G. Estos pueden ser considerados áreas potenciales (A o G_i), si se ignoran los efectos de B y M, o áreas ocupadas (G_0), si se cuenta con información sobre B y M.

A su vez, ENM se refiere a modelar condiciones ambientales, que se aproximan más o menos a N^*_F o a N_R dependiendo del algoritmo, de la configuración del BAM y de la calidad de las observaciones (Qiao et al., 2015; Saupe et al., 2012).

2.6.- Variables bioclimáticas

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) desarrolló las variables bioclimáticas que ayudan a entender la relación de las condiciones climáticas como temperatura y precipitación con el desarrollo de una especie, se desarrolló un conjunto de 19 variables con mensuales promedios mensuales (Tabla 2-3) (O'Donnell & Ignizio, 2012).

Las variables nos dan información acerca las condiciones anuales (temperatura media anual, precipitación anual, rango anual de temperatura y precipitación), así como la estacionalidad de dichas características (O'Donnell & Ignizio, 2012).

Estos datos proporcionan a los biólogos y ecologistas datos climáticos relevantes y de múltiples escalas para aumentar la investigación sobre las respuestas de las especies a los cambios, variaciones, estacionalidad, rangos extremos de las variables así como las relaciones establecidas entre la demografía relacionada a estas variables (O'Donnell & Ignizio, 2012).

Tabla 2-3 Descripción de las variables bioclimáticas (Fuente: O'Donnell & Ignizio, 2012).

Bio	Nombre de la bioclimática	Interpretación
BIO1	Temperatura media anual	El total de la energía que entra al sistema y cómo afecta al desarrollo de las especies.
BIO2	Rango diario (promedio mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	Provee información de la relevancia de la fluctuación de la temperatura para diferentes especies
BIO3	Isotermalidad (Bio 2/ Bio 7) (×100)	Se usa principalmente para ambientes tropicales, insulares y marítimos, las especies se pueden ver influenciadas debido a una variación de temperatura prolongada.
BIO4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar × 100)	Como cambia la temperatura a lo largo del año, a mayor valor de la bio 4 mayor variabilidad de la temperatura.
BIO5	Máxima temperatura del mes más caliente	Se usa para examinar cómo afecta la distribución de las especies las temperaturas altas en un mes.
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	Se usa para examinar cómo afecta la distribución de las especies las temperaturas bajas en un mes.
BIO7	Rango de temperatura anual (BIO5- BIO6)	Analiza la influencia de los rangos extremos de temperatura

Continuación tabla 2-3

BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	Esta variable analiza la temperatura media de durante los 3 meses más cálidos del año y cómo afecta a las especies que tienen un desarrollo estacional
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	Analiza la temperatura media durante los 3 meses más lluviosos del año y cómo afecta a las especies que tienen un desarrollo estacional
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	Esta variable da la temperatura media durante los 3 meses más calientes del año y cómo afecta a las especies en su desarrollo estacional
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	Esta variable da la temperatura media durante los 3 meses más fríos del año y cómo afecta a las especies en su desarrollo estacional.
BIO12	Precipitación anual	Analiza la cantidad total que entra de agua al sistema y su disponibilidad para las especies y su distribución
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	El mes más seco se usa sí las condiciones de precipitación extrema influyen en un rango de desarrollo de la especie
BIO14	Precipitación del mes más seco	El mes más húmedo se usa sí las condiciones de precipitación extrema influyen en un rango de desarrollo de la especie
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	La estacionalidad de la precipitación se ve reflejada en aquellas especies que están determinadas debido a una variación importante de la precipitación a lo largo del año.
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	La precipitación durante los 3 meses más secos del año y cómo influye en la distribución estacional de las especies
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	La precipitación durante los 3 meses más húmedos del año y cómo influye en la distribución estacional de las especies.
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	El total de la precipitación durante los 3 meses más calientes del año y cómo puede afectar a especies y su desarrollo estacional.
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	El total de la precipitación durante los 3 meses más fríos del año y cómo puede afectar a especies y su desarrollo estacional.

2.7.- Métodos de Validación

Bootstrap: La técnica bootstrap no paramétrica fue propuesta por Efron, (1979), y se basa en el remuestreo de una muestra. La idea básica es que si se toma una muestra aleatoria (x_1, x_2, \dots, x_n) entonces la muestra puede ser utilizada para obtener más muestras. El procedimiento es un remuestreo aleatorio (con reemplazo) de la muestra original tal que cada punto X_i tiene igual e independiente oportunidad de ser seleccionado como elemento de la nueva muestra bootstrap. El proceso completo son repeticiones independientes de muestreo hasta obtener un número grande de muestras bootstrap. Múltiples estadísticos pueden calcularse para cada muestra bootstrap y, por lo tanto, sus distribuciones pueden ser estimadas (Efron, 1979; Efron & Tibshirani, 1986).

Cross-Validation: La validación cruzada es un método estadístico de evaluación y comparación de algoritmos de aprendizaje dividiendo los datos en dos conjuntos: uno usado para realizar el modelo y el otro usado para validar el modelo los conjuntos de entrenamiento y validación deben cruzarse en rondas sucesivas de modo que cada punto de datos tenga una posibilidad de validarse (PAYAM et al., 2008).

2.8.- Modelos de circulación global

Las ciencias atmosféricas han desarrollado conocimientos y herramientas de análisis como los Modelos de Circulación Global (MCG), los cuales simulan la dinámica atmosférica global y estiman los posibles cambios del clima en las décadas futuras. Estas herramientas, aplicadas en forma acoplada con modelos de océano, son indispensables para la generación de escenarios climáticos futuros. Los grandes centros de pronóstico del clima mundiales se han coordinado para aportar información y conocimiento sustentado para la mejor toma de decisiones (INECC-IMTA, 2014).

El IPCC, (2013) dice que un MCG es una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados explícitamente los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas.

Los modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) acoplados proporcionan la más completa representación del sistema climático actualmente disponible.

Actualmente existen 15 MCG's que se mencionan en la tabla 2-4.

Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos (IPCC, 2001):

- La dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum.
- La física del sistema climático y la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica y la evaporación.
- Otros factores en los que se encuentran la interacción océano-atmósfera, la topografía, y parámetros que representan la dinámica de la vegetación.

2.8.1.- Forzamientos radiativos

Una vía de concentración representativa (RCP) es una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (no emisiones) adoptada por el IPCC. Se utilizaron cuatro vías para la modelización del clima y la investigación para el quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC en 2014. Las vías describen diferentes futuros climáticos, todos los cuales se consideran posibles dependiendo del volumen de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en los próximos años de valores de forzamiento radiativo en el año 2100 (2.6, 4.5, 6 y 8.5 W/m²=vatios entre metro cuadrado respectivamente). Los forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones (RCP's por sus siglas en inglés) expresados en W/m² que se consideraron para cada uno de los 15 MGC y el ensamble REA del proyecto "Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación", fueron los siguientes (INECC-IMTA, 2014):

- RCP 2.6 es una trayectoria "muy estricta" de emisiones, los escenarios descienden.
- RCP 4.5 (emisiones bajas): RCP 4.5 y RCP 6 son escenarios de estabilización, con concentraciones constantes después del 2150. Al estabilizar las concentraciones de CO₂ a 543 ppm, RCP 4.5 se acerca mucho a duplicar la concentración de CO₂ antes de la industria (278 ppm) (Meinshausen et al., 2011).
- RCP 6 las emisiones alcanzan su punto máximo alrededor de 2100 y luego disminuyen.
- RCP 8.5 (emisiones altas): Los niveles de forzamiento radiativo de RCP 8.5 para finales de 2100 son de alrededor de 8,5 W/m² bajo nuestra "mejor estimación" de parámetros del modelo con niveles de forzamiento que aumentan aún más a partir de entonces (Meinshausen et al., 2011) (Fig. 2-3).

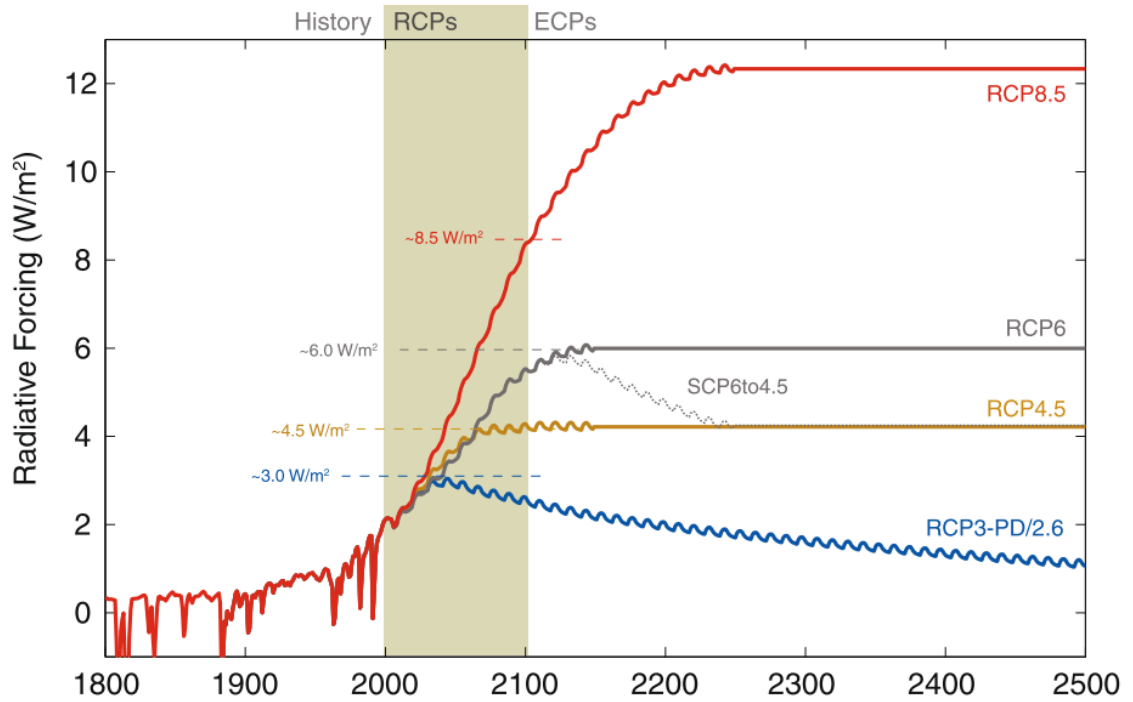


Figura 2-3 Forzamientos radiativos (Fuente: Meinshausen et. al, 2011)

Según el INECC-IMTA, (2014) para estimar de una manera más efectiva los efectos del cambio climático, así como para predecir los eventos hidrometeorológicos extremos existen cuatro MGC (con una resolución aproximadamente 926 m x 926 m). Los cuatro MCG adecuados para México y disponibles en WorldClim (WorldClim, 2020) son:

- MPI-ESM-LR (Alemania)
- GFDL-CM3 (Estados Unidos)
- HADGEM2-ES (Reino Unido)
- CNRM (Francia)

Tabla 2-4.-Modelos de circulación global (Fuente: Fernández et. al. 2015)

MODELO	INSTITUCIÓN	País
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Canadá
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	Francia
CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GISS_E2_R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Estados Unidos
HADGEM2_ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLcm5a_lr	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia
MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC_ESM_CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MPI_ESM_LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NCC_NorESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega
REA	INECC (IMTA, CCA-UNAM Y CICESE)	México

Descripción de los modelos

El modelo GFDLM es un modelo de circulación general creado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, uno de los 7 laboratorios de investigación de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOOA por sus siglas en inglés), el modelo consta de varios modelos de circulación global, donde se incluye: uno para calcular la convección de nubes de gran altura y bajas altitudes y su influencia indirecta de aerosoles a la atmósfera, la variabilidad de velocidades de las corrientes de viento que influyen en la distribución de gases de efecto invernadero, un modelo de circulación de la superficie de la tierra a través del cálculo de flujo de calor y agua a través de la tierra, así como los componentes de hielo marino y océano (Donner et al., 2011).

Este modelo se realizó con un conjunto histórico de 5 miembros (2050, 2070, 2100 principalmente) y 4 escenarios futuros (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5). Se llevaron a cabo simulaciones de detección y atribución para examinar el modelo a subconjuntos como solo gases de efecto invernadero y ozono bien mezclados, forzamientos naturales, forzamiento de aerosoles y efectos antropogénicos) así como un modelo de predicción de vegetación futura (Donner et al., 2011).

Este modelo incluye nuevos tratamientos de convección del aire de la atmósfera y su influencia en distribución de los componentes químicos y la atmósfera, así como analizar de manera particular los diferentes estratos de la atmósfera, permitiendo tener 3 diferentes partes de la atmósfera (Donner et al., 2011).

El modelo CNRM-CM5 es un modelo diseñado por el National Centre for Meteorological Research de Francia a partir de varios modelos de circulación global creados de manera independiente para ejecutar simulaciones climáticas y acoplados a través del software OASIS (fuente), se incluyen modelos de climatología de la atmósfera, océano, hielo marino, flujo de calor en la tierra y flujos océano-atmosféricos, ríos, deltas y su aporte de agua y minerales al océano.

CNRM-CM5 es una herramienta fundamental que simula el período histórico (1850-presente) y realizar estudios de atribución de cambio climático, así como simular el clima futuro en función de los escenarios de gases de efecto invernadero (2050 y 2070), simula paleoclimas: último interglacial (131 mil-115 mil años antes del presente), último máximo glacial (21 mil años antes del presente), holoceno medio (6 mil años antes del presente) (Voldoire et al., 2013).

Existen diversos modelos creados de manera independiente en laboratorios de todo el mundo, este modelo integra varios de ellos, que incluyen diversos fenómenos mundiales como el monzón de África principalmente (Voldoire et al., 2013).

El modelo Hadhem-ES es una familia de modelos creado por el Met Office Hadley Center del Reino Unido con diferentes configuraciones que acopla otros modelos a partir de diferentes componentes del planeta tales como: atmósfera, océano y componentes del hielo marino, con y sin una extensión vertical de la atmósfera (perfil: velocidad de vientos, temperatura), para incluir una estratosfera explícita así como los componentes del sistema terrestre incluyendo el ciclo del carbono terrestre y oceánico además de la química-atmosférica (Martin et al., 2011).

El modelo usado contiene los componentes: Troposfera (y su perfil así como su cantidad de humedad, temperatura, a partir del diferencial de altura), superficie terrestre e hidrología (salinidad que llega al mar, ríos y su ciclo hidrológico general), aerosoles

(cantidad y su proyección a futuro), océano y eisberg, ciclo del carbono terrestre y biogeoquímica oceánica (Martin et al., 2011).

Gracias a este modelo se pueden realizar estudios a diversos niveles de complejidad, ya que en la familia se incluyen y se omiten ciertos componentes, esto debido a que existen factores que son principales para el estudio de dichos fenómenos, por el contrario que algunos componentes no influyen en dicho estudio (Martin et al., 2011).

El modelo MPI-ESM es un modelo creado por el Max Plank Institute for Meteorology de Alemania, consta de diferentes modelos de circulación general acoplados como son la atmósfera y el océano, así como los modelos de subsistemas para la tierra y la vegetación y para la biogeoquímica marina, además, el ciclo del carbono se ha agregado al sistema de modelos (Giorgetta et al., 2013).

Este sistema de modelos consta de un periodo histórico de 1920-2005 con dichos datos, se toman en cuenta concentraciones de aerosoles en la atmósfera, el perfil de la troposfera, el uso de suelo y sus predicciones, la lluvia, la temperatura de la superficie del mar, el ozono y la emisión de CO₂ antropogénico (Giorgetta et al., 2013).

La complejidad de dicho modelo y su importancia está en el uso de la vegetación en su modelación, así como que los datos ocupados son hasta el 2005 (Giorgetta et al., 2013).

.

2.9.- DAYMET

La investigación en ciencias hidrológicas y ecológicas está cada vez más dirigida a la aplicación del conocimiento adquirido en pequeñas escalas espaciales enmarcado en dominios más grandes. En consecuencia, existe una creciente necesidad de una nueva colección de herramientas y métodos de investigación diseñados con atención a las necesidades y limitaciones particulares de estudios a gran escala (Peter E. Thornton et al., 1997).

Los datos meteorológicos de superficie confiables son un requisito básico para el desarrollo hidrológico y ecológico, así como la investigación a cualquier escala espacial, y es un componente particularmente crucial de los estudios de meteorología (Peter E. Thornton et al., 1997).

El estudio de procesos hidroecológicos a escalas regional y continental se ha visto obstaculizado por la falta de un método general que cumple con los requisitos de datos meteorológicos de tales estudios a gran escala. Aquí te resumimos algunos de los requisitos básicos para datos meteorológicos en estudios de procesos de superficie terrestre sobre grandes dominios espaciales, y presentamos métodos por los cuales estos requisitos se puede reunir (Peter E. Thornton et al., 1997).

La mayoría de estas estaciones registran observaciones diarias de temperaturas extremas (temperatura máxima TMAX, y temperatura mínima TMIN), y precipitación total diaria (PRCP). Algunas estaciones registran otras variables, como la velocidad del viento, la humedad y varios componentes del balance de radiación superficial, pero la cobertura espacial de dichos datos es limitada (Peter E. Thornton et al., 1997).

Estudios previos (McMurtrie et al., 1992; Running & Gower, 1991) han definido las variables meteorológicas diarias mínimas requeridas para simulaciones precisas de procesos hidrológicos y ecológicos de la superficie terrestre, según se indica: precipitación, aire superficial temperatura, humedad del aire superficial y radiación incidente de onda corta.

Daymet genera las variables requeridas a partir de observaciones diarias de TMAX, TMIN y PRCP, dada la elevación, pendiente, aspecto, latitud y albedo en la observación y predicción de sitios a una resolución de 30" * 30" disponible en <https://daymet.ornl.gov/getdata> (Peter E. Thornton et al., 1997).

2.10.- Maxent

MaxEnt, es un software destinado al análisis predictivo utilizando archivos cartográficos en un formato y características específicas.

En general los modelos emplean un archivo de entrada de coordenadas de distribución de especies que es evaluado junto con un grupo de variables ambientales, para dar como resultado la posible distribución potencial de la especie.

La ventaja de las modelizaciones de especies y sus entornos reside en la posibilidad de modelizar situaciones futuras con muestras de datos parciales o “incompletos”, es decir:

Que con un volumen de datos representativo podemos tratar de extrapolar la información advirtiendo datos complementarios. Como resultado de estos análisis, obtenemos nuestros mapas predictivos en los que poder visualizar la distribución potencial de las especies bajo el entorno futurible o actual.

El método de máxima entropía (*MaxEnt*), es un algoritmo del aprendizaje de máquina que combina la estadística y máxima entropía, cuyo fin tiene estimar las probabilidades de distribuciones a partir de diversas restricciones dadas por la información ambiental y/o antrópica del medio geográfico (Candelario-Mejia et al., 2015; Phillips et al., 2006).

La ecuación maximiza la entropía manteniendo las medias de las variables considerando los sitios de entrenamiento (presencias de la especie) y surge de la propuesta matemática de máxima entropía de (Shannon, 1949)(Ec. 1).

$$H = -\sum f_i(x) \ln f_i(x) \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

\sum = suma de todos los pixeles.

f_i = distribución de probabilidad desconocida (Entropía de la distribución).

X = Variable aleatoria en el espacio ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$).

\ln = logaritmo.

Como datos de entrada, el módulo requiere los puntos de muestreo de presencia de la especie y de las variables ambientales que pueda definir la probabilidad de presencia. En estos casos se considerarán al índice de vegetación (imágenes NDVI), altitud, humedad relativa e información de variables bioclimáticas, variables socioeconómicas, sin embargo, diferentes pruebas permitieron discriminar algunas variables y número de presencias pudieran sobre estimar o sub-estimar el modelo.

Dentro de MAXENT se utilizará la opción de regresión logística la cual se refiere a la estimación de la probabilidad p ($Y=1|z$). El logistic output (Phillips & Dudík, 2008).

De esta forma, el logistic output es importante en el sentido, de producir una probabilidad de cada pixel x , sobre cada combinación ambiental z . Cabe mencionar que no generará

nueva información de la especie, convierte los valores de $(x|Y=1)$ a una nueva escala (Phillips & Dudík, 2008).

2.11.- Humedad relativa

Debido a los estudios realizados por (Fernández Vásquez et al., 2017; Real-Cotto, 2017) se sabe que la humedad relativa juega un papel importante en el desarrollo del vector, con valores por encima del 60% y teniendo su valor óptimo en el 70% ya que influye en el desarrollo por lo cual se usó dicha variable dentro del estudio.

La FAO ha publicado un manual de guías para la determinación de requerimientos de agua de los cultivos (Allen et al., 2006) donde propone una forma de calcular la humedad, a continuación, se muestra la ecuación (Ec. 2).

$$HR = (e_a/e^0) * 100 \qquad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

HR: Grado de saturación del aire.

: Presión real de vapor.

$e^0(T)$: Presión de saturación de vapor a la misma temperatura (T).

Para calcular e^0 se requiere de registros de temperatura promedio (Ec. 4), sin embargo, debido a que en este trabajo realizado no se obtuvieron datos disponibles de humedad se llevó a cabo una estimación de la presión real de vapor (e_a), sí se asume que la temperatura de rocío es similar a la temperatura mínima, es decir que al amanecer (salida del sol) la temperatura del aire está casi saturado con vapor de agua y la humedad relativa se encuentra alrededor del 100%.

En este caso la Tmin representó la Trocío, por lo que la ecuación se representa en la ecuación (Ec. 3):

$$e_0 = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

e_0 =Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T[kPa]

T= temperatura del aire [°C]

Exp [..] = 2.78183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

$$e_a = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27 * Tmin}{Tmin + 237.3}\right) \quad \text{Ec.4}$$

Dónde:

e_a =Presión real de vapor [kPa]

Tmin= temperatura mínima del aire [°C]

2.12.- Variables socioeconómicas

Las condiciones sociales en el país pueden determinar el grado de peligro a las enfermedades a las que está expuesta la población en el país, el parque habitacional en su conjunto es de 35 617 724 viviendas. La mayor parte se encuentra habitada (28 607 568), lo que representa 80.4% del conjunto. En cambio, están deshabitadas 4 997 806 viviendas particulares (14.0%) y el resto, 2 012 350 (5.6%), se utiliza de manera temporal (INEGI, 2010).

La existencia de un sistema de tuberías para desalojar de la vivienda los desechos humanos y aguas utilizadas, es un complemento imprescindible para conocer las condiciones sanitarias de las viviendas (INEGI, 2010).

La dotación de infraestructura de redes de recolección pública está conferida, como en el caso del agua, a la gestión municipal, y los datos indican que la población tiene que recurrir a otros lugares de desalojo de aguas servidas como son las fosas sépticas y los desagües directos a barrancas, ríos y mares, entre otros. En otros casos simplemente las viviendas no cuentan con sistema de drenaje (INEGI, 2010).

La estadística censal arroja insumos básicos que permiten medir la cantidad de viviendas conectadas a un sistema salubre de drenaje, así como identificar localidades en riesgo sanitario por la contaminación del medio ambiente (INEGI, 2010).

La información se utiliza a nivel local para identificar necesidades de infraestructura urbana, cuantificar las viviendas y ubicar los lugares donde deben llevarse a cabo programas sociales y medioambientales (INEGI, 2010).

Constituye una de las variables utilizadas para los índices de marginación y de rezago social, así como para inferir la cobertura de los sistemas de drenaje y alcantarillado. Los datos se requieren, en la esfera internacional, para calcular la proporción de la población con acceso a servicios de saneamiento mejorados, como se establece en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (INEGI, 2010).

Otro servicio fundamental para mantener condiciones sanitarias adecuadas en la vivienda y el entorno en que se desarrolla la vida cotidiana de la población, es la disponibilidad de drenaje. La cobertura del servicio de drenaje se ha ampliado en los últimos 20 años, ya que la proporción de viviendas particulares que disponen del mismo creció de 63.6% a 90.3 por ciento (INEGI, 2010).

2.13.- Sobreajuste de modelos

Aiello-Lammens et al., (2015) desarrollaron un método para disminuir la densidad de puntos de presencia en un área, toma a partir de un conjunto de registros de ocurrencia de las especies e identifica múltiples subconjuntos nuevos que cumplen con la restricción de distancia mínima al vecino más cercano.

De estos nuevos conjuntos de datos, uno (o más) que retiene el mayor número de registros puede seleccionarse y usarse para construir un modelo de nicho ecológico.

El centro de este método es un algoritmo implementado en la programación R (R Core Team) que elimina aleatoriamente registros que no cumplen con la restricción de distancia mínima al vecino más cercano (distancia de una circunferencia definida).

Pasos del algoritmo (para una sola repetición):

- 1) El usuario especifica una distancia buffer.
- 2) Calcula las distancias por pares entre todos los registros
- 3) Para cada registro, se identifican los registros dentro de la distancia x definida por el usuario.
- 4) Los registros con el mayor número de ocurrencias vecinas dentro del vecino más cercano está determinado.
- 5) Uno de los registros identificados en el paso 4 se elimina al azar.
- 6) Se repiten los pasos 3 a 5 hasta que los registros en el conjunto de datos no tienen un vecino más cercano más cercano que x .

Las distancias entre registros se calculan utilizando la función "rdist.earth" en el paquete de Nychka et al., (2020) que calcula distancias (en km) entre zonas geográficas, corrigiendo la distancia decreciente por el acercamiento a los polos. En el Código R para ambos algoritmos tanto la función de cálculo de distancias como la restricción de vecino más cercano, se compilaron como un paquete llamado spThin. La función "Thin" proporciona varias opciones descritas a continuación para facilitar el adelgazamiento espacial para modelado ecológico. Este paquete se proporciona como código fuente en el material complementario (Ver anexo 2) y está disponible en la Red Integral de Archivo R (CRAN).

Una sola repetición del algoritmo devuelve un conjunto de datos reducido espacialmente, sin embargo, para todos menos los conjuntos de datos más pequeños, múltiples conjuntos de registros cumplirán con restricción del vecino más cercano.

El usuario especifica el número de repeticiones independientes del algoritmo (n), lo que resulta en múltiples archivos con distintos registros, que pueden variar en la cantidad de registros retenidos.

La configuración predeterminada de "SpThin" es guardar hasta cinco conjuntos de datos que identifica el número máximo de registros retenidos (en comparación en todas las repeticiones). Estos conjuntos de datos se guardan como archivos de valores separados (*.csv) que contienen las columnas: nombre de la especie, latitud y longitud.

2.14.- Sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002). La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente (NASA MODIS WEB, 2008). Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde. Las primeras imágenes captadas por Terra se obtuvieron en Febrero del año 2000. Ambas plataformas monitorean la totalidad de la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud (Justice et al., 1998)

Con base en los datos MODIS, se elabora una gran variedad de productos enfocados al estudio de los océanos (MOcean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criósfera y MODLAND, encargado de producir los datos enfocados a la investigación del complejo terrestre y el cambio global (Mas, 2011).

Estos productos pueden dividirse en tres grandes grupos (Friedl et al., 2002):

- Variables relacionadas con el balance de energía: estas incluyen la reflectancia de la superficie (MOD09), la cobertura de nieve (MOD10), la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre (MOD11), el albedo y la función de la distribución de la reflectancia bi-direccional (MOD43).
- Variables biofísicas relacionadas con la vegetación que comprenden los índices de vegetación (MOD13), el índice de área foliar o LAI por sus siglas en inglés y la fracción de radiación activa fotosintética FPAR (MOD15) y la producción primaria (MOD17).
- Características de la cobertura terrestre: coberturas del suelo (MOD12), puntos de calor e incendios (MOD14), conversión de la cobertura vegetal y fracción de vegetación (MOD44) y finalmente áreas quemadas (MCD45).

2.14.1- Índices de vegetación

Los índices de vegetación se producen como compuestos de 16 días y mensuales de manera global a resoluciones de 250, 500, 1000 metros y 0.05°. Los compuestos de 16 días derivados de Terra y de Aqua presentan un desfase de 8 días, permitiendo la generación de series de tiempo con observaciones cada 8 días, siempre y cuando la calibración entre los sensores de las dos plataformas permita obtener datos totalmente compatibles (Mas, 2011).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es un indicador simple de biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, un cálculo de la salud de la vegetación.

Se considera que el NDVI es más sensible a la clorofila, por lo tanto, los valores van de -1 a 1, valores cercanos a -1 se refiere a zonas con nula vegetación y el valor cercano a 1 se referirá a una planta más sana (Fig. 2-4), y el EVI más sensible a las variaciones estructurales del dosel, incluyendo el índice de área foliar (LAI), el tipo y la arquitectura del dosel y la fisonomía de las plantas. Diferentes estudios de la vegetación mostraron que ambos índices se complementan entre sí mejorando la detección de cambios, así como la extracción de parámetros biofísicos del dosel (Huete et al., 2002).

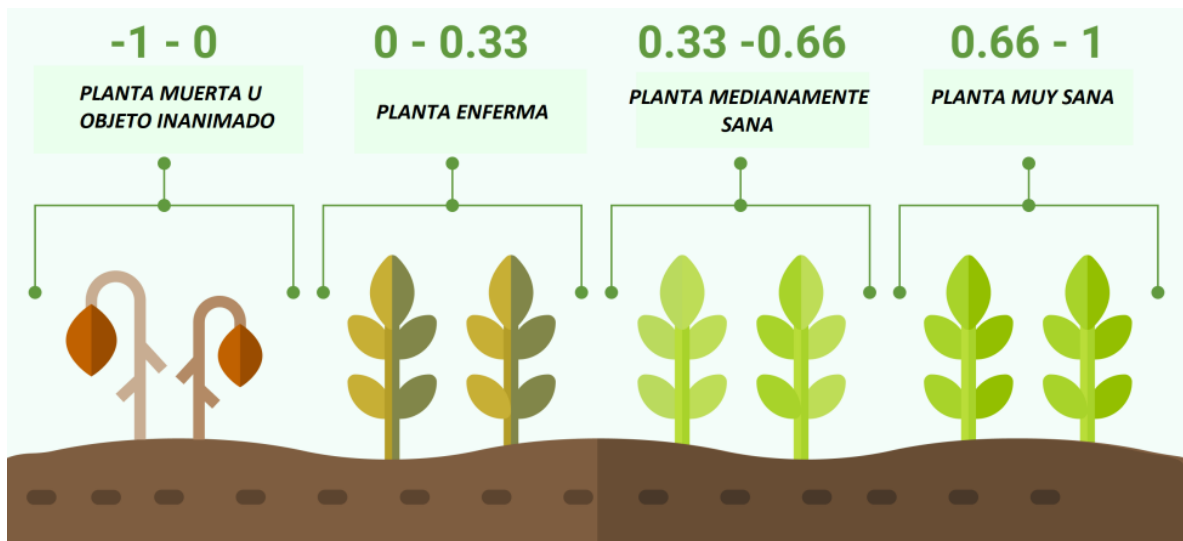


Figura 2-4 Valores del NDVI y su asociación a las plantas (Fuente: Toribio, 2020)

2.15.- Sistemas de clasificación de datos para categorizar

El esquema de clasificación puede tomar varias formas y puede derivarse usando una variedad de métodos. La elección del tipo de esquema y la metodología de clasificación depende en gran medida de la naturaleza de los datos de origen y la naturaleza de los criterios para poner a cada individuo en una clase. Elegir qué método de clasificación usar podría ser la decisión más difícil y complicada que tomará un analista. En muchos casos, hay varios esquemas disponibles que son igualmente válidos pero que representan patrones muy diferentes en el análisis y la visualización (Longley, 2011).

Intervalo igual: organiza un conjunto de valores de atributos en grupos que contienen un rango igual de valores. Esto puede ayudar a mostrar diferentes grupos cuando están cerca de tamaño. Sin embargo, esto no ocurre a menudo en fenómenos geográficos (ESRI, 2020a).

Cuantil: divide los valores de los atributos por igual en un número predefinido de clases. Los valores de los atributos se suman y luego se dividen en el número predeterminado de clases. Para hacer esto, se toma el número de observaciones totales y se divide por el número de clases que dan como resultado el número de observaciones en cada clase. Una de las ventajas de usar este método es que las clases son fáciles de calcular y cada clase está igualmente representada en el mapa. Los datos ordinales se pueden clasificar fácilmente utilizando este método, ya que la asignación de la clase de los cuantiles se basa en datos clasificados (ESRI, 2020a).

Jenks Natural Breaks: El sistema de clasificación de Jenks Natural Breaks, (u Optimización) es un método de clasificación de datos diseñado para optimizar la disposición de un conjunto de valores en clases "naturales". Esto se hace buscando minimizar la desviación promedio de la media de la clase mientras se maximiza la desviación de las medias de los otros grupos. El método reduce la varianza dentro de las clases y maximiza la varianza entre clases (Jenks, 1967).

Desviación estándar: el método de Clasificación de desviación estándar encuentra el valor medio de las observaciones y luego coloca los saltos de clase por encima y por debajo de la media a intervalos de .25, .5 o 1 desviación estándar hasta que todos los valores de datos estén contenidos dentro de las clases. Este método de clasificación muestra cuánto varía el valor de atributo de la característica de la media (ESRI, 2020a).

2.16.- Análisis clúster

Al tratar de clasificar información o datos de entrenamiento muchas veces no se cuenta con una etiqueta para identificarlo, el ejemplo más claro que busca clasificar dichos datos (píxeles) con similitudes entre ellos son los de teledetección (clases de vegetación, zona urbana, cuerpos de agua) (Richards, 2013).

Para clasificar la información se usan de algoritmos de agrupamiento, que buscan identificar datos similares, los principales algoritmos de realizar estas clasificaciones a partir de distancias entre cada píxel, así como la información compartida con los píxeles más próximos entre ellos (Richards, 2013).

El método clúster se usa para clasificar la información, este enfoque se denominada clasificación no supervisada, ya que el investigador no participa directamente en el proceso de clasificación (Richards, 2013).

Dentro de las clasificaciones no supervisadas existe el análisis clúster que es un método que busca reducir una gran cantidad de datos, píxeles, información en grupos o clústers, donde cada grupo tiene similitudes entre ellos (Richards, 2013).

El clúster realiza conglomerados, estos conglomerados se clasifican en función de cómo describen la imagen tanto en similitud de datos como entre proximidad entre ellos, esto realizando conglomerados más significativos o grandes, existiendo distintos grupos menores que se crean, pero posterior a terminar de hacer todas la agrupaciones se asignan a los grupos clúster mayores y más semejantes a este grupo menor (ESRI, 2020b)

Los grupos se ordenan según la superficie total que ocupen, de mayor a menor, dentro del algoritmo se realiza un histograma con los datos, y como en la función de natural Jenks se dividen los datos en grupos haciendo que su diferencia entre el grupo sea la mínima y tratar de maximizar la diferencia entre los grupos (Richards, 2013).

El Análisis Cluster es una técnica estadística multivariante **cuya finalidad es dividir un conjunto de objetos en grupos** de forma que los objetos en un mismo grupo sean muy similares entre sí (cohesión interna del grupo) y los de los objetos de clusters diferentes sean distintos (aislamiento externo del grupo) (Figueras, 2020).

Capítulo 3 Metodología

3.1.- Zona de estudio

La zona elegida para el estudio fue la República Mexicana que cuenta con una extensión territorial de 1,964,375 km², de los cuales 1,959,248 km² son superficie continental y 5,127 km² son superficie insular (SEMARNAT, 2010):

La República Mexicana está situada en el continente americano en el hemisferio norte; parte de su territorio se encuentra en América del Norte y el resto en América Central. México se extiende entre los paralelos 14° 32' 27" en la desembocadura del río Suchiate y el paralelo 32° 43' 06" que pasa por la confluencia del río Gila con el Colorado; así mismo está comprendido entre las longitudes oeste de Greenwich de 118° 22' 00" y 86° 42' 36" respectivamente (Coordenadas extremas) (Fig. 3-1) (Tamayo, 2013).



Figura 3-1 Mapa de ubicación de la zona de estudio (Fuente: Elaboración propia)

Orografía de México

México en su extensión cuenta con diversas formaciones geológicas y geomorfológicas, esto debido a su constante actividad geológica y su ubicación en el cinturón de fuego, así como la interacción de 3 placas tectónicas (SEMARNAT, 2010).

Los diversos sistemas montañosos plegados, las cadenas de origen volcánico y las plataformas calcáreas recientes han creado tres grandes vertientes: al este la del Golfo de México; al centro la del altiplano, y al occidente la del Pacífico, de la misma forma poseemos 2 grandes penínsulas: la de Baja California (que contiene una gran cordillera de 1243 km de largo, el principal sistema montañoso es la Sierra de Juárez), y la de Yucatán que alcanza una altura máxima de 500 msnm.

La más importante es la Sierra Madre Occidental que se extiende 1400 km desde la frontera norte hasta el centro del país, en este lugar se une al Cinturón Volcánico Mexicano que tiene una anchura media de 150 km que puede llegar a más de 300 km en algunas porciones (SEMARNAT, 2010).

Lo importante de este Cinturón es que es una cadena de volcanes que sigue la dirección de varios sistemas de fallas de este a oeste a partir del paralelo 19°N que comienzan desde el Océano Pacífico hasta el litoral del Atlántico, en total recorre 850 km (SEMARNAT, 2010).

En dicho Cinturón existen aproximadamente 3 mil volcanes, algunos aún activos, como el de Fuego de Colima y el Popocatepetl de Puebla, estas formaciones volcánicas alcanzan los 5700 msnm en el pico de Orizaba, 5450 msnm el Popocatepetl, 5326 msnm el Iztaccíhuatl, y el Nevado de Toluca con 4558 msnm (SEMARNAT, 2010).

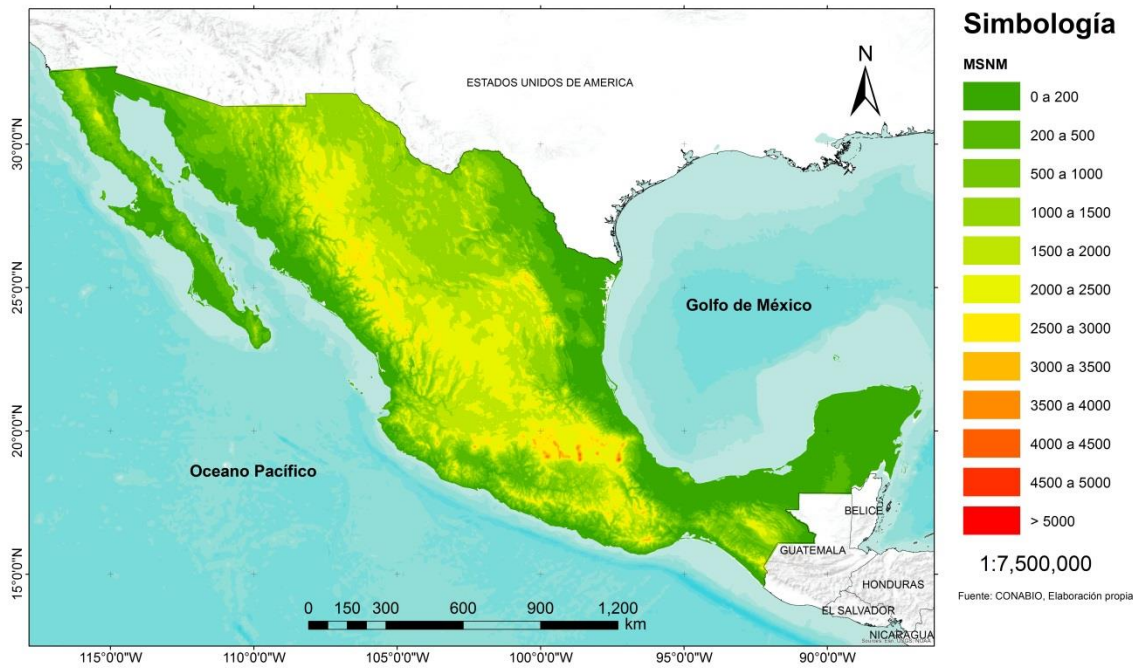


Figura 3-2 Mapa de altitud de la República Mexicana (Fuente: Elaboración propia)

La metodología constará de 5 fases a desarrollar, en estas fases se planea:

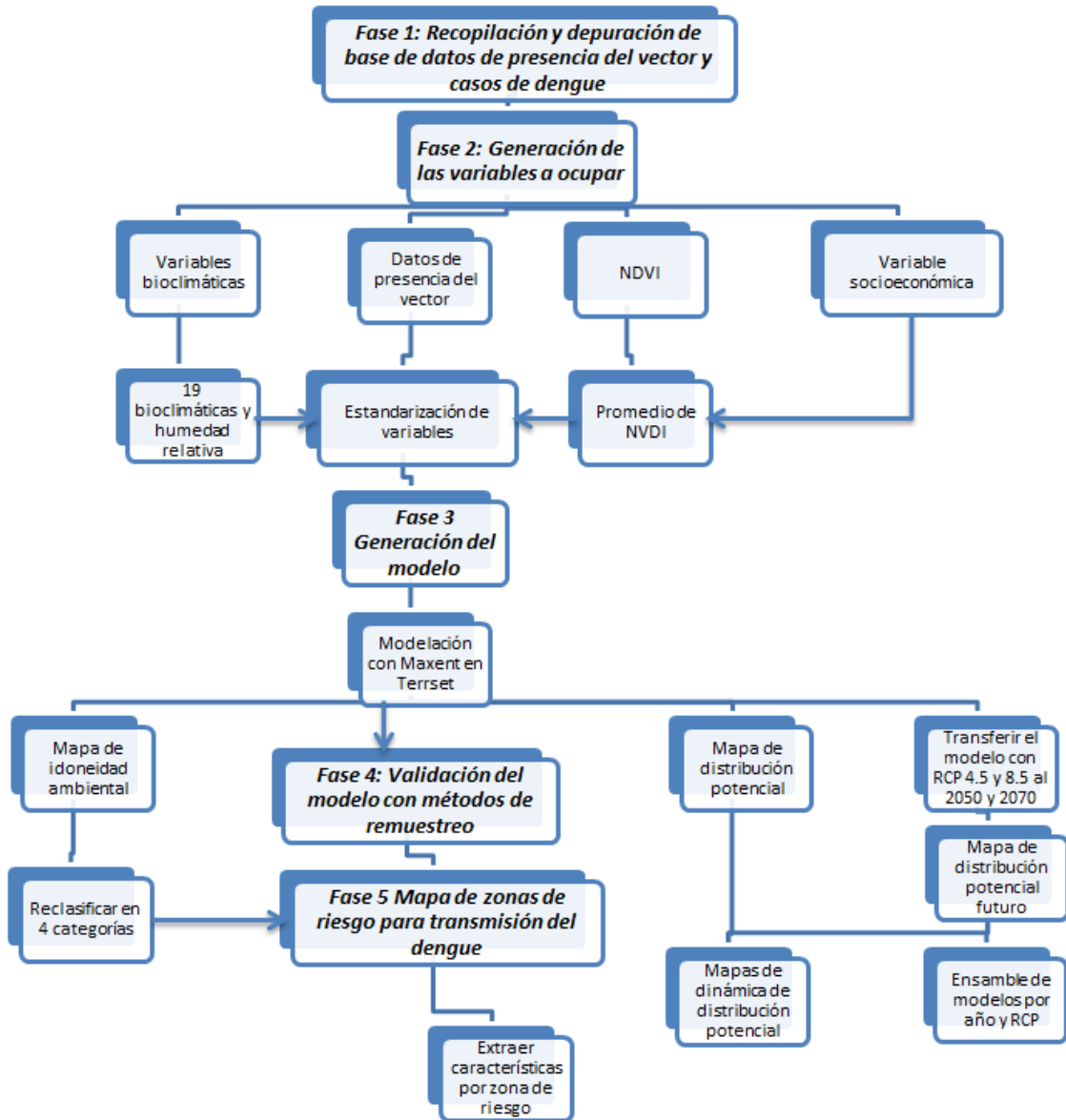


Figura 3-3 Diagrama de flujo de la metodología a emplear (Fuente: Elaboración propia)

3.2.- Recopilar registros de la especie *Aedes aegypti*

La base de datos ocupada para nuestro modelo se creó a partir de la unión de 2 repositorios de libre acceso, el primero se generó con información del GBIF (GBIF, 2020), buscando todos los registros a nivel nacional de México, dicho repositorio cuenta con información de especies del periodo 2000 a 2018, además de una recopilación del *Aedes aegypti* también global del DRYAD (*DRYAD Dryad Digital Repository*, 2020) en todo el mundo, (dicha información también cuenta con registros del *Aedes albopictus* pero se eliminaron dichos registros para solo tener información del *Aedes aegypti*) asimismo se unieron las 2 bases de datos, se creó un archivo único para las 2, se hizo un filtrado de la información que se obtuvo, esto a partir de 3 criterios básicos dentro de nuestra base de datos:

1.- Este filtro para dicha base de datos se llevó a cabo para la base del GBIF con las instituciones que proporcionaban la información al repositorio, esto para que dicha información se obtuviera de fuentes confiables o con estudios respaldados.

2.- El segundo es que no se repitieran datos o existieran 2 puntos con una misma ubicación esto para poder discernir aquellos datos que estaban repetidos y no tener información duplicada.

3.- El tercer y último filtro se realizó para eliminar la correlación espacial de los puntos, esto con el objetivo de no sobre ajustar el modelo resultante debido a una densidad mayor en ciertas zonas o áreas en el mapa:

a) esto se realizó con un buffer respecto a las localidades que presentaron una tasa de incidencia mayor a 1 para poder identificar casos que estuvieran importados a dichas localidades donde fueron reportados, quedando información con localidades que presentaron casos de dengue con una tasa de incidencia mayor a 1 caso cada 10 mil habitantes y presencias a un kilómetro de distancia de dichas localidades, asumiendo la relación entre ambas (Fig. 3-4).



Figura 3-4 Método de eliminación de presencias lejanas a localidades con casos de dengue (Fuente: Elaboración propia)

b) Después se hizo un buffer de 1 km entre los datos de especies resultantes para dejar solo 1 registro en un radio de 1 km esto debido a que se realizaron más modelos con un buffer menor, a 400 metros de distancia y no permitieron predecir bien con los modelos a futuro, ya que predecían menor área que el modelo base. Permitiendo tener una presencia por pixel debido a la resolución espacial ocupada, permite al algoritmo discernir mejor las condiciones que la especie requiere, en este caso no dejando que el modelo subestime debido a la densidad de puntos, este proceso se lleva a cabo eliminando aquellos registros que están dentro del área de influencia del buffer, y así sucesivamente hasta cubrir todos los datos de presencias (Fig. 3-5).

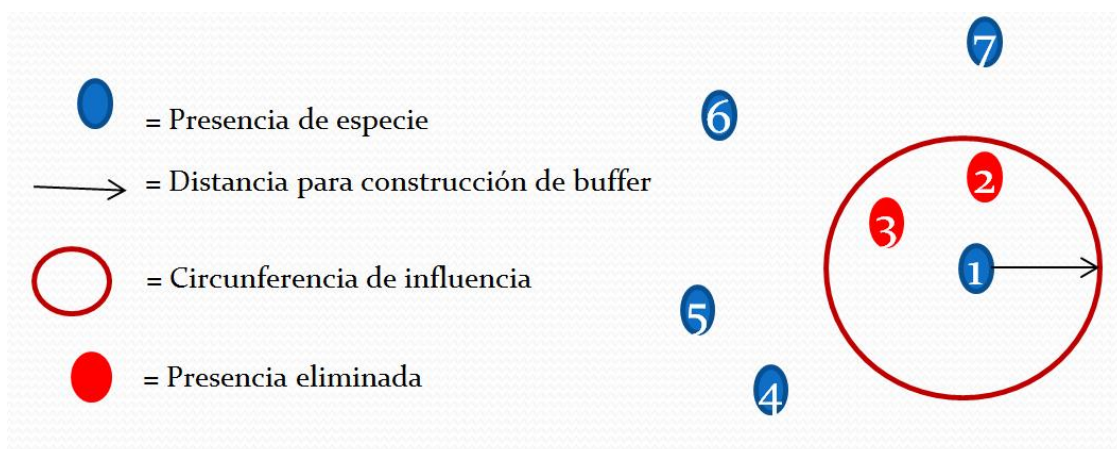


Figura 3-5 Método de eliminación de autocorrelación espacial de las presencias del *Aedes aegypti* (Fuente: Elaboración propia)

Se llevaron a cabo con el código de spThin en RStudio para la eliminación de la correlación espacial desarrollado por (Aiello-Lammens et al., 2015) (Ver anexo 2).

3.3.- Depuración de las bases de datos de salud

Las muertes provocadas por el dengue clásico y el dengue hemorrágico se obtuvieron a través de las defunciones que ofrece el INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/mortalidad> en su apartado de defunciones), esta información se obtuvo a nivel localidad, dentro de la estructura de las defunciones existen identificadores que permiten saber cuál fue la causa de la muerte determinado por la clave internacional de enfermedades, así como el número de localidad, el número de municipio y el número de la entidad, de estos 3 códigos podemos generar , un identificador que permite conocer el número de casos por localidad encontrados, esto se realizó con un programa gestor de base de datos que es Access de Microsoft Windows.

Posterior a esto se filtró la información de las defunciones a través de la selección de las claves CIE-10 que pertenecen al dengue clásico (A90) y al dengue hemorrágico (A91), esto a partir de la “causadefun” de la base de datos, cabe mencionar que en algunas bases de datos se encuentran como A90X y A91X, posterior a esta etapa se exporta a tablas que corresponde a cada año desde 2009 a 2015 en concordancia con las tablas de egresos hospitalarios por dengue.

Para la estructura de la población de las localidades se descargaron los ítem de la página de internet del INEGI en su apartado de población y vivienda (<https://www.inegi.org.mx/temas/estructura>), estos se descargaron en formato diverso (*.csv y *.dbf), para posterior importarlos a un Excel, que contienen información de número de población de los conteos y censos de población de 2010, con dicha información se usaron los campos de la clave de localidad, y la población total de dicha localidad, así como las coordenadas de las mismas localidades para su posterior georeferenciación en el SIG, se exportaron a tablas con el nombre del año que se había generado el censo en un formato de Excel (*.xls) o archivo de texto que contiene la clave de localidad así como la población..

Los egresos hospitalarios se obtuvieron a partir de bases de datos de la Secretaría de Salud para el periodo del 2009 al 2015 con los datos registrados de dengue y dengue hemorrágico, posterior se hizo un filtrado para identificar y eliminar posibles casos importados a partir de la eliminación de localidades con un solo caso en los 7 años de análisis.

3.3.1.- Cálculo de las tasas de incidencia

3.3.1.1.- Estructuración para cálculo de tasas de incidencia

Para estructurar la información disponible se procedió a generar un archivo de base de datos (*.mdb y *.dbf) de los años 2009 al 2015, dentro de dicho archivo se importaron las 4 tablas disponibles: Defunciones, casos de dengue clásico, casos de dengue hemorrágico y la población por localidad.

Dentro de dicha base de datos se generó una consulta que permitió unir tablas en una, a partir del campo que tienen en común como lo es la clave de localidad, y a partir de esta generó una única tabla anual (Fig. 3-6).

Posterior a dicha estructuración de la tabla se planteó generar los indicadores de tasas de incidencia.

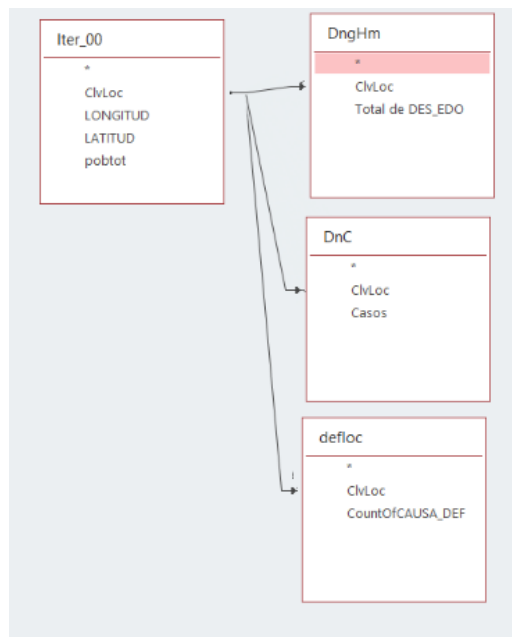


Figura 3-6 Relación de las 3 bases de datos: población, dengue y defunciones (Fuente: Elaboración propia)

3.3.1.2.- Indicadores de Frecuencia

Un evento incidente se define como un evento de caso nuevo de una enfermedad o defunción que ocurre en determinado período de observación.

A partir de esos eventos incidentes pueden crearse varios indicadores de mediciones relativas. Las mediciones relativas que pueden calcularse son la incidencia acumulada o

proporción de incidencia, junto con la tasa de incidencia o densidad de incidencia (Leite, 2018).

Tasa de mortalidad: La tasa de mortalidad es la proporción de personas que fallecen respecto al total de la población en un período de tiempo y una característica particular o una enfermedad en particular (Leite, 2018) (Ec. 5):

$$Tasa\ de\ mortalidad = \frac{Defunciones}{Población} * \text{factor de multiplicación} \quad \text{Ec.5}$$

Tasa de incidencia: La tasa de incidencia se define como el número de casos nuevos de una enfermedad u otra condición de salud dividido por la población en riesgo de la enfermedad (población expuesta) en un lugar específico y durante un período específico, la tasa de incidencia es la probabilidad de que un individuo perteneciente a la población en riesgo se vea afectado por la enfermedad de interés en un período específico. Se determina a partir de los casos encontrados de la enfermedad en estudio en un lugar y tiempo determinado y la respectiva población del lugar, esta tasa de cálculo para cada tipo de dengue tanto clásico como hemorrágico, y se hizo un cálculo del dengue total considerando los 2 anteriores (Leite, 2018) (ec. 6).

$$Tasa\ de\ incidencia = \frac{Casos\ de\ la\ enfermedad}{Población} * \text{factor de multiplicación} \quad \text{Ec. 6}$$

Letalidad de la enfermedad: La tasa de letalidad es la proporción de personas que mueren por una enfermedad entre los afectados por la misma en un periodo y área determinados. Es un indicador de la gravedad de una enfermedad.

Se obtiene dividiendo las defunciones que se presentan de la enfermedad y los casos encontrados en un sitio y un tiempo dado (Leite, 2018) (Ec. 7).

$$Letalidad = \frac{Defunciones\ de\ la\ enfermedad}{Casos\ de\ la\ enfermedad} * 100 \quad \text{Ec. 7}$$

3.4.- Generar las variables ambientales: Bioclimáticas, humedad relativa y el índice NDVI.

3.4.1.- Variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas se generaron a partir de la información disponible en DAYMET (<https://daymet.ornl.gov/>) de imágenes de superficie de las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima (P.E. Thornton et al., 2016) a nivel mensual para el periodo 1980 – 2018. Las series de datos se importó al software TerrSer con el módulo GDAL Conversion utility (Fig. 3-7).

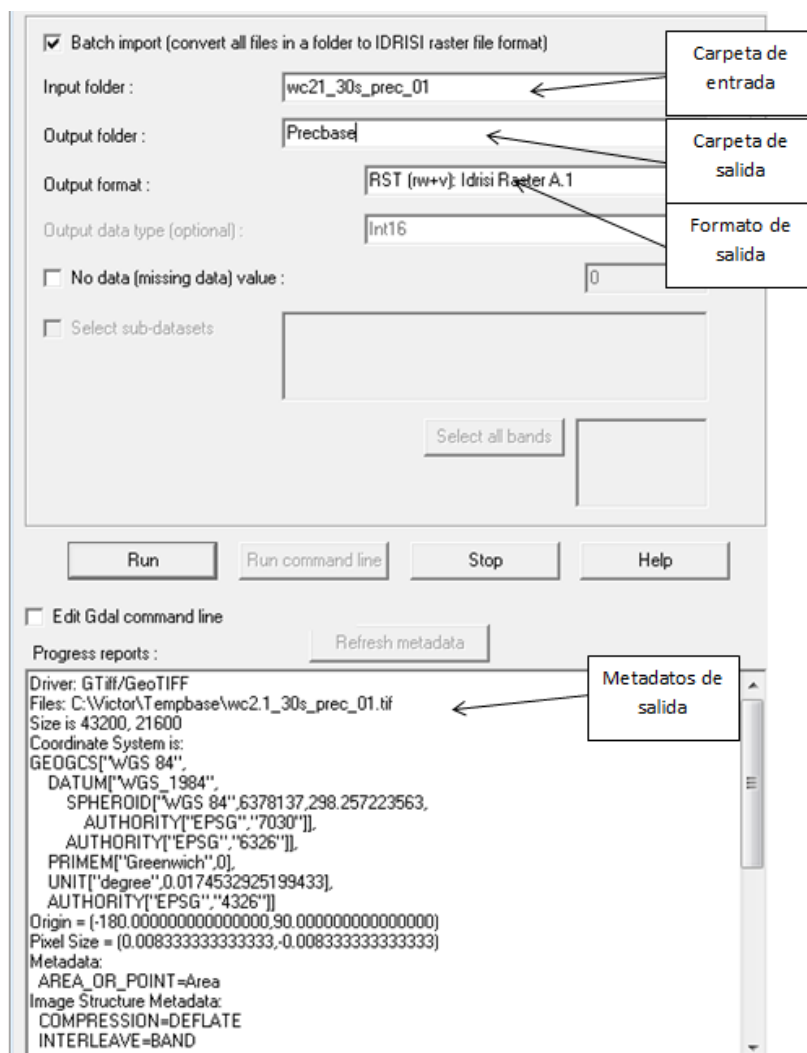


Figura 3-7 Uso del módulo GDAL (Fuente: Elaboración propia)

Las 3 series de tiempo de las variables climáticas se recortaron para la zona de estudio (módulo Project) al mismo tiempo que se hizo la transformación del sistema de referencia de Daymet a coordenadas geográficas. Posteriormente se creó un macromodelo (Fig. 3-8) para obtener los promedios mensuales de cada una de las series climáticas con la finalidad de obtener 12 archivos mensuales por variable (serie de tiempo de 39 años).

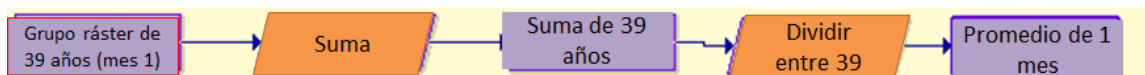


Figura 3-8 Macromodelador para generar promedio mensual (Fuente: Elaboración propia)

Así mismo se llevó a cabo el posprocesamiento de la información en el módulo de Climate Change Analysis en el submódulo de Bioclimatic variables (Fig. 3-9) donde se generaron las 19 variables bioclimáticas (Tabla 3-1, Ver anexo 1) teniendo como base la temperatura máxima la temperatura mínima y la precipitación con la máscara del límite nacional para que solo se obtuviera información de dicha área.

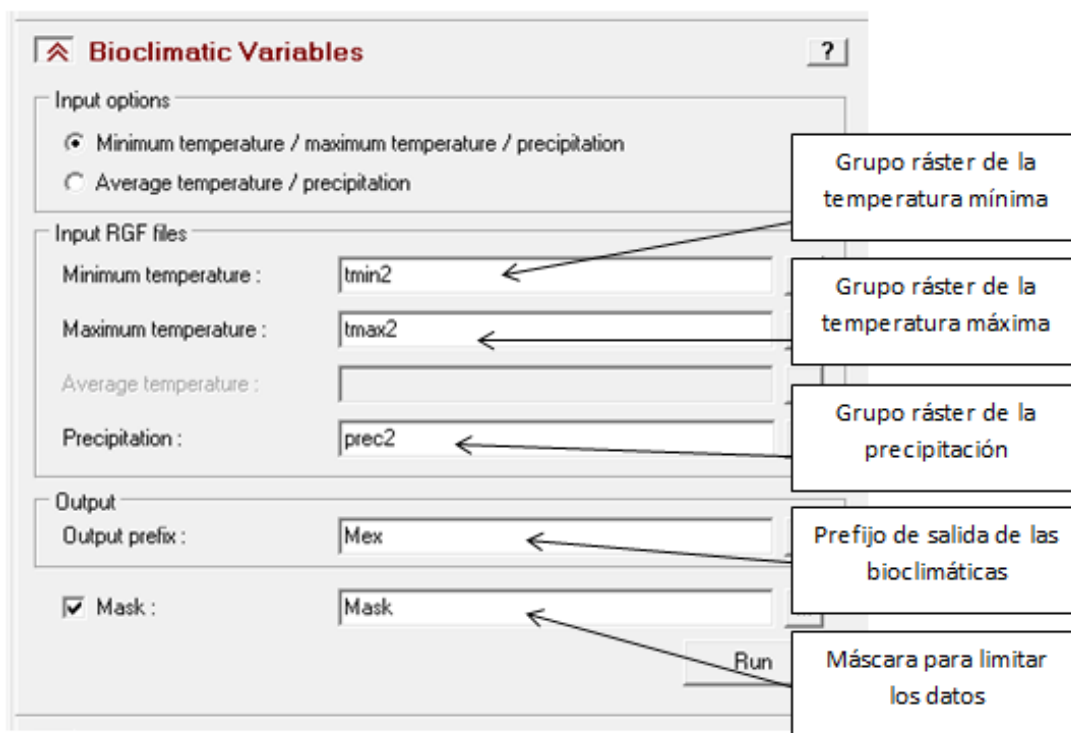


Figura 3-9 Uso del módulo Bioclimatic Variables (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3-1 Descripción de las variables bioclimáticas (Fuente: Elaboración propia)

Bio	Nombre de la bioclimática	
BIO1	Temperatura media anual	Temperatura
BIO2	Rango diurno (promedio mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))	
BIO3	Isotermalidad ($2/7$) ($\times 100$)	
BIO4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar $\times 100$)	
BIO5	Máxima temperatura del mes más caliente	
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	
BIO7	Rango de temperatura anual (BIO5- BIO6)	
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	
BIO12	Precipitación anual	Precipitación
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	
BIO14	Precipitación del mes más seco	
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	
BIO17	Precipitación del trimestre más seco	
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	
BIO19	Precipitación del trimestre más frío	

3.4.2.- NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) se obtuvo a partir de (Yañez-Arenas et al., 2018) disponible en <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/> (K. Didan, 2015) donde se trabajó con imágenes en formato *.tiff descargadas y procesadas del sensor MODIS , a una resolución temporal de 2003 a 2013 obtenidas cada 16 días y una resolución espacial de $\approx 1\text{km}^2$, dicho NDVI se trabajó a partir de un promedio de 6 meses (mayo a octubre) donde el periodo de lluvias es más intenso y donde se asocia al desarrollo del mosquito, de la misma manera se hizo un promedio de los 6 meses para obtener un solo NDVI (Fig. 3-10).

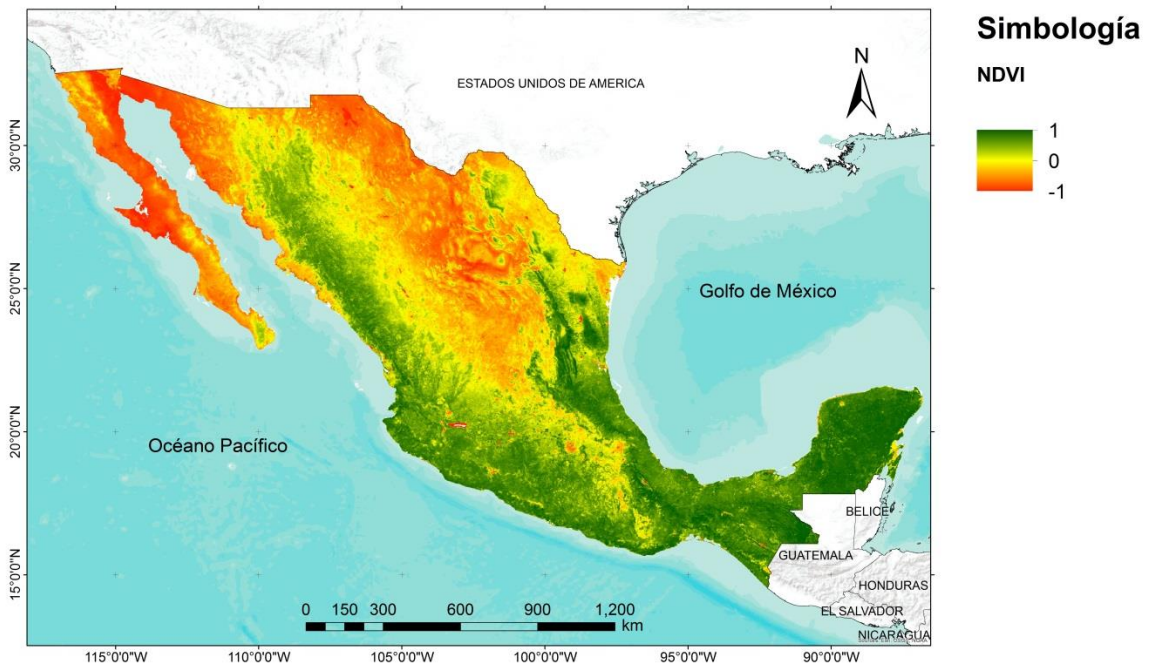


Figura 3-10 Mapa del promedio del NDVI en México (Fuente: Elaboración propia)

3.4.3.- Humedad Relativa

La humedad relativa se calculó por el método implementado por la (Allen et al., 2006) siendo necesaria calcular la temperatura media mensual, la temperatura mínima mensual, posterior se precedió a replicar la formula con un macro modelador (Fig. 3-11)., este procedimiento se llevó a cabo para el escenario base y para los 4 modelos con los 2 RCP (4.5 Y 8.5) y los periodos 2050 y 2070 (Fig. 3-12).

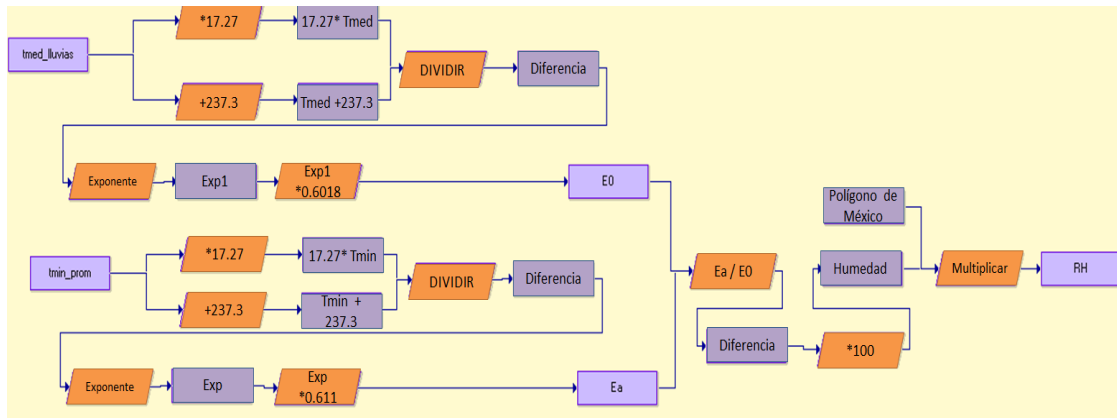


Figura 3-11 Macromodelador para el cálculo de la humedad relativa (Fuente: Elaboración propia)

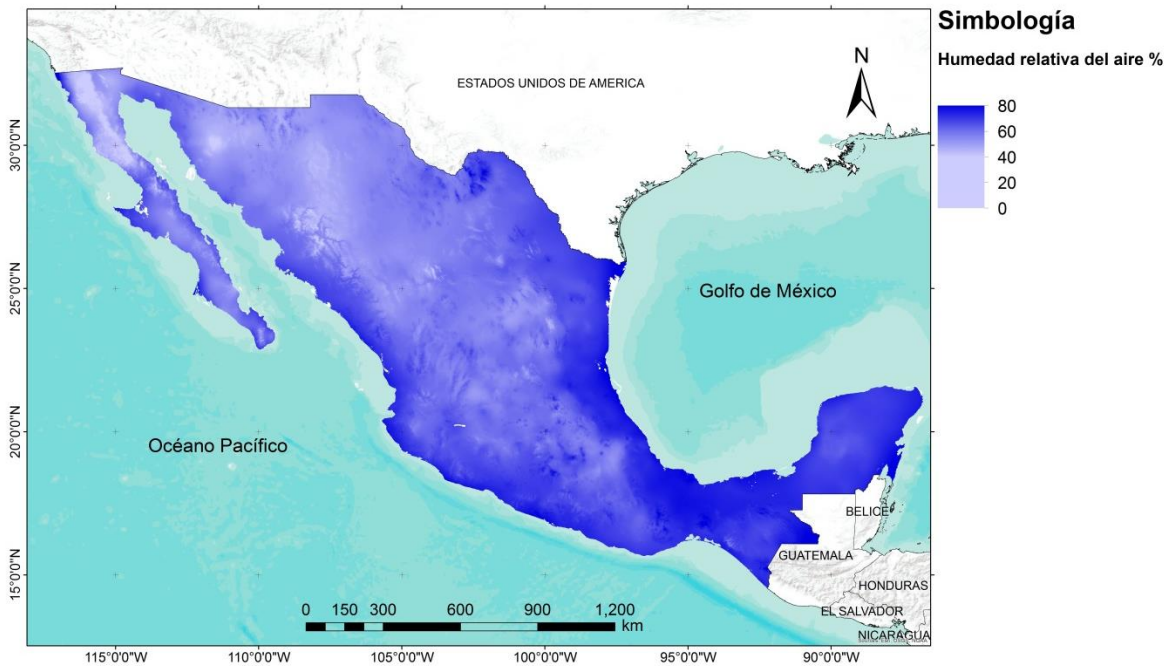
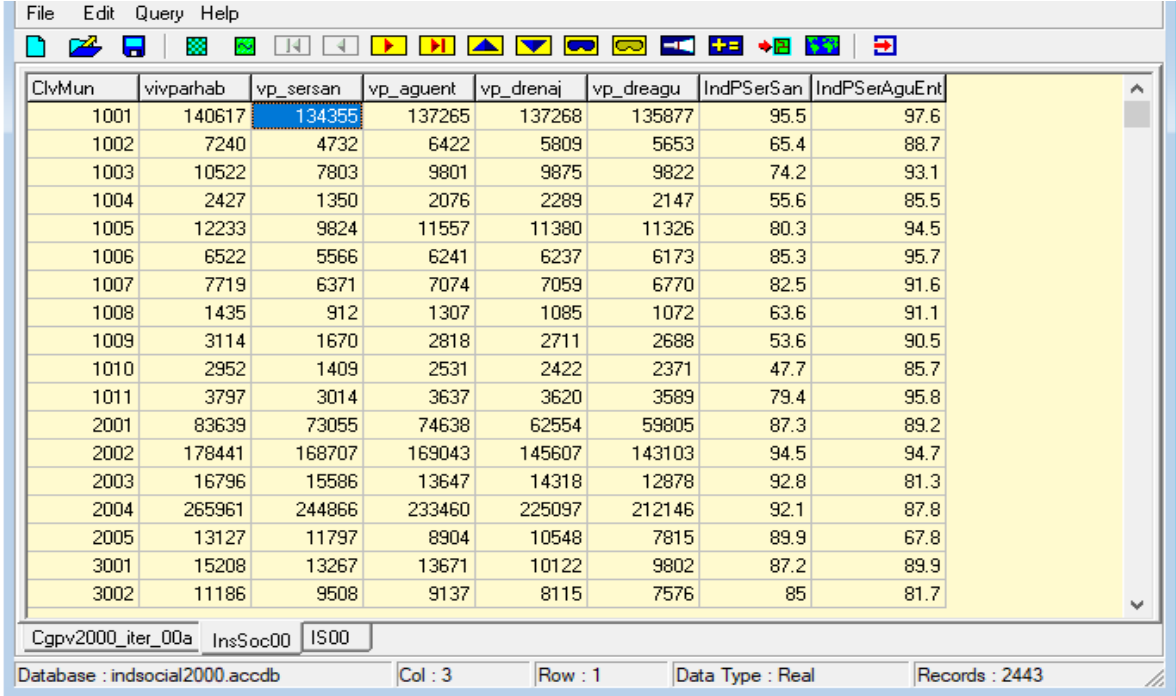


Figura 3-12 Mapa de la humedad relativa en México (Fuente: Elaboración propia)

3.4.4.-Variables socioeconómicas

En la siguiente figura 3-13 se muestra la información de viviendas con servicios básicos por municipio, así como los campos resultados del cálculo de los indicadores en porcentaje, estos a su vez fueron convertidos a formato ráster.



ClvMun	vivparhab	vp_sersan	vp_aguent	vp_drenaj	vp_dreagu	IndPSerSan	IndPSerAguEnt
1001	140617	134355	137265	137268	135877	95.5	97.6
1002	7240	4732	6422	5809	5653	65.4	88.7
1003	10522	7803	9801	9875	9822	74.2	93.1
1004	2427	1350	2076	2289	2147	55.6	85.5
1005	12233	9824	11557	11380	11326	80.3	94.5
1006	6522	5566	6241	6237	6173	85.3	95.7
1007	7719	6371	7074	7059	6770	82.5	91.6
1008	1435	912	1307	1085	1072	63.6	91.1
1009	3114	1670	2818	2711	2688	53.6	90.5
1010	2952	1409	2531	2422	2371	47.7	85.7
1011	3797	3014	3637	3620	3589	79.4	95.8
2001	83639	73055	74638	62554	59805	87.3	89.2
2002	178441	168707	169043	145607	143103	94.5	94.7
2003	16796	15586	13647	14318	12878	92.8	81.3
2004	265961	244866	233460	225097	212146	92.1	87.8
2005	13127	11797	8904	10548	7815	89.9	67.8
3001	15208	13267	13671	10122	9802	87.2	89.9
3002	11186	9508	9137	8115	7576	85	81.7

Figura 3-13 Base de datos del ITER 2010 en TerrSet (Fuente: Elaboración propia)

La información de variables socioeconómicas se descargaron del ITER del año 2010 con los datos y registros de las localidades, de esta manera para cada localidad o población se cuenta con un registro de la cantidad de viviendas particulares, particulares habitadas, habitadas con drenaje, con agua potable entubada, servicios sanitarios, y las 3 en conjunto, se espacializaron de manera que se expresaba el porcentaje de las viviendas ocupadas que tenían acceso a dichos servicios, dicho porcentaje se calculaba con el número de viviendas con servicios entre el número total de viviendas particulares habitadas, así se realizó a nivel municipal para poder ligar dicha cifra a un vector para posterior convertirlo a formato ráster, se espacializaron 3 variables: porcentaje de viviendas con servicios sanitarios, agua entubada y drenaje, dichos indicadores se insertaron al modelo de la misma manera se hizo un análisis de correlación, siendo la variable de servicios con drenaje que presentó mayor aporte de las 3 (Fig. 3-14).

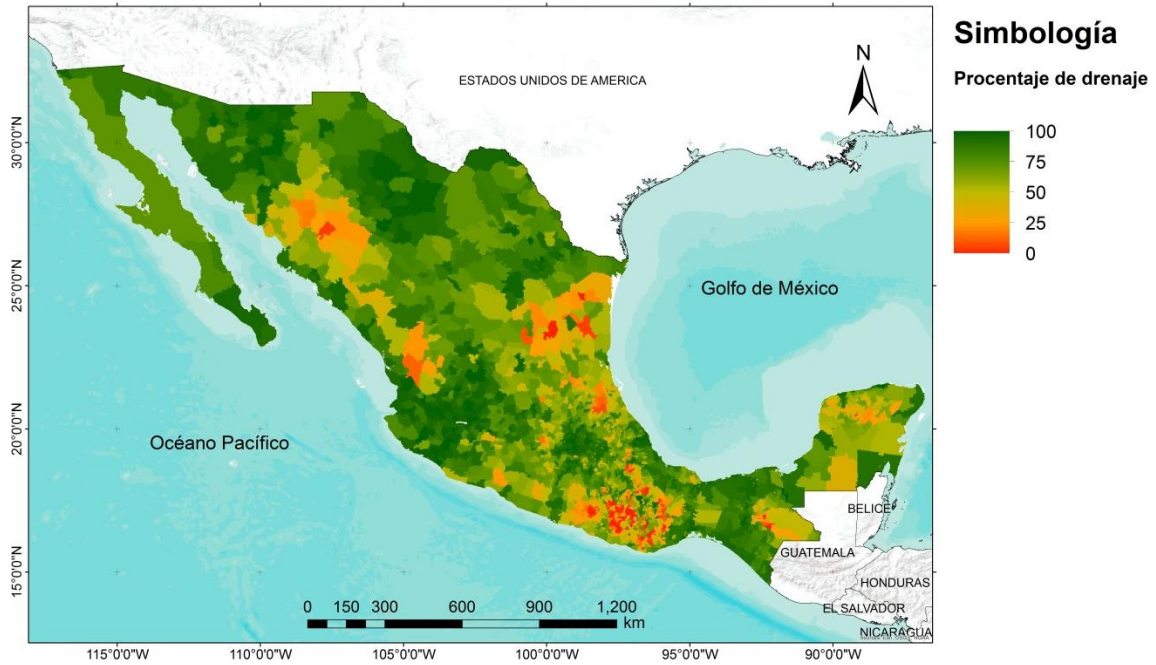


Figura 3-14 Porcentaje de vivienda con acceso a drenaje a nivel municipal (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3-2 Características de las variables finales (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de Variable	Nombre de la Fuente variable	Fuente	Resolución	
			Temporal	Geográfica
CLIMÁTICA	Bioclimáticas	Elaboración propia a partir de DAYMET	1980-2019	Mundial (30''*30'')
	Humedad Relativa	Elaboración propia a partir de DAYMET	1980-2019	Nacional (Propia) (30''*30'')
ÍNDICE DE TELEDETECCIÓN	NDVI	SENSOR MODIS	2003-2013 (Cada 16 días)	Nacional (Propia) (30''*30'')
SOCIAL	Porcentaje de viviendas con acceso a drenaje	INEGI	2010	Nacional (Propia) (30''*30''), a nivel municipal

3.4.5.- Modelos de circulación global

Se descargaron los datos de los 4 modelos antes mencionados del sitio web http://www.worldclim.org/cmip5_30s la temperatura máxima, la temperatura mínima y la precipitación teniendo así el año 2050, para RCP 4.5 y 8.5 de los 4 modelos (Tabla 3-3) y de la misma manera para el año 2070 desde (WorldClim, 2020) después se recortaron para la zona de México y se estructuraron para México con la resolución espacial a 30" x 30", posteriormente se insertaron al módulo de Climate change adaptation modeler para crear las variables bioclimáticas.

Tabla 3-3 Variables descargadas para cada modelo (Fuente: Elaboración propia)

Modelo	Año	RCP
• MPI-ESM-LR (Alemania)	2050	4.5
		8.5
	2070	4.5
		8.5
• GFDL-CM3 (Estados Unidos)	2050	4.5
		8.5
	2070	4.5
		8.5
• HADGEM2-ES (Reino Unido)	2050	4.5
		8.5
	2070	4.5
		8.5
• CNRM (Francia)	2050	4.5
		8.5
	2070	4.5
		8.5

3.6.- Modelar la distribución potencial con base en la caracterización ambiental de nicho el *Aedes aegypti*

Se realizó la modelación de la distribución del *Aedes aegypti* para identificar áreas probables de transmisión del dengue a partir del modelo de MAXENT en el SIG Terrset, se realizó una primera prueba con todas las variables bioclimáticas así como con la humedad relativa y el NDVI, esto con el propósito de analizar el grado de aporte de cada variable al modelo de distribución potencial.

En el mismo modulo se tiene la opción de seleccionar la carpeta que contenga las variables para poder proyectar al futuro, las variables bioclimáticas y la humedad relativa se obtuvo de la misma manera que las del periodo base a partir de promedios, el NDVI y la cobertura de drenaje se tomaron los mismos archivos debido a que no se tienen para periodos futuros. (Fig. 3-15).

3.6.1.- Generar la matriz de correlación y selección de variables

Las variables se seleccionaron a partir de un análisis de correlación espacial, el software Terrset, considerando las 19 variables bioclimáticas así como el NDVI, la humedad relativa, y el porcentaje de servicios de drenaje, el resultado fue una matriz con 21 filas y 21 columnas que contienen el grado de correlación entre cada variable, dicha correlación varía de valores de "1" a "-1" siendo ambos extremos correlaciones altas positivas y negativas respectivamente, para evitar considerar variables repetidas o con alta correlación espacial se optó por seleccionar aquellas variables menores a "0.85" y "-0.85" (Ver anexo 3).

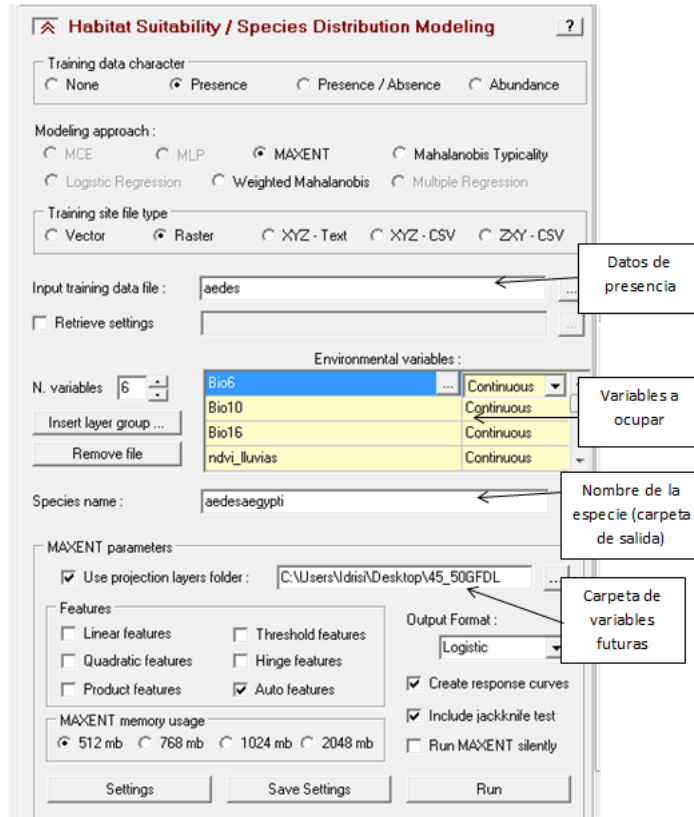


Figura 3-15 Uso del módulo habitat biodiversity (Fuente: Elaboración propia)

3.7.- Calibración y validación del modelo

Los métodos de remuestreo evalúan la certeza del modelo con los casos o presencias de la especie, sin embargo, para calibrar el modelo se utilizó un 25% de registros de ocurrencia los cuales serán divididos con el método de muestreo Bootstrap bajo la consideración de que el 75% de los registros se utilizarán para construir el modelo y el 25% restante para su validación, debido a los posibles errores que pudieran presentarse en la georreferenciación. La forma de agregar los parámetros adecuadamente se realiza cuando en el modelo ya no presenta ningún cambio (prueba error) a partir de los resultados que el algoritmo evalúa de manera interna, en este caso se propone una parametrización con 10 réplicas cada una con 100 simulaciones. El rendimiento del modelo se realizará con la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) y los valores del AUC parcial dentro del mismo paquete de Maxent en Terrset.

El AUC mide la capacidad de un algoritmo de discriminar y discernir entre las presencias de las ausencias la estimación de la sensibilidad (1-omisión) y el error de comisión (1-

especificidad) (Khatchikian et al., 2011). En particular el AUC se refiere a la relación de la porción del área bajo la curva del modelo de predicción respecto al modelo aleatorio y el AUC ratio es similar a diferencia que en este se considera una porción de la curva en el eje de la comisión y de la omisión, en resumen el modelo predice bien sí está por encima del valor medio de la curva que sería 0.50, si el valor es igual o menor a 0.50 el modelo no está prediciendo de manera correcta (Ashraf et al., 2017; Segurado et al., 2006; Yañez-Arenas et al., 2018).

Finalmente se construyó una imagen binaria asumiendo un 10% de error en los datos de ocurrencia dados los posibles errores en la georreferenciación.

Con la finalidad de identificar buenas predicciones del modelo, surge una matriz de confusión (Tabla 3-4), la cual expone las presencias y ausencias previstas y que se relacionan con un estado conocido como presencia o ausencia observada (Fielding & Bell, 1997).

Tabla 3-4 Matriz de confusión (Fuente: Fielding & Bell, 1997)

Predicción	Presencia observada	Ausencia observada
Presencia	A	B
Ausencia	C	D

Dónde:

a=Presencias correctamente predichas

b=Falsos positivos

c=Falsos negativos

d= Ausencias correctamente predichas

3.8.- Calculo de la incidencia acumulada por zonas

Para conocer la tasa de incidencia acumulada en cada una de las zonas de riesgo se requiere tener los casos y la población, para esto se extrajo (módulo *Extract*) la población respectiva de las zonas 1, 2, 3 y 4, estas zonas se definieron al clasificar áreas de riesgo dentro del modelo, con la ayuda de la función natural breaks, se eligió definir 4 rangos para agrupar datos para reconocer y poder visualizarse de manera sencilla, centrando solo en 4 zonas posterior también se extrajeron los casos que existían dentro de las zonas 1, 2, 3 y 4 quedando 2 mapas (Fig. 3-16).

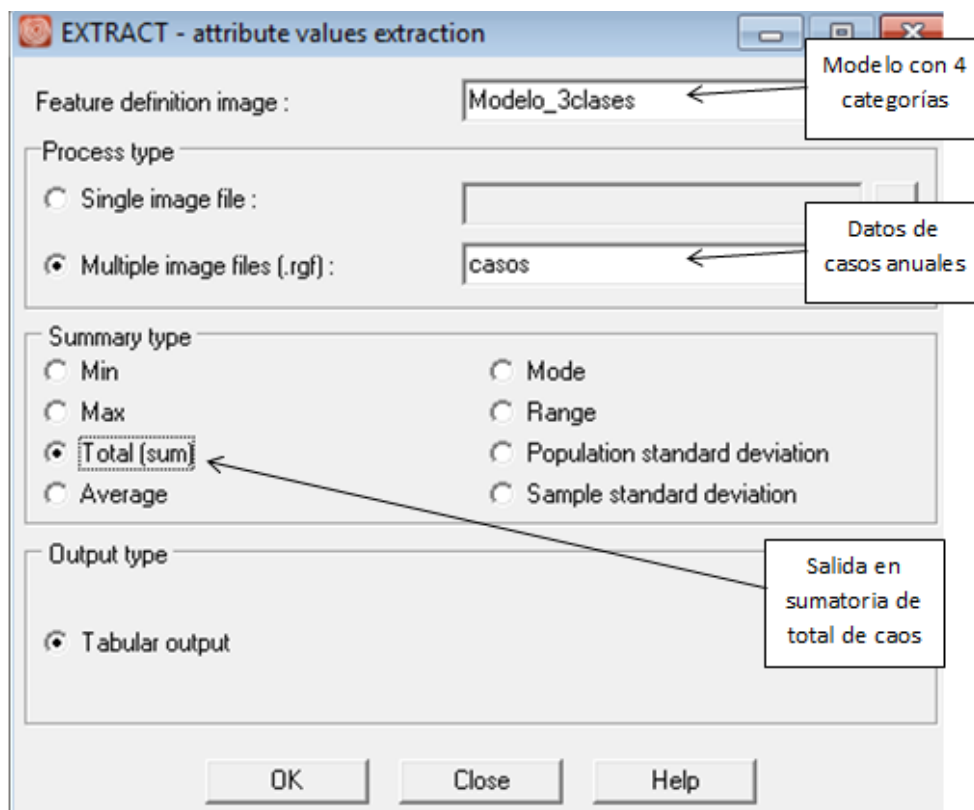


Figura 3-16 Extracción de los casos en el modelo (Fuente: Elaboración propia)

Se calculó la tasa de incidencia del dengue por zonas de riesgo con la ayuda de algebra de mapas, con el mapa de la población por zonas, luego con el de los casos de las mismas áreas y posterior dividiendo (Casos/población) *100 mil (factor de multiplicación) para obtener la tasa de incidencia por cada 100 mil habitantes (Fig. 3-17).

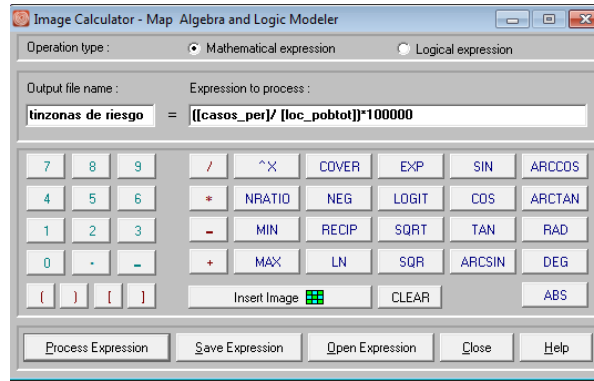


Figura 3-17 Algebra de mapas para obtener tasa de incidencia (Fuente: Elaboración propia)

3.9.-Transferencia del modelo de mayor rendimiento resultante al 2050 y 2070

Una vez obtenido el modelo de distribución potencial actual, se transfirió el modelo a los escenarios futuros de los modelos GFDL_CM3, MPIESM_LR, CNRMC5, HADGEM2 para los RCP 4.5 y 8.5 para los años 2050 y 2070, los cuales probaron ser los más aptos para predecir eventos meteorológicos extremos a nivel región según el INECC-IMTA, (2014).

Cuando se obtuvieron dichos mapas se reclasificaron para que quedaran un mapa binario, de esta manera se tenían 2 mapas binarios, el base o actual y el escenario a futuro.

Finalmente, el resultado de cada uno de los modelos de distribución potencial futuros se reclasificaron en mapas binarios, esto con el fin de relacionar y comparar el mapa binario base (mapa de distribución potencial) y el mapa futuro.

3.10.-Dinámica de áreas de distribución potencial futuras

Para poder analizar la dinámica de cambio de área dentro de los modelos (aumento, disminución, estabilidad) se usó el módulo Crosstab de Terrset (Fig. 3-18).

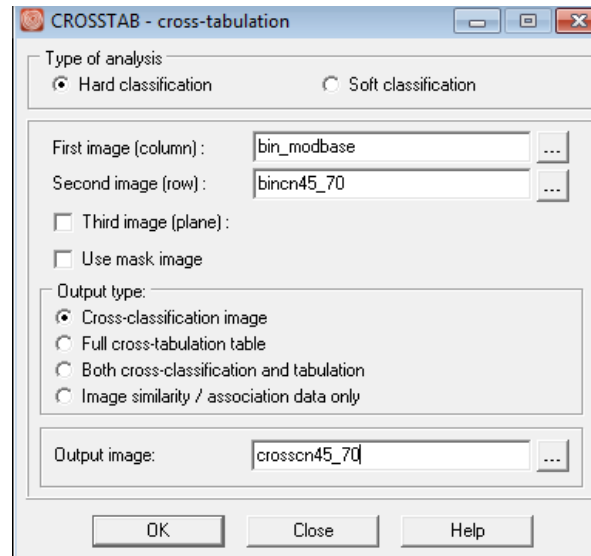


Figura 3-18 Uso del módulo crosstab (Fuente: Elaboración propia)

Este módulo nos permite discernir las diferencias de área respecto a 2 imágenes binarias, esto se logra a partir de 4 combinaciones dentro del modelo:

La clasificación 0 | 0 corresponde a que dicha área no coincide en ninguna de las 2 imágenes de nuestro modelo, por lo tanto, es la zona de no idoneidad presente y futura.

La clasificación 1 | 0 señala las áreas que están presentes en la imagen binaria número 1, pero que en la 2 no se presenta, por lo tanto, señala las áreas que en dicho futuro ya no serán idóneas para el mosquito, esto significa que muy probablemente no existan contagios nativos de esas zonas en el futuro.

La clasificación 0 | 1 indica aquellas áreas nuevas presentes en el modelo número 2 (futuro), son zonas que aumentan entonces son de importancia ya que por ahora no se tiene una idoneidad ambiental para el desarrollo del mosquito pero en el futuro el mosquito podrá desarrollarse lo cual indica donde hay que comenzar a tener medidas distintas para que el mosquito no se desarrolle y pueda controlarse, o comenzar a tener una cultura de medidas de prevención.

La clasificación 1 | 1 son aquellas áreas dentro de los 2 modelos que se mantienen, por lo tanto, son zonas de estabilidad para el mosquito que son y serán idóneas para su desarrollo.

Se hizo dicha combinación con cada uno de los modelos, dividiéndolos por MCG.

Estas combinaciones se realizaron como imagen primaria al modelo base de distribución potencial y cada uno de los modelos de circulación global obtenidos (Teniendo 16 mapas de crosstab).

El resultado queda de la siguiente manera como ejemplo (Fig. 3-19):

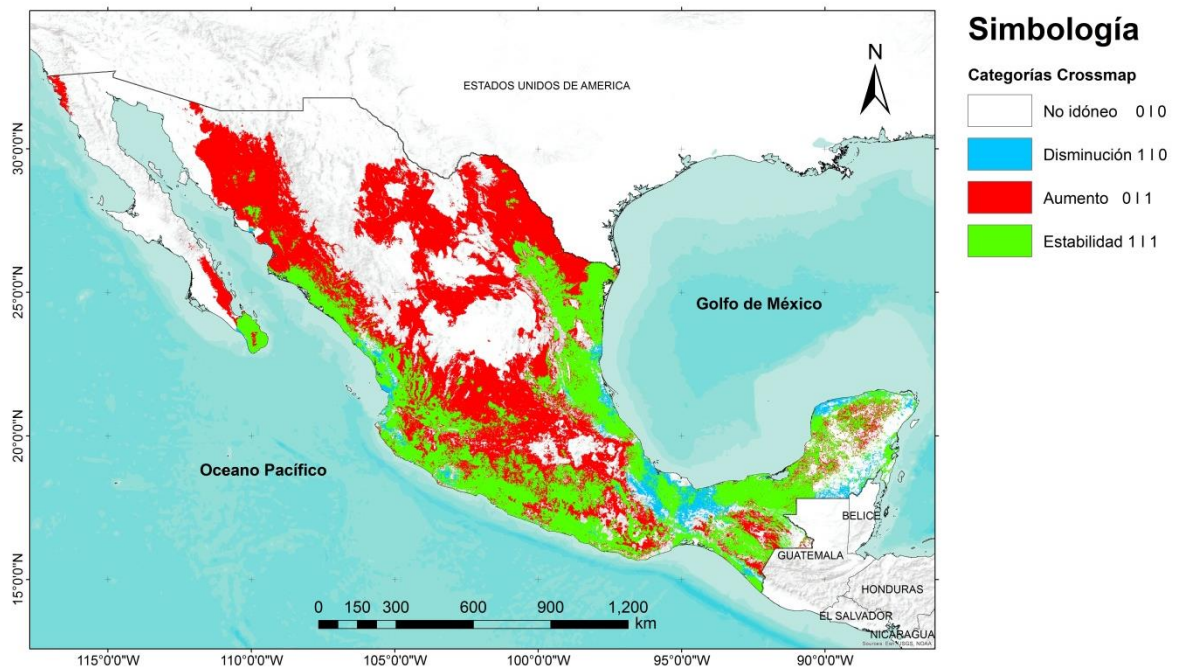


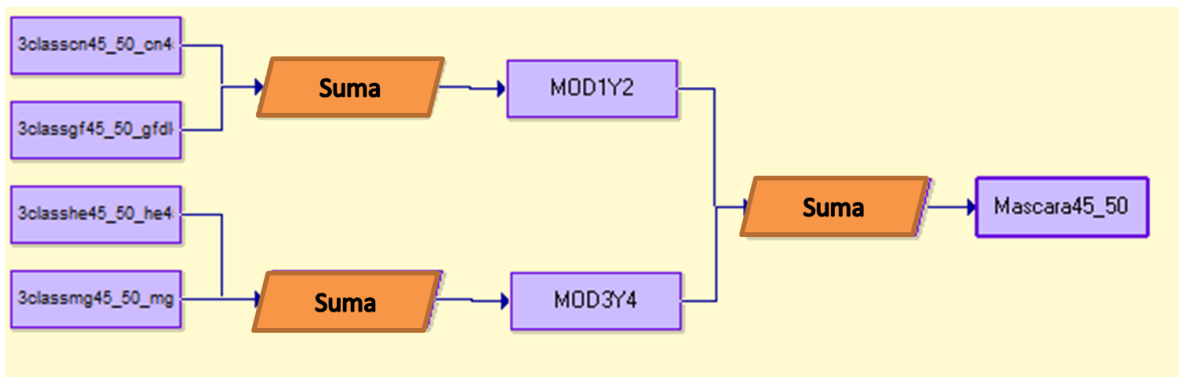
Figura 3-19 Salida del módulo crosstab (Fuente: Elaboración propia)

3.11.-Ensamble de modelos

Para realizar el ensamble de los 4 modelos (HADHEM2, MPIES-RS, CNRMC5 y GFDLM) se optó por realizar un análisis clúster o análisis de conjuntos, esto nos permitió agrupar la información a un número limitado de grupos finales, optando por dividirlos en 3 categorías, mismas que serán de riesgo: bajo, medio y alto.

Este procedimiento se realizó a partir de la reclasificación de los 4 modelos analizados, al tener una salida de probabilidad de 0 a 1 como el mapa principal de riesgo se usaron las mismas categorías, (0: de 0 a 0.272, 1: 0.272 a 0.562, 2: 0.562 a 0.620, 3: 0.620 a 1) se hizo para cada mapa en específico como es el año y el RCP, siendo estos los 16 de mapas de riesgo individual.

Para tener los datos de entrada completos y ya que el análisis clúster requiere de una máscara para procesar los límites, los modelos se procesaron (reclasificaron) en formato binario y se sumaron teniendo una única imagen de salida (Fig.3-20) que sería la máscara de ese año y ese RCP.



*Figura 3-20 Macromodelador de máscaras de modelos con características similares
(Fuente: Elaboración propia)*

Esta imagen binaria sirvió para tener una imagen única del año y RCP respectivo, teniendo de esta manera 4 máscaras:

Año 2050 RCP 4.5

Año 2050 RCP 8.5

Año 2070 RCP 4.5

Año 2070 RCP 8.5.

Después de esto se inicia el proceso (Fig. 3-21) resultando una imagen única que tiene 3 grupos definitivos que corresponden a las 3 categorías de riesgo general, logrando tener así 4 mapas de riesgo únicos: año 2050 RCP 4.5, año 2050 RCP 8.5, año 2070 RCP 4.5, año 2070 RCP 8.5.

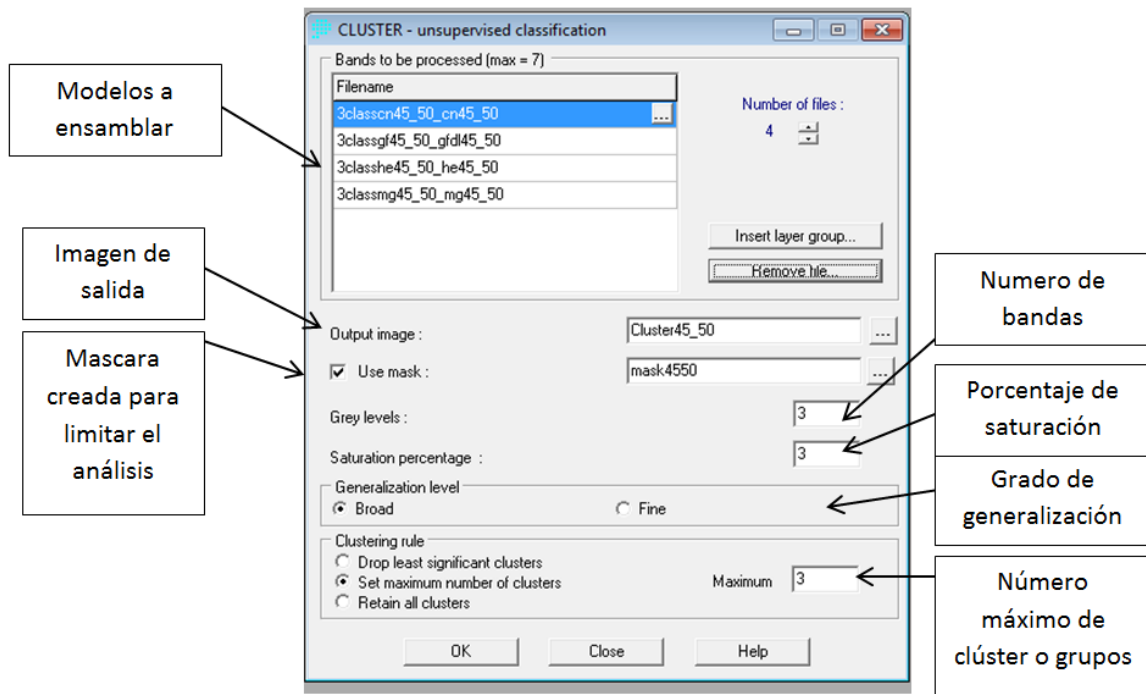


Figura 3-21 Uso del módulo clúster

Capítulo 4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la investigación, como lo son la tabla de presencias del *Aedes aegypti* por institución y el número de datos por año, los puntos resultantes de la eliminación de datos repetidos y el número de puntos resultantes después de la eliminación de la autocorrelación espacial, el mapa de idoneidad ambiental, el mapa de distribución potencial, así como el cálculo y ubicación de áreas con mayor riesgo, la tasa de incidencia por dichas zonas y los escenarios a futuro (4 modelos) con un RCP 4.5 y 8.5, de la misma manera a los años 2050 y 2070.

4.1.- Datos de presencia

Como parte de la revisión de los datos obtenidos de GBIF, se detectaron como fuente de información de *Aedes aegypti* a 7 instituciones orientadas al sector salud con información confiable ya que se observó que 1000 registros aproximadamente no contaban con alguna justificación del dato de presencia recolectado. El mayor proveedor de datos fue la secretaria de salud de Guanajuato reportando la mitad de los datos de presencia, esto gracias a un monitoreo en el periodo de 2000 a 2011 en el Estado, productos del filtrado se obtuvieron y de la eliminación de registros repetidos se obtuvo una tabla con 1800 registros a nivel nacional (Ver anexo 4).

Autocorrelación espacial

Para eliminar la autocorrelación espacial se realizaron diversas pruebas, bajo la consideración de quedarse con los registros de presencia de la especie con evidencia de presentar en la cercanía (buffer de 1 km), localidades con tasa de incidencia de dengue mayor a 1 por cada 100 mil habitantes, también con el código de R (Aiello-Lammens et al., 2015) se eliminaron los puntos o vecinos cercanos para eliminar esa autocorrelación igual de 1 km quedando de esta manera la base de datos se redujo a 600 registros (Fig. 4-1).

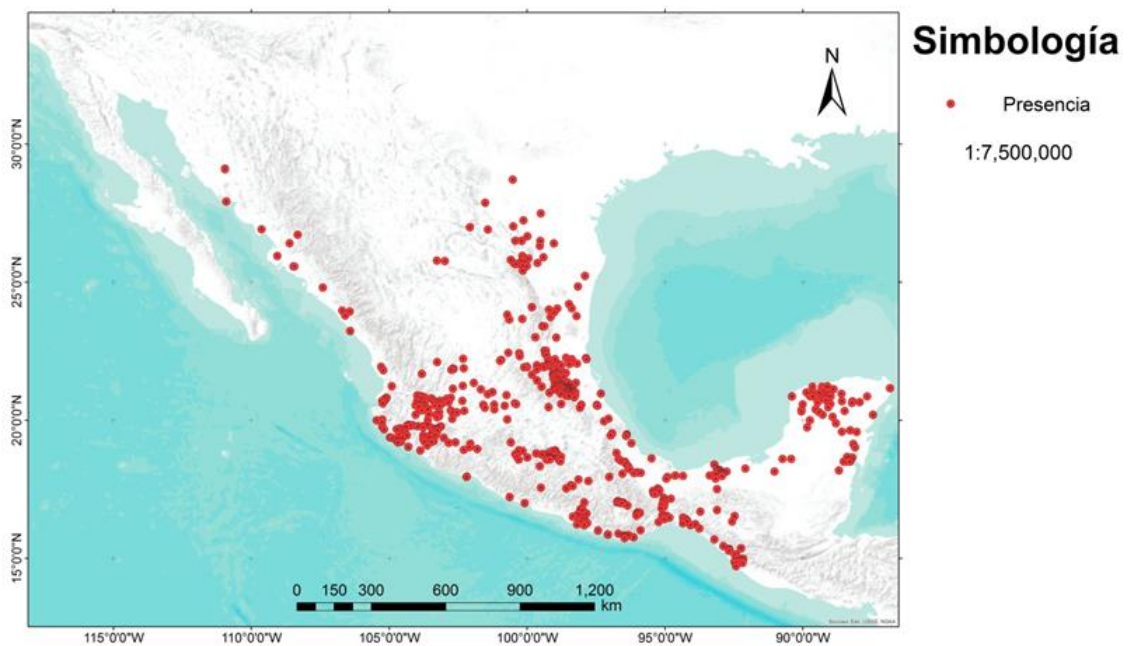


Figura 4-1 Mapa de presencia del Aedes aegypti, (Fuente: Elaboración propia a partir de GBIF y DRYAD)

4.2.- Tasas de incidencia, mortalidad y letalidad por localidad del dengue

Se calculó la tasa de incidencia acumulada, la tasa de mortalidad y la letalidad de la enfermedad a nivel localidad (Fig. 4-2).

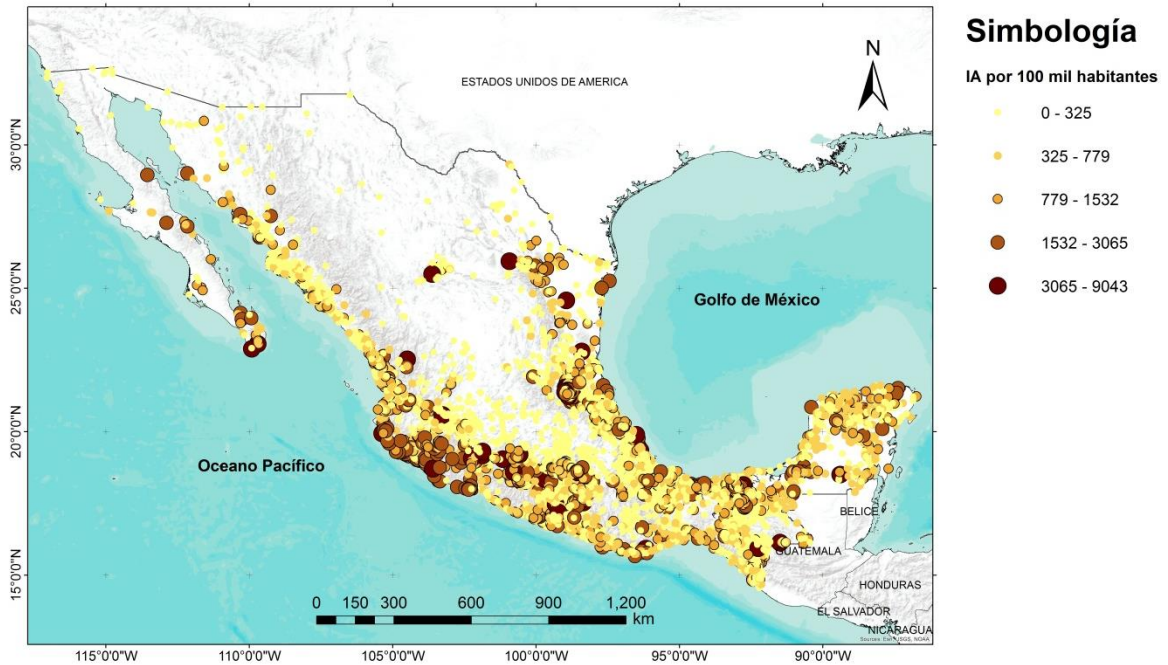


Figura 4-2 Mapa de tasa de incidencia acumulada del dengue clásico en México por localidad para el periodo 2009-2015 (Fuente: Elaboración propia)

En este mapa Fig. 4-2 se observa como la incidencia del dengue clásico se centra más en la parte occidental del país, zonas de mayor importancia en los estados de Michoacán, Jalisco y en la península de Yucatán, así como en la península de Baja California con tasa de incidencia por localidad superiores a los 3 mil casos por cada 100 mil habitantes.

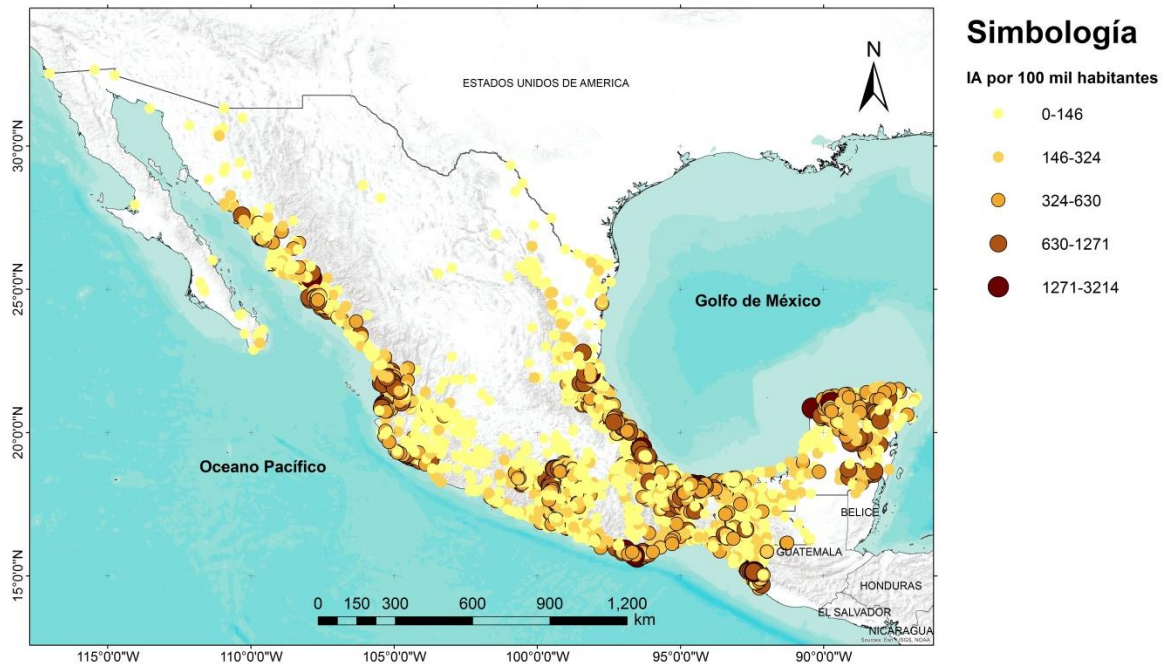


Figura 4-3 Mapa de tasa de incidencia acumulada del dengue hemorrágico en México por localidad para el periodo 2009-2015 (Fuente: Elaboración propia)

Respecto a la incidencia del dengue hemorrágico se observa cómo impacta más en la zona oriental del país (Fig. 4-3), estados como Veracruz, Tabasco, Chiapas y la Capital de Yucatán concentras la mayor cantidad de incidencia llegando hasta los 3,000 casos por casa 100 mil habitantes.

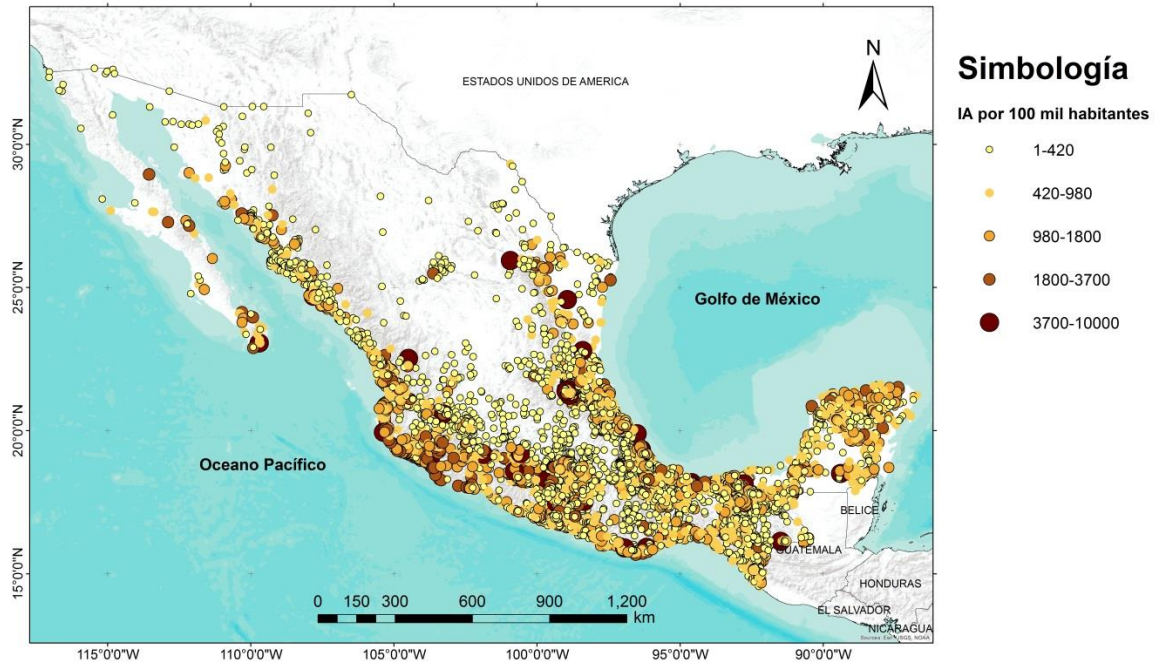


Figura 4-4 Mapa de tasa de incidencia acumulada del dengue clásico y hemorrágico en México por localidad para el periodo 2009-2015 (Fuente: Elaboración propia)

Y respecto al total de los casos tanto del dengue clásico y hemorrágico vemos que las costas de Jalisco, Colima, Nayarit así como en Veracruz se concentra una mayor cantidad de incidencia, también se encuentra una porción con muchos casos en la península de Baja California Sur, y también en la costa de Sonora y Sinaloa (Fig. 4-4), viendo la distribución de cada uno de los tipos de dengue se aprecia que se centran en las costas del país y de la misma manera en zonas con clima tropical o subtropical dentro del país.

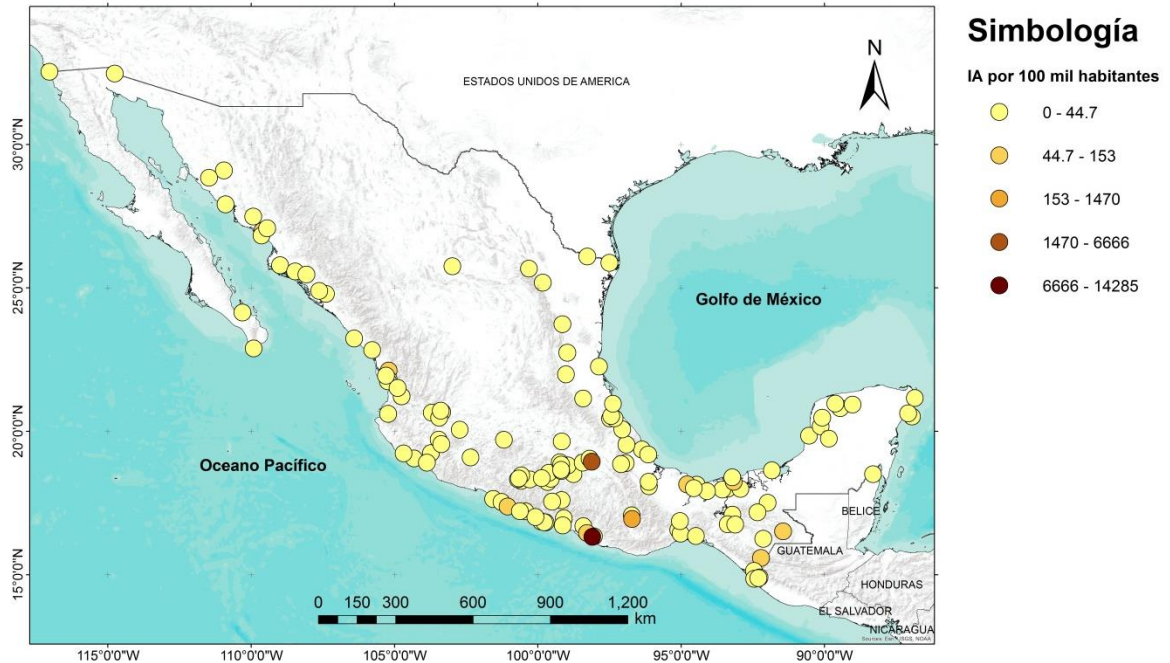


Figura 4-5 Mapa de tasa de mortalidad del dengue en México por localidad para el periodo 2009-2015 (Fuente: Elaboración propia)

Respecto a la tasa de mortalidad hay que tener en cuenta que son la cantidad de personas que mueren por la enfermedad, la mayoría son de 44 personas cada 100 mil habitantes aunque sabemos que el dengue no es la enfermedad más letal si son considerables las defunciones presentes en la zona más importante en zonas como Tlaxcala y Guerrero donde la tasa se eleva hasta arriba de 6 mil defunciones por localidad (Fig. 4-5).

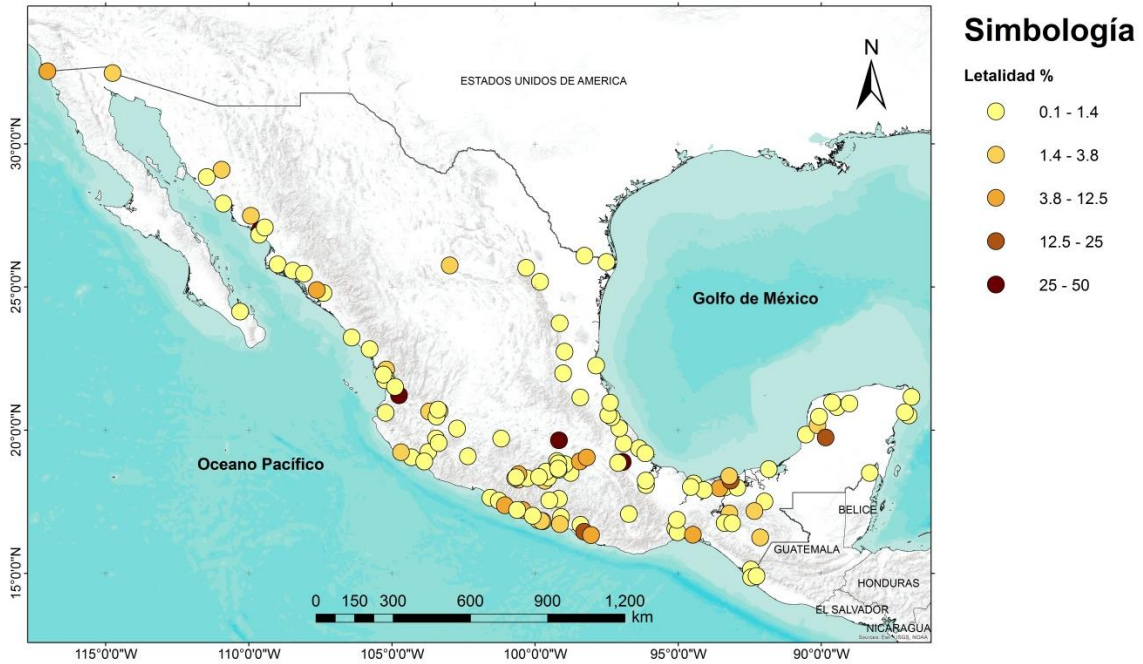


Figura 4-6 Mapa de letalidad del dengue en México por localidad para el periodo 2009-2015 (Fuente: Elaboración propia)

La letalidad al igual que la mortalidad del dengue no está distribuida ampliamente en el país, a pesar de eso se tienen localidades donde más de 25% de los casos confirmados fueron mortales, esto se debe a que se presentaron en localidades con poca población por ello cuando se hace el cálculo de la letalidad este valor se eleva, (Fig. 4-6).

4.3.- Modelo resultante

Como un proceso paralelo al análisis de correlación se optó así mismo por generar un modelo de distribución potencial en MaxEnt con las 21 variables para conocer el grado de aporte que tenía cada una de las variables al modelo lo que ayudaría a seleccionar tanto las variables independientes del análisis de correlación como las de mayor aporte al modelo, de esta manera se obtuvo la tabla (Tabla 4-3) con los porcentajes de aporte de cada una de las variables.

Tabla 4-3 Porcentaje de aporte de las variables al modelo (Fuente: Elaboración propia)

Variable	% aporte al modelo
Bio6	20.7
Bio19	20.3
NDVI	10.2
Bio11	8.8
Bio15	8
Porcentaje de drenaje	5.5
Bio4	5.1
Bio14	4.4
Bio9	3
Bio10	2.5
Bio2	2.3
Bio5	1.8
Bio17	1.8
Bio3	1.6
Humedad relativa	1.1
Bio8	1.1
Bio18	0.6
Bio12	0.3
Bio13	0.2
Bio7	0.2
Bio1	0.2
Bio16	0.1

Se eligieron las 3 variables bioclimáticas únicamente (Bio6, Bio10 y Bio16) ya que al agregar la 4 no cambiaba el AUC del modelo, respecto a la elección de la Bio 16 se determinó su uso debido a la poca correlación que tenía respecto a las otras 2, y su alta correlación con las restantes variables.

El modelo resultante se obtuvo a partir de la separación y elección de variables poco relacionadas entre sí que tuvieran un aporte mayor al modelo y que de la misma manera fueran significativas en él, así como dentro del desarrollo de la especie en alguna de sus etapas evolutivas, a partir de los 641 registros de la especie se modeló en el software Maxent con las variables: Bio6: temperatura media del cuarto más cálido (36.6% de contribución), Bio10: precipitación del mes más seco (9%), Bio16: precipitación del cuarto más húmedo del año (28.8%), NDVI del periodo de lluvias mayo a octubre (12.9%), humedad relativa del periodo lluvioso del año mayo a octubre (1.7%) y el porcentaje de drenaje (11.1%) cubierto por municipio a nivel nacional respecto a la curva ROC su valor fue de 0.89 (Fig. 4-7).

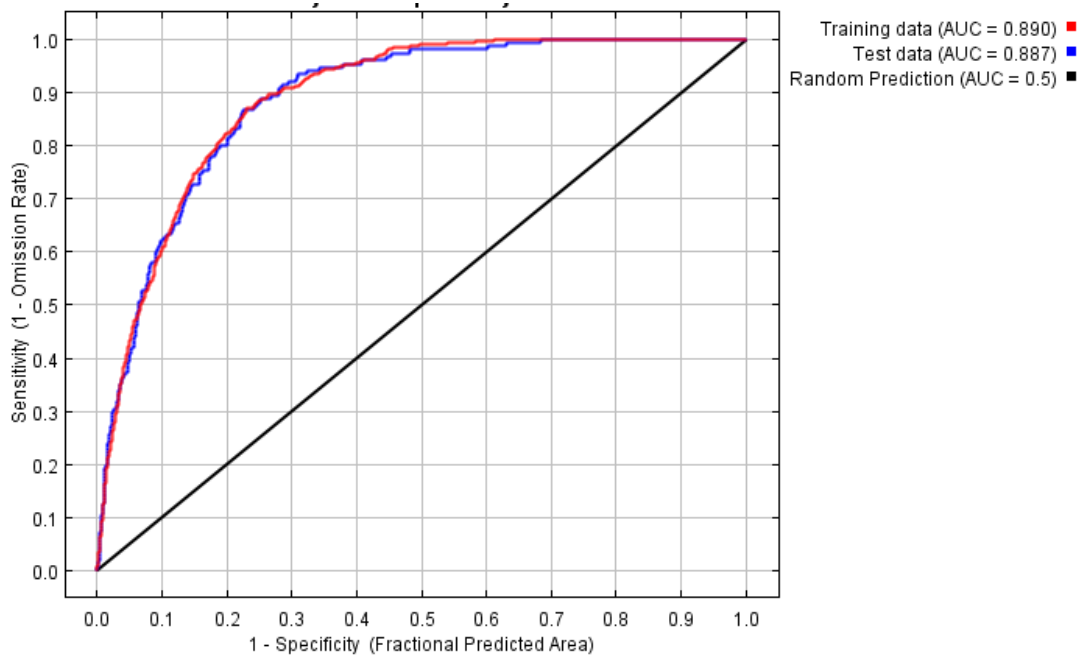


Figura 4-7 Curva ROC del modelo resultante (Fuente: Maxent)

El modelo obtenido de idoneidad ambiental se muestra a continuación y a partir de su análisis la información obtenida es significativa debido a la alta probabilidad de idoneidad del *Aedes aegypti* respecto a la región sureste del país (Fig. 4-8), en la parte norte casi no se alcanza a observar zonas de predicción debido a que la especie no puede desarrollarse en ambiente con poca humedad y con rangos tan variados de temperatura máxima y mínima como la sufre dicha área, de la misma manera existen zonas continuas de predicción en la península de Yucatán (Fig. 4-9) permitiendo ver el grado de importancia de tener y seguir con las campañas de prevención de desarrollo del mosquito en esta zona.

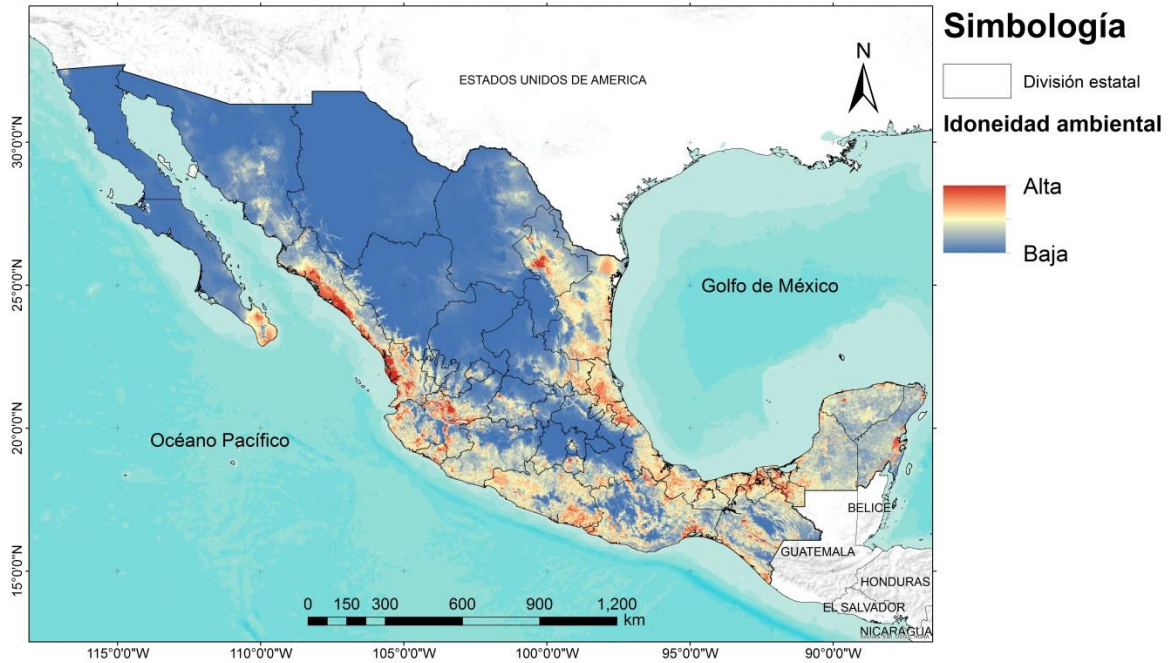


Figura 4-8 Mapa de idoneidad ambiental del *Aedes aegypti* (Fuente: Elaboración propia)

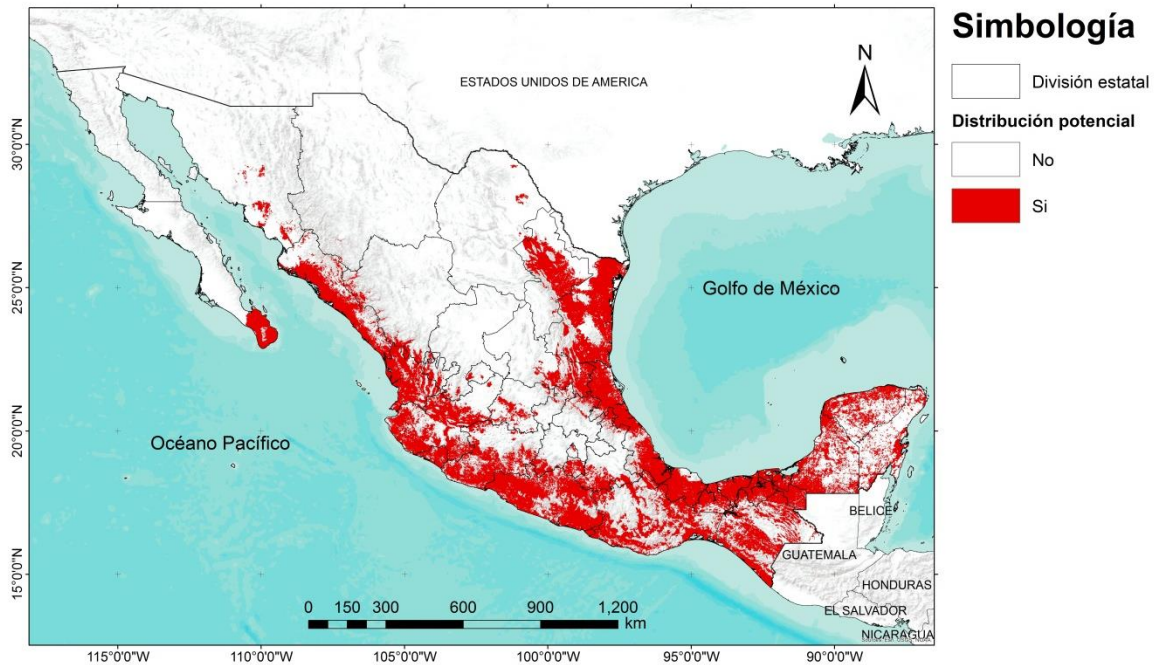


Figura 4-9 Mapa binario de distribución potencial del *Aedes aegypti* (Fuente: Elaboración propia)

4.4.-Relación de casos/modelo

Para conocer la dinámica geográfica de los casos respecto al modelo se optó por realizar una tasa de incidencia acumulada por área/zona, esto se planteó al clasificar áreas o zonas de riesgo dentro del modelo, con la ayuda de la función natural breaks se clasificó el área de idoneidad que sabemos va de 0 a 1 en 4 zonas: nulo riesgo (0 que va del valor 0 a 0.278, que es valor que corresponde al 10 percentil de los datos para generar el modelo de distribución potencial), riesgo bajo (1: que va de 0.278 a 0.51), riesgo medio (2: de 0.51 a 0.68), y riesgo alto (3: de 0.68 a 1) (Fig. 4-10).

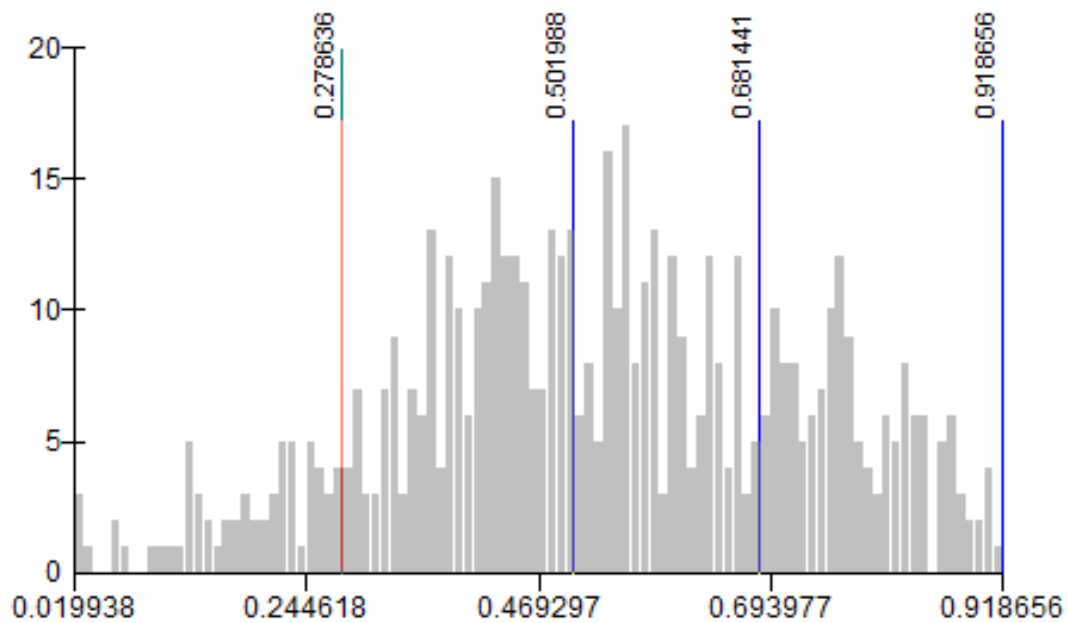


Figura 4-10 Distribución de datos para generar las 4 categorías de riesgo (Fuente: Elaboración propia a partir de ARCGIS)

4.5.- Zonas de riesgo

El mapa de idoneidad ambiental se dividió en 4 categorías utilizando la técnica de natural breaks (Fig. 4-10), posteriormente se extrajo el número de localidades con casos que entran dentro de nuestro mapa de distribución permitiendo valorar nuestro modelo respecto a los casos registrados del dengue en el periodo obteniendo resultados favorables, ya que el 42% de los casos se presentaron en la zona de más alto riesgo dentro de nuestro modelo, lo que refleja que el modelo predice correctamente y solo enfatiza que en dichas zonas hay que focalizar las medidas para frenar el contagio del dengue, estas zonas principales se concentran en las costas del océano pacífico, y en las costas del golfo de México (Fig. 4-11).

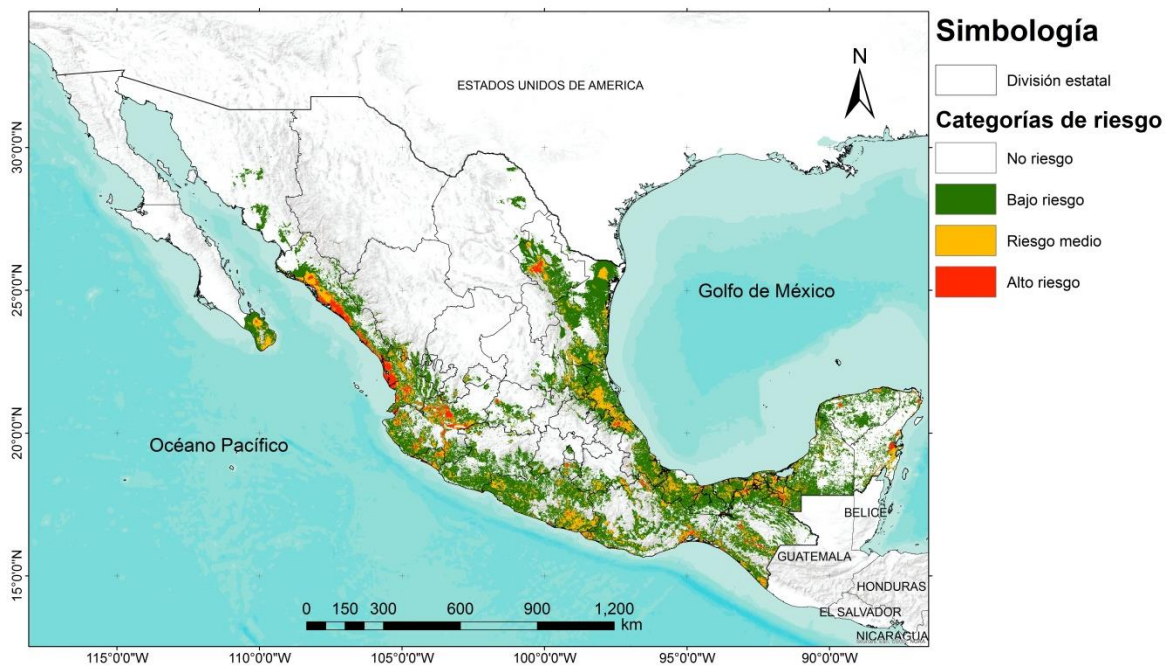


Figura 4-11 Mapa de zonas de riesgo para la transmisión del dengue (Fuente: Elaboración propia)

En la siguiente tabla se muestra la relación de los casos extraídos por zona dando por resultado un margen de 13% de los casos totales no predichos y denotando que el año 2014 es el año que peor se predicen dichos casos ya que solo varía en 6 casos más respecto a la zona con poco riesgo (Tabla 4-3).

Tabla 4-1 Extracción de casos predichos dentro del modelo por año (Fuente: Elaboración propia)

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Casos Totales	% De Casos
Zona de no Riesgo (No Predichos)	4,749	5,016	1,819	4,971	6,870	7,486	5,513	36.424	13.3
Riesgo Bajo	9,562	6,228	2,703	10,784	13,705	7,492	3,964	54.438	19.9
Riesgo Medio	13,093	6,575	3,225	14,360	15,214	8,483	5,437	66.387	24.30
Riesgo Alto	28,075	11,623	8,355	20,724	26,354	8,660	12,096	115.887	42.5
							Total De Casos	273.136	100

Respecto a las zonas de riesgo se extrajo el promedio del valor de cada una de las variables, respecto a las bioclimáticas se notó que aumentaban conforme se acercaba a las zonas de mayor transmisión y tienen un mayor valor en cada una de estos saltos, la temperatura promedio para las zonas de posible transmisión oscila entre los 13 grados para la idoneidad ambiental del *Aedes aegypti*, respecto a la temperatura máxima del cuarto más caliente oscila entre los 26 y 27 grados teniendo como 23 grados la zona no idónea para el desarrollo del mosquito aunque sabemos que requiere poco más de esta temperatura para poder llevar a cabo su ciclo de desarrollo, en cuanto al NDVI para las zonas de no transmisión tiene un valor de -0.29 en promedio, en la zona 3 tiene un valor de -0.19, esto se debe a que dichas zonas tienen mayor mancha urbana que zonas verdes a lo largo del continuo de la zona de riesgo alto, respecto a la humedad relativa es la única variable que aumenta conforme están las zonas con más riesgo de transmisión aunque la investigación concluyó que apenas por el alto de 60% de humedad el mosquito puede desarrollarse plenamente, y de la misma manera llegando a un punto del 70% , el porcentaje de drenaje en la zona con mayor riesgo también depende de una mayor presencia de manchas urbanas esto pudiendo concluir que el *Aedes aegypti* es un especie que se centra su desarrollo en zonas urbanas o cerca de la población (Tabla 4-2).

Tabla 4-2 Valores promedio de las variables por categoría de riesgo (Fuente: Elaboración propia)

Zona de riesgo	Bio6	Bio10	Bio16	NDVI	% Drenaje	Humedad Relativa
0	4.57	23.54	249.25	-0.29	78.59	62.04
1	12.77	26.74	482.94	0.63	74.41	68.34
2	13.57	27.08	519.13	0.38	76.71	69.19
3	13.24	27.24	519.12	-0.19	89.76	69.20

El 42 % de los casos fueron predicho en la zona 3 de mayor riesgo, así como donde menos se predijeron fue en la zona 1, esto comprueba que la zona 3 si es una zona con mayor probabilidad de contagio, también el 13% de los casos no fue predicho aunque debido a la resolución del mapa el 5% de estos casos cayeron a una distancia de 1 km alrededor de la zona de idoneidad (Tabla 4-5).

Tabla 4-3 Características por categoría (Fuente: Elaboración propia)

Categoría	Área km²	Casos	Población (habitantes)	No. de localidades	Incidencia (100mil hab)
Riesgo nulo	1,428,019.815	36,424	49,357,788	2,987	73.79
Riesgo bajo	384,619.152	54,438	20,037,892	6,926	271.67
Riesgo medio	100,201.2237	66,387	14,965,688	3,480	443.59
Riesgo alto	24,531.64668	115,887	22,508,776	1,064	514.85
Total	1,937,371.837	273,136	106,870,144 (periodo 2010)	14457	

En la tabla 5-5 se alcanza a distinguir de nuevamente la importancia que tiene la zona o categoría numero 3 ya que en solo poco más de 1.2% del área nacional tenemos el 40% de los casos confirmados de dengue a nivel nacional en el periodo de estudio, es bueno tener y conocer dichas zonas de contagio, ya que con estas áreas bien localizadas podemos tener una oportuna intervención y fortalecimiento en los sistemas de salud así como identificar factores tanto socioeconómicos como ambientales que puedan propiciar la propagación del mosquito.

Aunque parezca un numero alto de casos no predichos hay que diferenciar que se encuentran distribuidos en solamente 3 mil localidades lo que correspondería a de 10 a 15 casos de dengue en un periodo de 6 años, lo cual se puede deber a que son casos importados.

4.6.- Escenarios de cambio climático

El resultado de transferir al futuro los 4 diferentes modelos: GFDL_CM3 (gf), MPIESM_LR (mp), CNRMC5 (cn), HADGEM2 (he) y 2 RCP (4.5 y 8.5), donde se optó por ocupar los 4 modelos para conocer la dinámica de forma más completa ya que existe la posibilidad de que se comporten diferentes los modelos, en ese sentido, se observó que el modelo HADGEM2 fue el que proyecta o estima un área más amplia de idoneidad ambiental, llegando a 1.1 millones de km² respecto al área nacional esto para el año 2050 (Fig. 4-12).

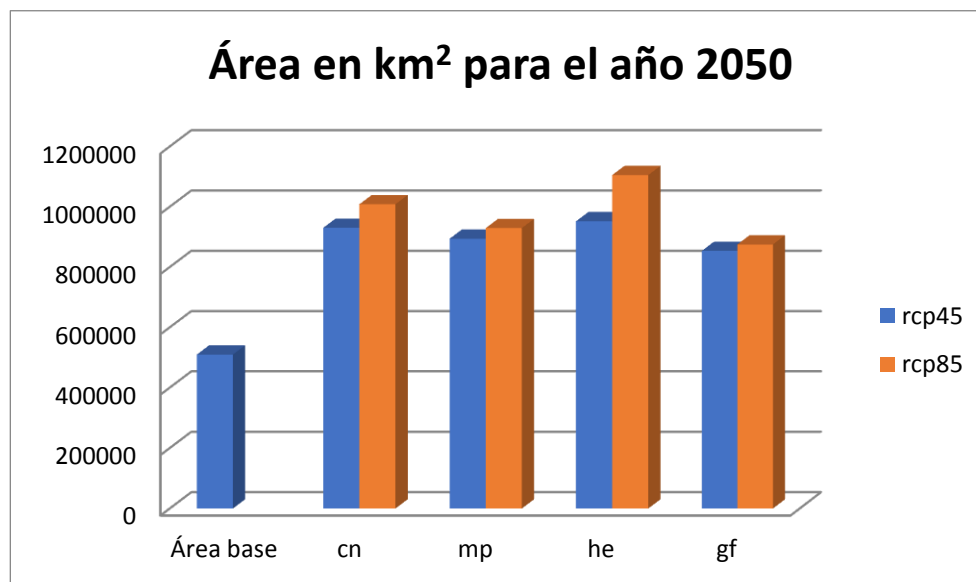


Figura 4-12 Gráfica de las áreas por modelo y RCP para el 2050 (Fuente: Elaboración propia)

De la misma manera el modelo gfdl_cm3 fue el que menor área tuvo respecto a los demás llegando a los 800 mil km².

Para el año 2070 (Fig. 4-13) se presenta el mismo comportamiento, el modelo Hadgem2 es aquel que estima de nuevo la mayor cantidad de área duplicando el área base que se tenía en el modelo original, por su parte el modelo gfdl en el rcp 8.5 hubo una disminución, aunque solo respecto a los demás modelos ya que sigue estimando un área mayor a la base, hay que considerar que la mayoría de los modelos resultantes sobrepasan el millón de kilómetros cuadrados lo que supone un área mayor a la mitad de la superficie del país.

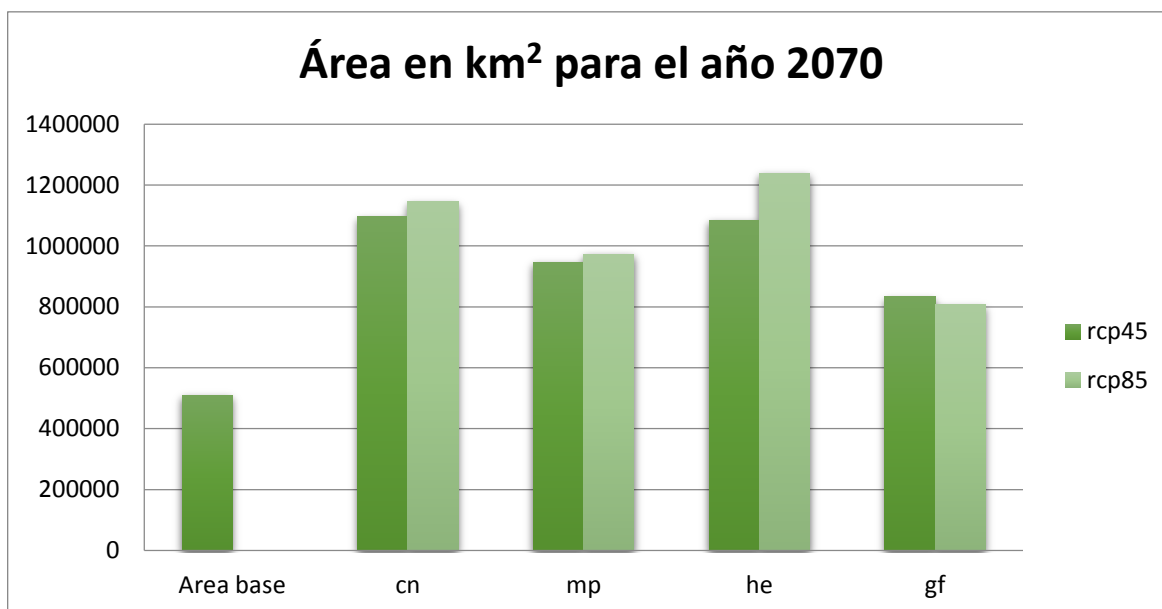


Figura 4-13 Gráfica de las áreas por modelo y RCP para el 2070 (Fuente: Elaboración propia)

4.6.1.- Extracción de valores promedio de las variables futuras

Tabla 4-4 Valores promedio de las variables por modelo para el año 2050 (Fuente: Elaboración propia)

Modelo	RCP	Bio6	Bio10	Bio16	NDVI	% Drenaje	Humedad relativa
Mapa base		13.05	26.87	489.61	0.55	75.76	68.58
CNRMCM5	4.5	12.28	27.43	604.55	0.50	75.10	67.75
	8.5	10.23	25.65	559.30	0.31	75.96	66.60
GFDL_CM3	4.5	10.49	26.08	616.42	0.41	75.93	65.68
	8.5	10.51	26.31	622.98	0.44	74.88	65.80
HADGEM2	4.5	10.07	26.03	554.79	0.30	76.35	66.13
	8.5	11.19	28.16	483.30	0.18	77.90	66.83
MPIESM_LR	4.5	10.87	26.28	599.77	0.43	75.19	66.55
	8.5	10.25	26.02	560.94	0.31	76.11	65.92

Se extrajo el valor promedio de las variables a futuro para ver la dinámica de estas respecto a cada modelo con el base, hay que recalcar que la Bio 6 es la variable que sufrió una disminución en sus valores ya que bajó 2 grados respecto a la media en la mayoría de los modelos quedando en un promedio de 10 °C en el área idónea del mosquito, la Bio 10 quedó o se estableció muy parecida al mapa base ya que no aumento en consideración ningún modelo, solamente el Hadhem2 en un RCP 8.5 ya que se aumentó hasta 2 grados respecto a la media.

La Bio 16 es la variable que más incremento de con respecto de las variables bioclimáticas utilizadas ya que tiene un promedio de 100 mm de precipitación en ese periodo, esto nos indica que aunque las condiciones de temperatura no estén cambiando mucho la precipitación es determinante para el desarrollo del mosquito, de la misma manera el NDVI tiende a bajar y debido a que toma un área más grande cuando se calcula el promedio toma en cuenta también lugares que antes no tenían relevancia en el modelo, esto se refleja de una mayor manera en el modelo HADHEM2 con un RCP 8.5 ya que disminuye hasta 0.18 el valor del NDVI pero también es el modelo que alcanza una mayor área dentro de este año.

El porcentaje de drenaje no sufre tantos cambios oscilando entre más y menos 1% al escenario base, esto igual se debe a que se toma la misma imagen y el área cambia un poco por eso al promediar dichos valores no es tanta la variación, respectivamente la

humedad relativa es quién presenta una disminución en sus valores aunque no tan significativa como para limitar el desarrollo del mosquito y la eclosión del huevecillo.

Tabla 4-5 Valores promedio de las variables por modelo para el año 2070 (Fuente: Elaboración propia)

Modelo	RCP	Bio6	Bio10	Bio16	NDVI	% Drenaje	Humedad relativa
Mapa base		13.05	26.87	489.61	0.55	75.76	68.58
CNRM5	4.5	9.79	26.51	549.33	0.16	77.97	66.92
	8.5	8.99	26.46	476.98	0.03	78.93	66.12
GFDL_CM3	4.5	10.67	26.40	645.45	0.49	74.61	65.42
	8.5	10.45	26.62	606.72	0.40	74.92	65.38
HADGEM2	4.5	9.46	26.06	503.39	0.13	77.00	65.45
	8.5	9.34	26.44	463.54	0.07	76.39	64.77
MPIESM_LR	4.5	10.31	26.05	564.67	0.32	76.23	65.95
	8.5	9.96	26.00	534.89	0.25	75.96	65.26

En el año 2070 las variaciones de los valores de las variables con el escenario base son más notorias, en la Bio 6 coincide que existe una disminución de la temperatura mínima, existiendo en el modelo CNRM5 una disminución de hasta 4 °C esto sería determinante para la limitación del área pero no sufre cambios tan significativos ya que las demás variables no oscilan tanto en el rango del escenario base, a excepción del NDVI aunque sabemos que ya que aumente el área al promediarlo y tomar zonas con un valor del NDVI muy bajo se llega a ese valor.

En la Bio10 son estables los cambios ya que la variación entre los modelos y el escenario base cambia en menos de 1 °C, aunque debemos tomar en cuenta que ahora casi el doble del área del país aumenta en estas condiciones que antes no presentaban temperaturas tan elevadas.

De la misma manera al promediar la precipitación en el Bio16 se da un aumento de casi 100 mm de lluvia, aunque sea un promedio y una mayor área hay que tomar en consideración que si es un aumento considerable en la lluvia a futuro.

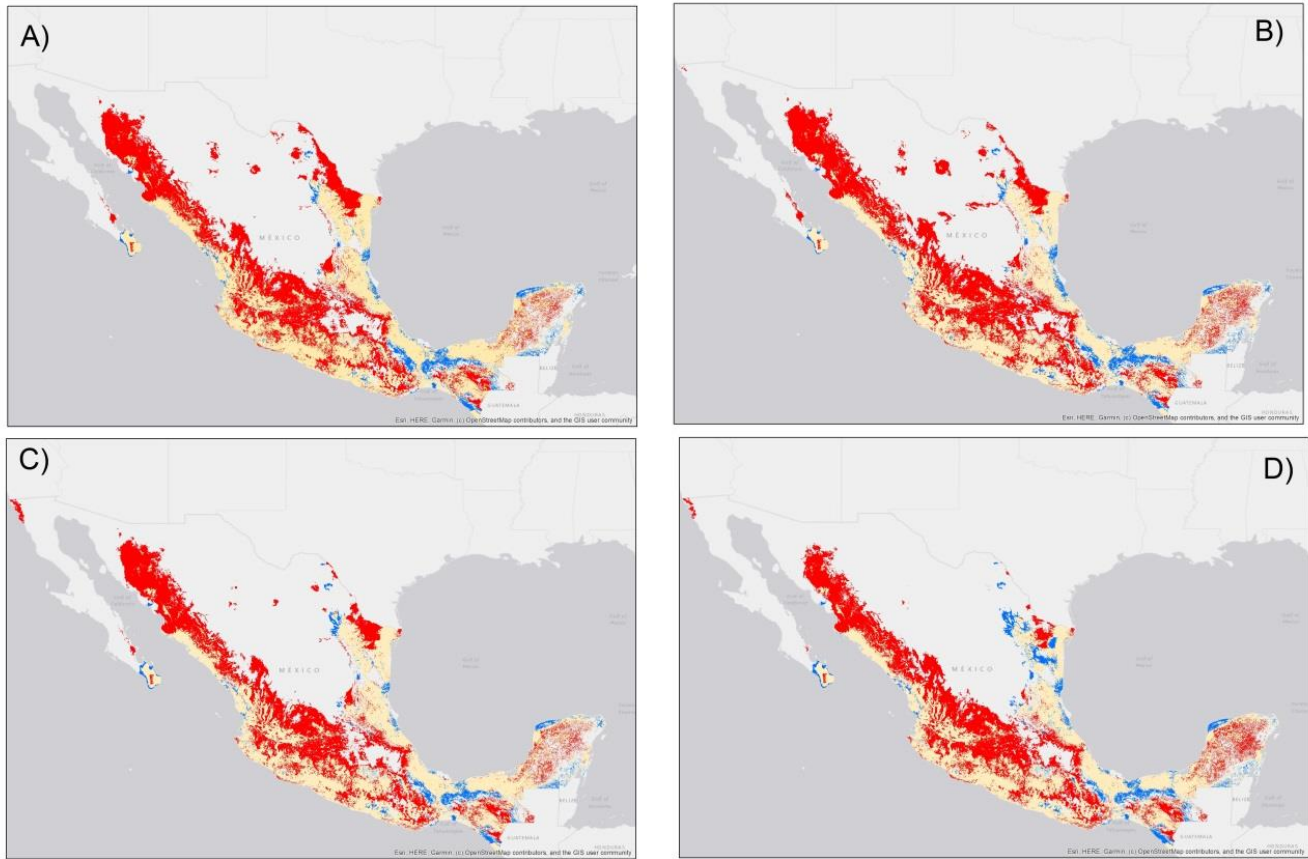
4.6.2.- Mapas de escenarios de cambio climático

En la siguiente figura (Fig. 4-14) se muestra como el modelo GFDL en área y distribución, hay que recalcar que las zonas de transferencia son las que hay que tomar en cuenta una que en dichas zonas geográficas no existe una cultura de prevención de transmisión del dengue, y también existen zonas donde no se habían presentado dichas condiciones climáticas. las zonas a resaltar es el noroeste mexicano ya que se extiende hasta el norte de Sonora, de la misma manera la zona central en el valle de México y el valle de Toluca ya presentan zonas idóneas para la transmisión de dicha enfermedad, este es el modelo que menor área presenta respecto a los demás modelos.

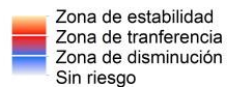
De la misma manera en la zona central y el altiplano mexicano presentan zonas idóneas para el desarrollo del mosquito en el modelo MPIESMLR (Fig. 4-15), incidiendo también en la zona noroeste del país con zonas en específico en Baja California, mientras que las zonas azules son zonas donde no serán idóneas en el futuro para el desarrollo del mosquito destacando buena parte del golfo mexicano, también es posible ver que la península de Yucatán presenta más zonas donde el mosquito ya no se podrá desarrollar en este modelo.

El modelo CNRMC5 (Fig. 4-16) junto con el HADHEM2ES son los modelos que tienen una mayor área de proyección a futuro abarcando gran parte de los estados del norte como sonora y una extensa parte central de Chihuahua, asimismo en la zona central se alcanza a distinguir que solo los valles con mayor altitud como lo es el de Toluca y el de México ya tienen zonas con distribución potencial en el año 2070, de la misma manera recordemos la dinámica social y económica que tiene el valle de México y la cantidad de población que se mueve actualmente.

El modelo HADHEM2ES (Fig. 4-17) es el que presenta un área mayor respecto a los otros y es el que también presenta más cambios en la península de Yucatán dejando la costa del estado de Yucatán ya no apto para el desarrollo del mosquito, así como las costas de Veracruz la porción central del norte de México presenta un incremento en su área.



Simbología

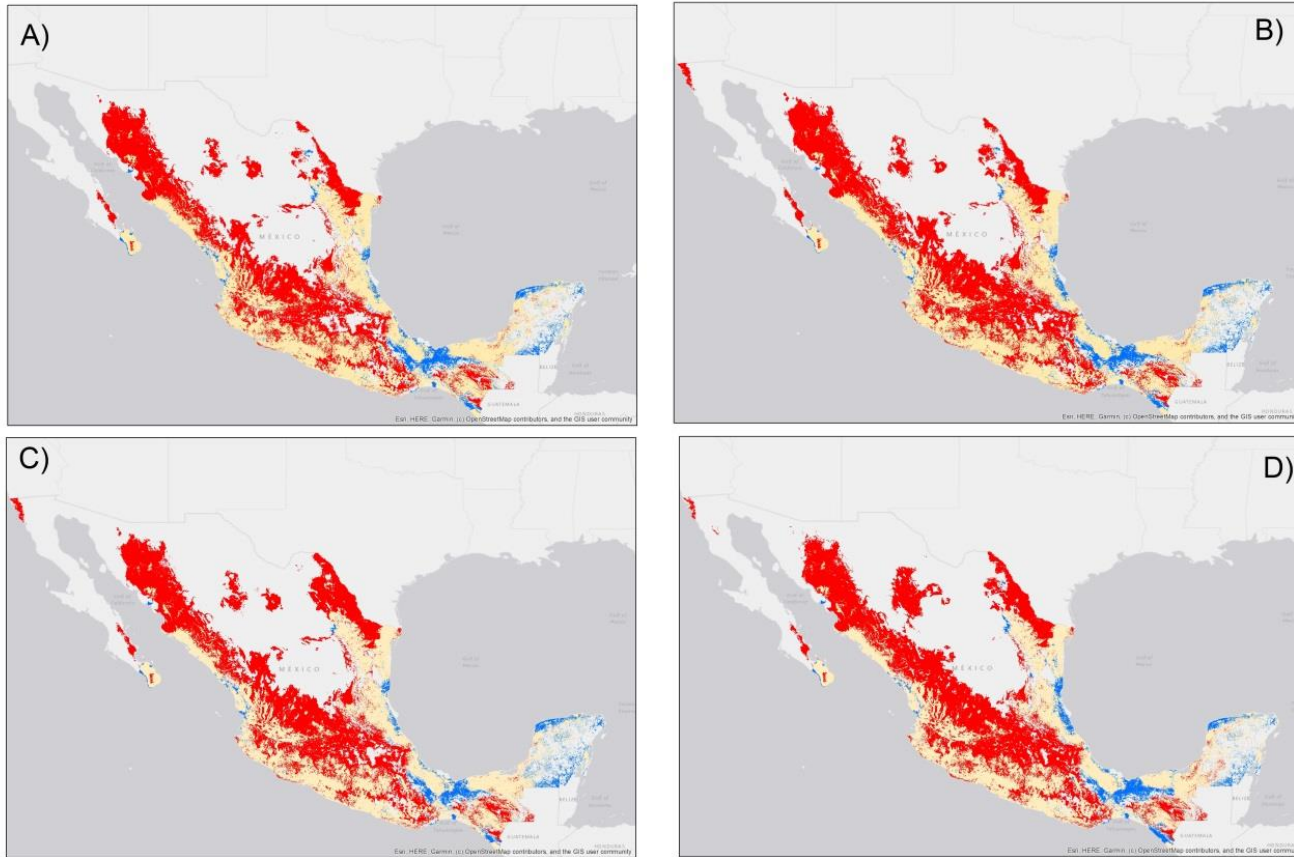


Modelo GFDLM_CM3

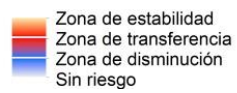
- A) 2050 RCP 4.5
- B) 2050 RCP 8.5
- C) 2070 RCP 4.5
- D) 2070 RCP 8.5

1 cm = 130 km

Figura 4-14 Dinámica del modelo GFDLM_CM3 para 2050, 2070 con RCP 4.5 y 8.5 (Fuente: Elaboración propia)



Simbología

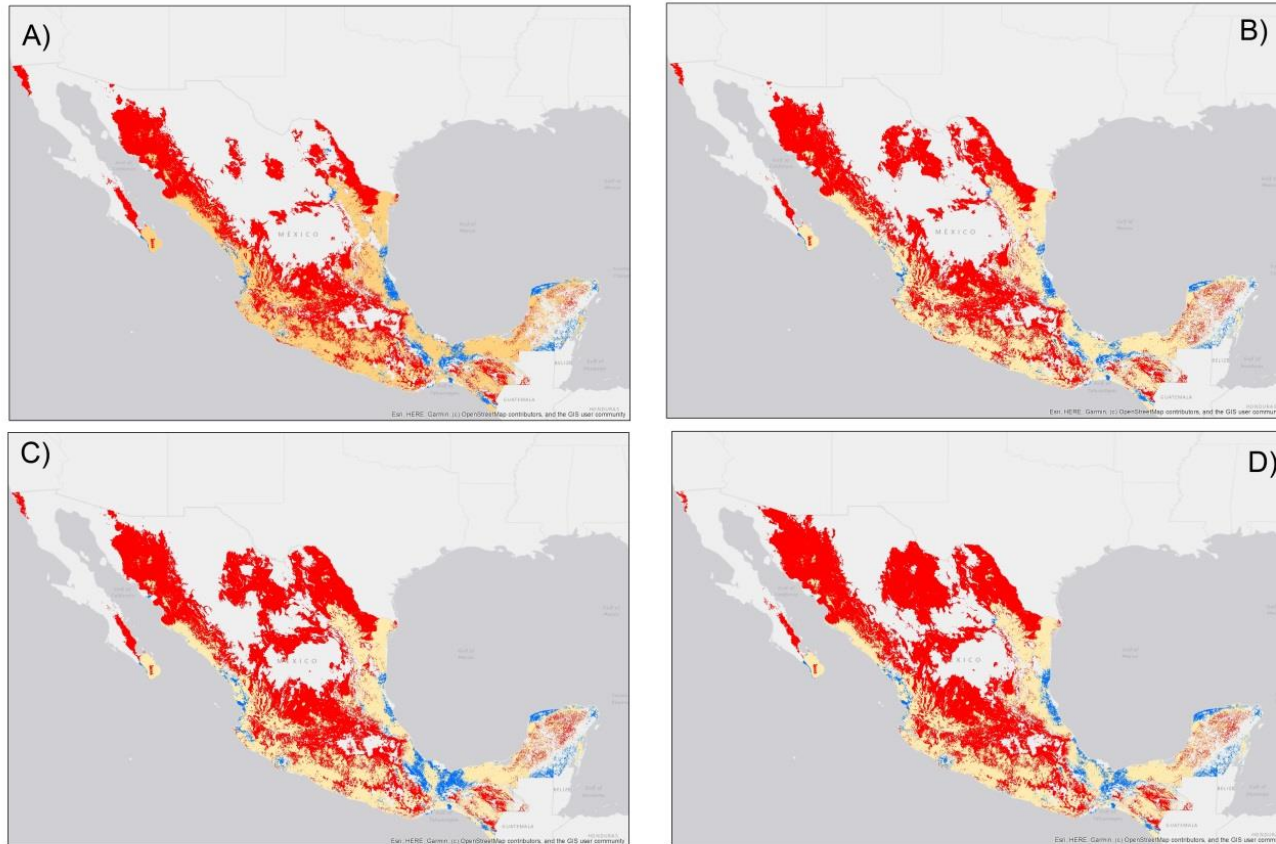


Modelo MPIESMLR

- A) 2050 RCP 4.5
- B) 2050 RCP 8.5
- C) 2070 RCP 4.5
- D) 2070 RCP 8.5

1 cm = 130 km

Figura 4-15 Dinámica del modelo MPIESMLR para 2050, 2070 con RCP 4.5 y 8.5 (Fuente: Elaboración propia)



Simbología

- Zona de estabilidad (no cambio)
- Zona de transferencia
- Zona de disminución
- No riesgo

Modelo CNRMC5

- A) 2050 RCP 4.5
- B) 2050 RCP 8.5
- C) 2070 RCP 4.5
- D) 2070 RCP 8.5
- 1 cm = 130 km

Figura 4-16 Dinámica del modelo CNRMC5 para 2050, 2070 con RCP 4.5 y 8.5 (Fuente: Elaboración propia)

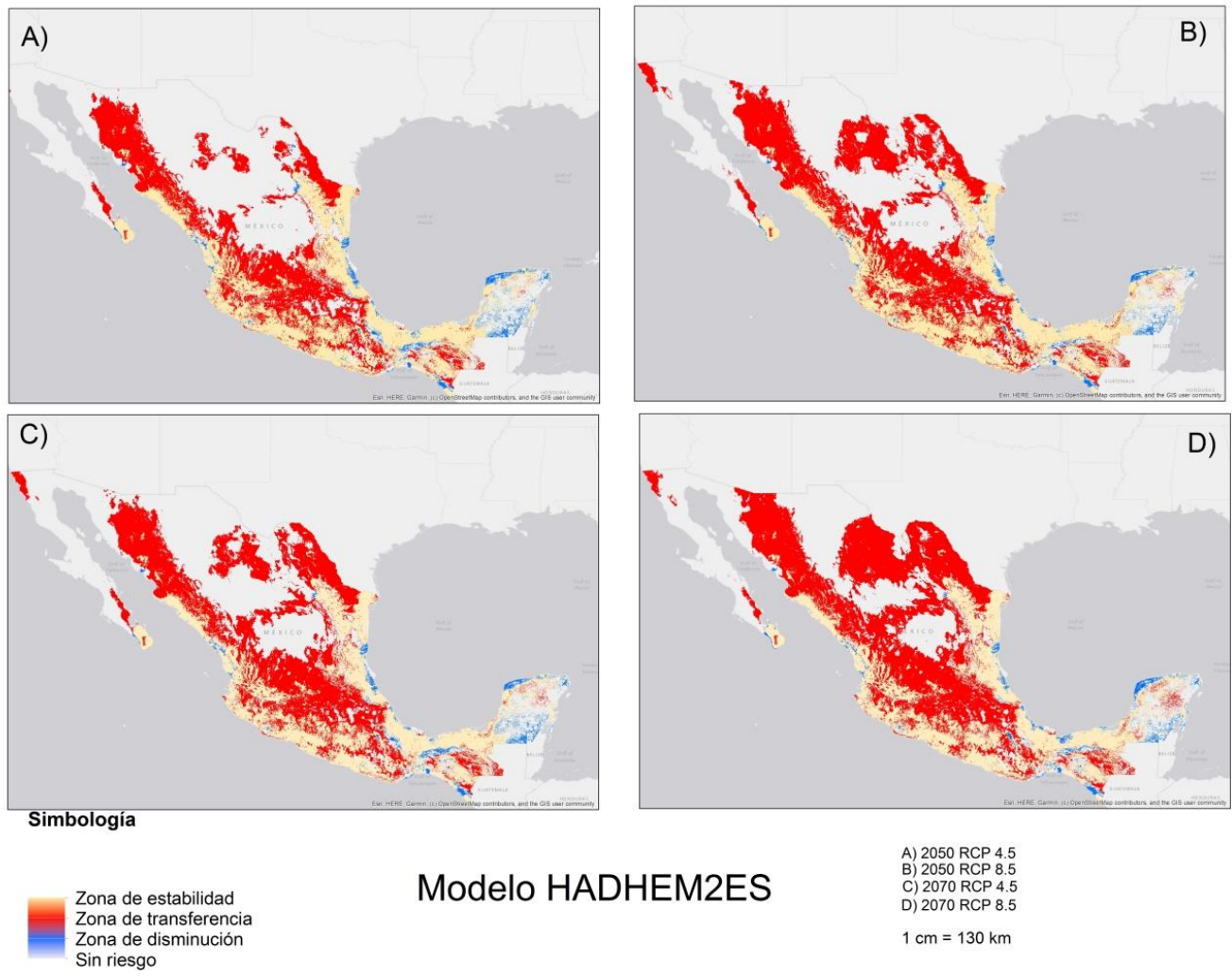


Figura 4-17 Dinámica del modelo HADHEM2ES para 2050, 2070 con RCP 4.5 y 8.5 (Fuente: Elaboración propia)

4.6.3.- Mapas de ensamble de modelos

En el resultado del análisis clúster de los modelos a 2050 con un rcp 4.5 de manera conjunta se localizaron 5 zonas de riesgo importante, estas distribuidas principalmente en las zonas conurbadas principales, como fueron Mérida, Monterrey, CDMX y valle de Toluca, Puebla, Guadalajara, Sinaloa, y centro de Sonora.

Dentro de la península de Yucatán se ve como la mitad del estado de Campeche y Yucatán tienen un riesgo bajo de desarrollo del mosquito, esto nos da a entender que en el futuro en esta zona en específico disminuirá su desarrollo en esta zona, tomando en cuenta además de las actuales medidas de mitigación del mosquito se controlará de mejor manera, aunque en las zonas urbanas principales tiene un riesgo medio-alto.

Por su parte en Nuevo León se distingue que toda la zona metropolitana de Monterrey tienen un riesgo alto de desarrollo del mosquito, ahora existiendo pocos lugares con poco o nulo riesgo en este escenario, de la misma manera los lugares con nulo riesgo son zonas con una geomorfología pronunciada, como sierras o cerros, entonces todo el territorio en esta zona tiene que tomar medidas y adoptar una cultura de prevención.

En La Ciudad de México se alcanza a observar que toda la zona tiene un riesgo alto solo delimitado por sus sierras laterales, en esta ciudad existen 22 millones de habitantes, y hay que considerar que en dicha ciudad no existe una cultura de prevención, por su parte Puebla tiene las condiciones similares de riesgo alto, aun considerando que no son lugares con un clima húmedo o subtropical que es donde se desarrolla el mosquito, Toluca y su valle comienzan a tener un riesgo bajo y moderado en todo el territorio que tiene.

En Guadalajara no es distinta la situación tomando en cuenta todo el territorio del estado de Jalisco existen pocas áreas con riesgo bajo o nulo de desarrollo del mosquito, considerando también que alrededor del Lago de Chapala en la zona centro del recuadro (Fig. 4-18).

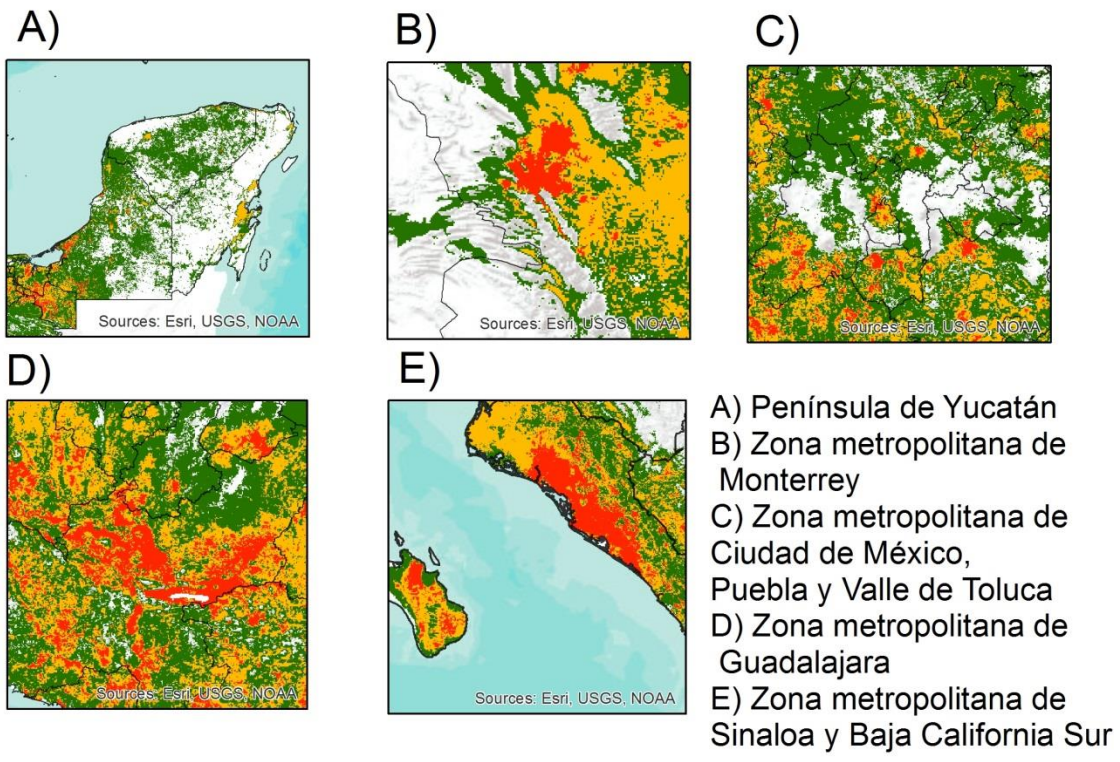
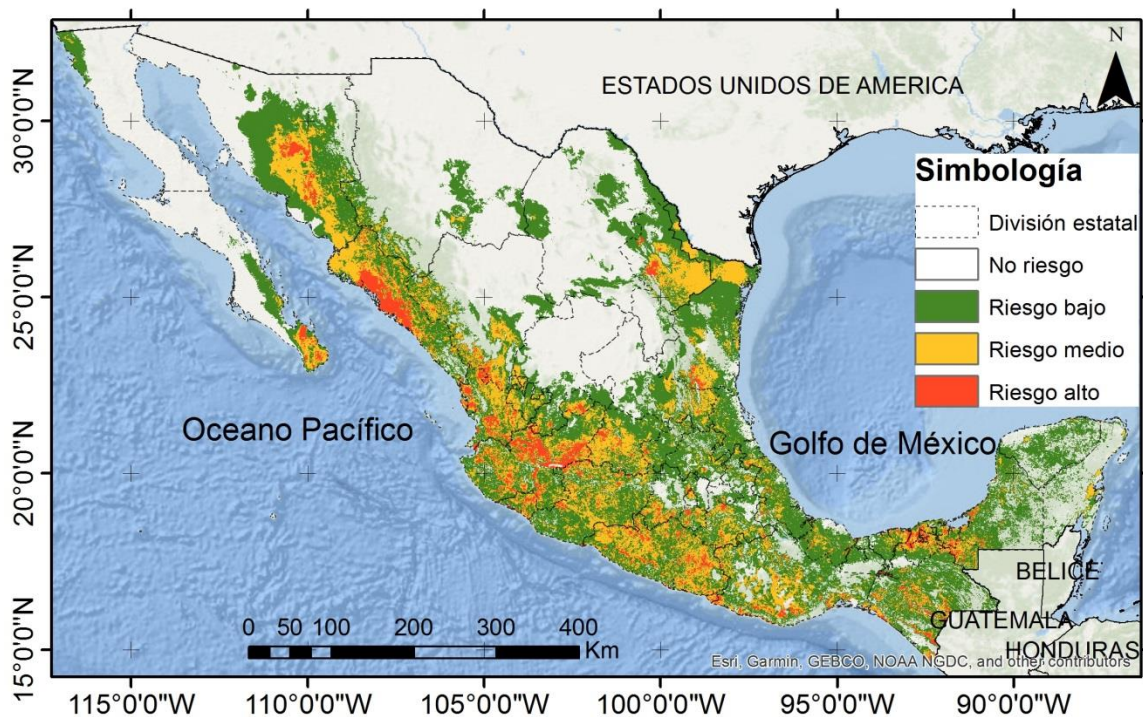


Figura 4-18 Ensamble del mapa de riesgo RCP 4.5 año 2050 (Fuente: Elaboración propia)

En las condiciones de un RCP 8.5 para el mismo año 2050 donde las características para este modelo son más extremas se distingue como se predicen más áreas de desarrollo del mosquito a nivel nacional.

En la península de Yucatán no cambiaron las cosas respecto al anterior clúster quedando en un riesgo bajo la mitad del territorio, recordando que a pesar de que sea mejor el riesgo es una zona constante respecto al modelo base y los modelos a futuro que se mostrarán.

En Monterrey el modelo predice un poco más de las zonas alcanzando los pie de monte de la sierra que se encuentran desde la zona central que tiene dirección Norte-Sureste, ahora existiendo una mayor zona de riesgo medio.

En la ciudad de México prácticamente toda la zona se ve con un riesgo alto cubriendo así gran parte del estado de México en su porción centro norte, también en Toluca todo el valle ahora tiene una porción de riesgo bajo y en la zona conurbana existe ya un riesgo medio y alto.

En la ciudad de Guadalajara y alrededores no hay cambios significativos respecto al clúster anterior, la mayor parte de la mancha urbana está en zona de riesgo alto, considerando que además de ser una zona de mayor riesgo también tiene una mayor consistencia en el desarrollo del mosquito.

En Sinaloa toda la costa tiene un riesgo alto, y en la península de Baja California la gran parte del territorio de La Paz está en un riesgo alto y medio, lo que supuso un posible aumento en el contagio de estos.

En este modelo se distingue como se predice más área con riesgo debido a que dicho RCP conjuntamente con los modelos son más pesimistas respecto al cambio climático resaltando el estado de Sonora que tiene un 50% de territorio con probabilidad de desarrollo que incluye los 3 riesgos, en Chihuahua también existe ya una zona de riesgo bajo pero que se extiende desde Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila llegando hasta este territorio (Fig. 4-19).

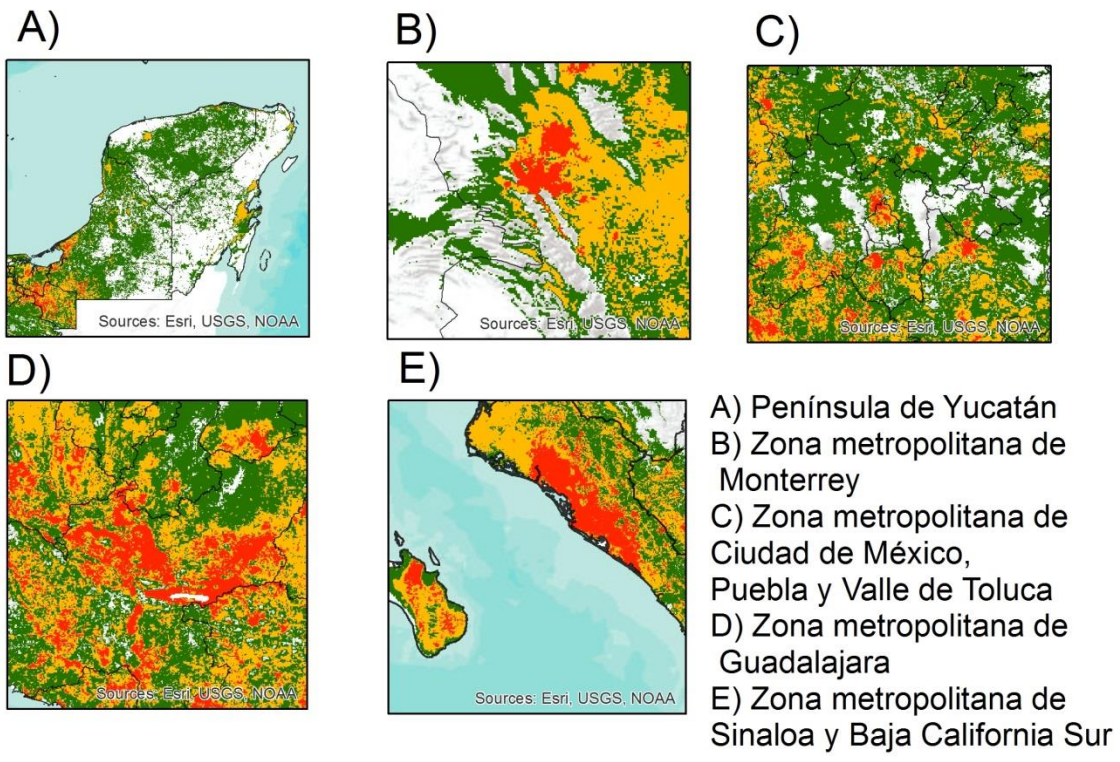
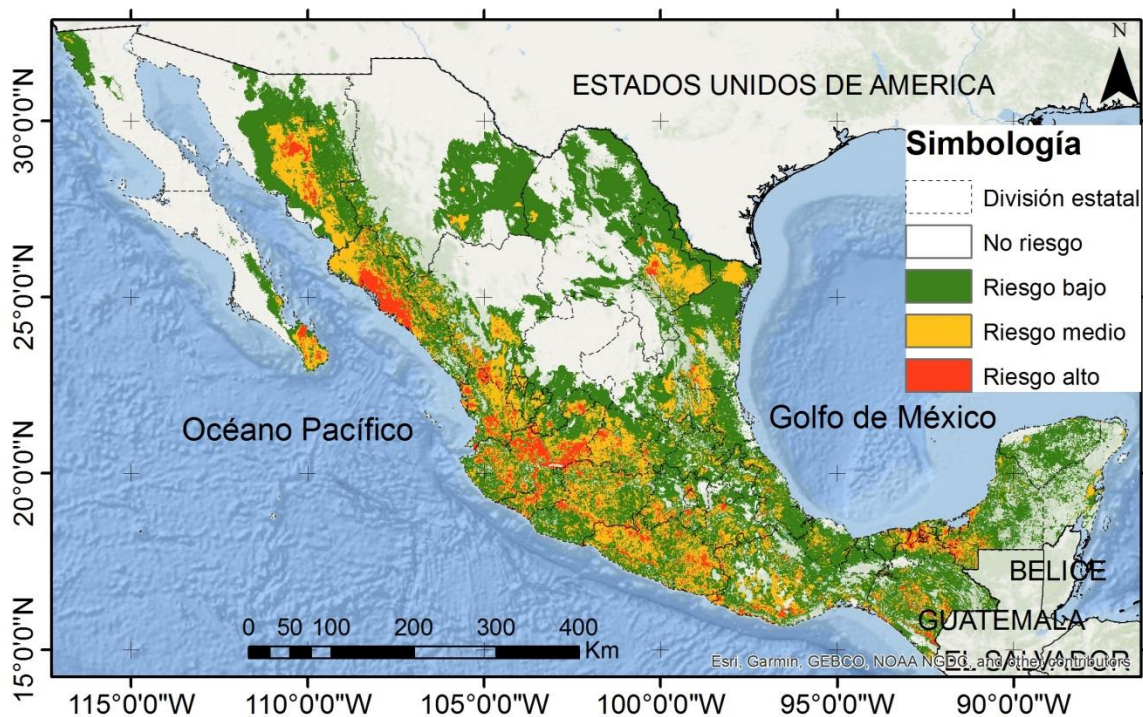


Figura 4-19 Ensamble del mapa de riesgo RCP 8.5 año 2050 (Fuente: Elaboración propia)

En las condiciones de un RCP 4.5 para el año 2070 donde el modelo tiene un incremento considerable en el territorio nacional. Invadiendo prácticamente todos los estados en alguna porción, en general tiene la misma consistencia en los antiguos lugares prevaleciendo en la ciudad de Monterrey en un alto riesgo, de la misma manera en la península de Yucatán también posee dicha persistencia.

Respecto al sureste existen zonas que disminuye pero esto principalmente a sus sierras y volcanes existentes que poseen una gran altitud.

También podemos ver como las costas tanto del océano pacífico como del golfo de México posee al menos un riesgo bajo.

En Baja California Sur el modelo presenta crecimiento hacia la parte noroeste del estado.

En la parte norte central del país se observa como la parte del golfo de México se conecta con la de la sierra madre occidental, a partir de lo que puede ser un corredor, y en la parte norte de este corredor avanza hacia la parte central del estado de Chihuahua.

De los lugares con persistencia en las 4 características de los modelos son el estado de Tabasco, Jalisco, Sinaloa y toda la extensión del estado de Veracruz (Fig. 4-20).

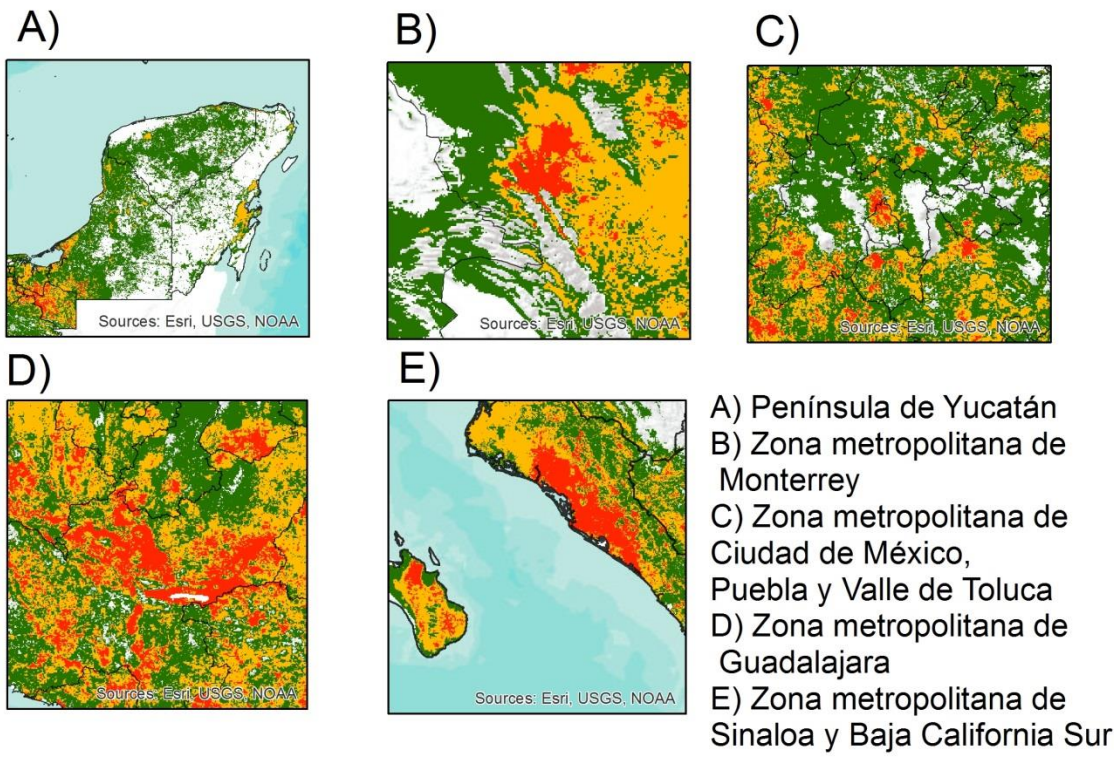
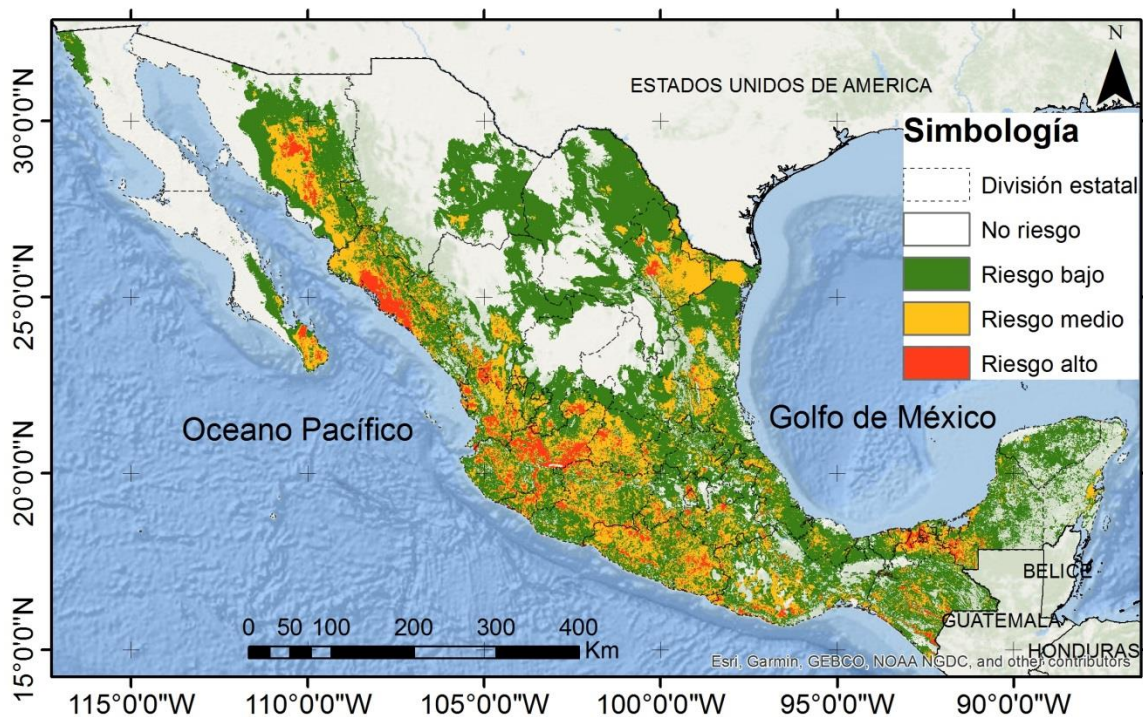


Figura 4-20 Ensamble del mapa de riesgo RCP 4.5 año 2070 (Fuente: Elaboración propia)

El ensamble de los 4 modelos para el año 2070 con un RCP 8.5 es el que disminuye un poco las áreas de riesgo en el territorio mexicano, esto debido a que los 3 modelos anteriores van aumentando respecto al anterior (2070 y 2050) o al de RCP menor (4.5 y 8.5) pero este disminuye respecto a su semejante año 2070 RCP 4.5 al disminuir sus áreas de riesgo, aunque disminuye en área general, aumenta en área de riesgo medio, asimismo existen zonas donde se expandió de manera considerable como lo es en el estado de Chihuahua, Coahuila, y el Estado de Sonora, cubriendo casi en su totalidad este territorio y conectando el golfo con el pacífico.

Respecto al centro del país se discrimina un área o superficie homogénea ya que la mayoría tiene un riesgo bajo de desarrollo del mosquito bajo pero abarca en su totalidad el centro, altiplano mexicano, y sus costas (Fig. 4-21).

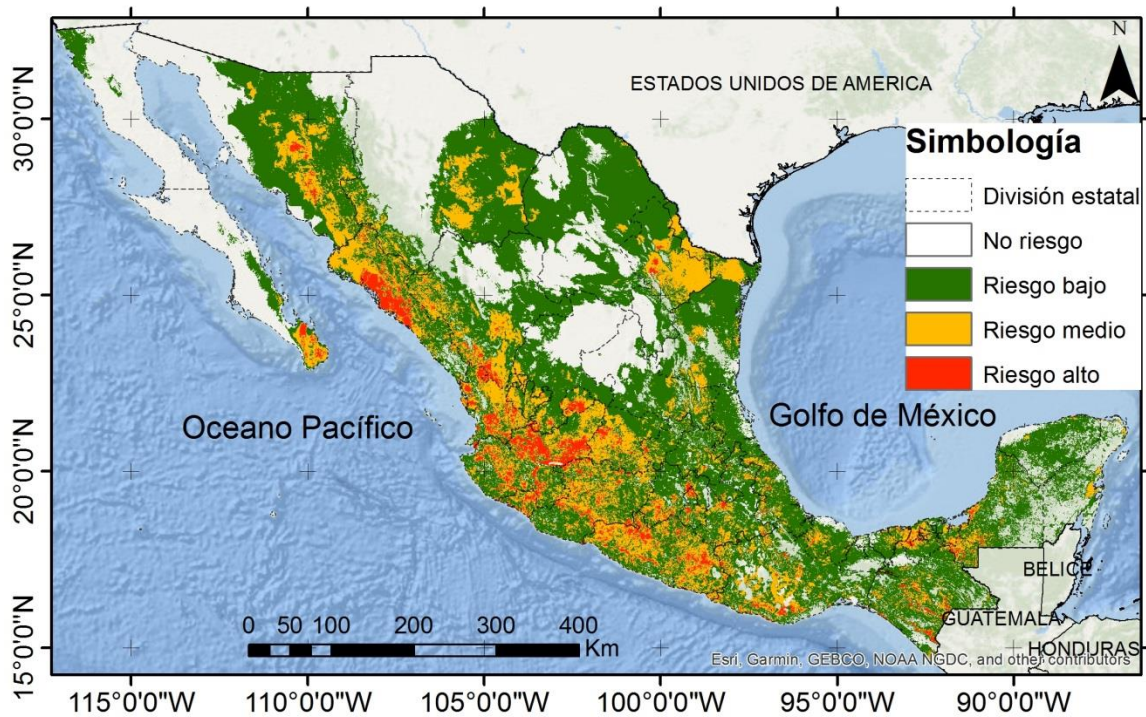
Aumentando así el área de riesgo medio a nivel nacional.

Con esta información se extrajo la población existente en cada una de las zonas y respecto las características de los modelos, viendo así la cantidad de población expuesta a las zonas de riesgo (Tabla 4-6)

Tabla 4-6 Población total en zona de riesgo

Cluster	Riesgo nulo	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto	Total
1) RCP 4.5 AÑO 2050	13,802,833	35,364,362	28,204,679	34,965,725	112,337,599
2) RCP 8.5 AÑO 2050	11,824,509	31,082,447	31,940,103	37,490,626	112,337,685
3) RCP 4.5 AÑO 2070	12,630,817	29,794,739	29,733,592	40,177,528	112,336,676
4) RCP 8.5 AÑO 2070	11,155,205	29,580,218	31,358,368	40,242,759	112,336,550

En la tabla se distingue como en el clúster 1 la población que está en riesgo alto asciende a 34 millones de habitantes, lo que corresponde a una tercera parte de la población nacional, esto en un área de 70 mil km², el riesgo medio alcanza apenas los 28 millones de habitantes en un área de 276 mil km² y en la zona de riesgo bajo subiendo a los 35 millones en también un área mayor de 676 mil km² y tan solo una décima parte de la población nacional está en zonas de no riesgo, lo que se refleja en zonas metropolitanas o conurbadas con alto riesgo para que se desarrolle el mosquito, respecto a los clúster 2, 3 y 4 la tendencia no disminuye, al contrario aumenta, lo que constituye ahora en el año 2070 con una población expuesta de 40 millones de habitantes pero ahora en 66 mil km², 6 millones más que en el clúster número 1 en 4 mil km² menos de área donde se puede desarrollar, esto obviamente sin contar las predicciones de aumento de población a futuro. El análisis anterior representa como la distribución de los datos es similar en cada uno de los clúster realizados: a mayor zona de riesgo o más alta, mayor es la población expuesta en un área disminuida.



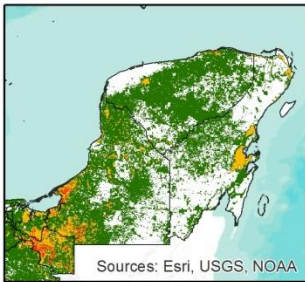
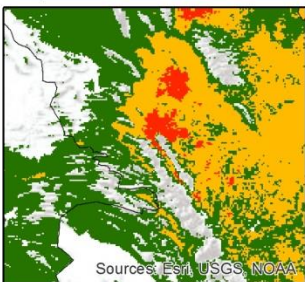

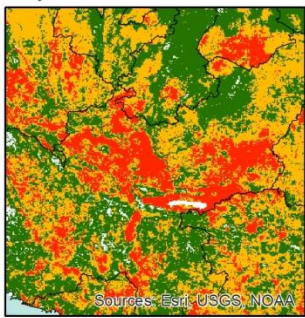
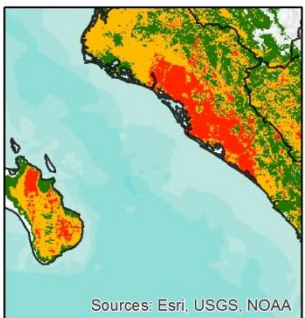
- A)  Sources: Esri, USGS, NOAA
- B)  Sources: Esri, USGS, NOAA
- C)  Sources: Esri, USGS, NOAA
- D)  Sources: Esri, USGS, NOAA
- E)  Sources: Esri, USGS, NOAA
- A) Península de Yucatán
 B) Zona metropolitana de Monterrey
 C) Zona metropolitana de Ciudad de México, Puebla y Valle de Toluca
 D) Zona metropolitana de Guadalajara
 E) Zona metropolitana de Sinaloa y Baja California Sur

Figura 4-21 Mapa de riesgo RCP 8.5 año 2070 (Fuente: Elaboración propia)

Capítulo 5 Conclusiones

Se realizaron los objetivos previstos, asimismo se comprobó la hipótesis planteada para generar un modelo de distribución del vector que transmite el dengue en México, esto gracias a los repositorios mundiales de presencias de especies, que demostraron tener presencias distintas entre sí, permitiendo tener una densidad de puntos que abarcaran más área en el territorio, y de la misma manera poder eliminar el sesgo por autorrelación espacial sin quedarse con pocos puntos, el resultado tuvo la capacidad de predecir las presencias y también de los casos identificados a nivel nacional durante el periodo 2009-2015 (89% de casos predichos).

Se realizaron corridas con diferentes métricas de presencia, desde buffer a 400 metros de las localidades, 400 metros entre todos los puntos, solo de 1 km respecto a las localidades y se observó cómo el modelo varía por el número de registros y así como la densidad de puntos en áreas específicas afecta al valor final de idoneidad de cada modelo, esto se determinó al realizar las transferencias del modelo de 400 metros de buffer respecto a las localidades que presentaron casos ya que proyectaban áreas incluso más pequeñas que el modelo base, determinando que la baja densidad de puntos era insuficiente para que el algoritmo identificara o determinara zonas de transferencia por su limitada cantidad de información.

Se debe recalcar que el análisis de la autocorrelación espacial es fundamental para el estudio de modelado de nicho ecológico, permitiendo que el modelo no tenga un sesgo por una densidad de presencias en áreas específicas, ya que es muy sensible a este tipo de casos.

El análisis de las nuevas enfermedades transmitidas por algún vector son de gran importancia para saber cómo actuar ante tales contingencias por dichas enfermedades.

El dengue al ser una enfermedad transmitida por un vector, debe ser analizarse la dinámica del vector, no solo en el tiempo presente, sí no a través del tiempo futuro con la ayuda de modelos de circulación global y su posible posición geográfica.

El presente estudio proporcionó zonas o áreas geográficas de interés para su actual tratamiento y prevención de casos a nivel nacional encontrando una zona de transmisión de gran impacto ya que en solo 24 mil km² se encontraron 115 mil casos en el periodo (42% del total), de la misma manera nos acerca a las zonas futuras en las cuales posiblemente no exista una cultura de prevención de distribución del mosquito como lo son zonas de Chihuahua y Sonora, así como zonas del altiplano mexicano como el Valle de Toluca y Valle México.

Es bueno considerar que la dinámica de los escenarios climáticos se basa en las características del mismo modelo, por esa razón decidimos tener 4 modelos de referencia, esto para que exista una comparación entre los 4, de la misma manera hay que establecer un modelo promedio de los 4, para tener identificadas las posibles zonas de transferencia que tienen en común dichos modelos.

En los 16 escenarios futuros, al compararse existieron zonas de continuidad donde prevalecen áreas que serán idóneas para el mosquito a futuro, dichas zonas son el Valle de Toluca y el Valle de México, hay que considerar que tan solo en la zona conurbada de la ciudad de México residen 22 millones de personas, esto significa un riesgo potencial para la transmisión del virus en dicha zona, ya que en la misma existe un poco o nula cultura de prevención de incubadoras del mosquito (llantas con agua estancada, botes con agua destapados etc.), de la misma manera tomar en cuenta la capacidad de los sistemas de salud existentes para tratar dicha enfermedad como se ha visto con la actual contingencia.

Respecto al acoplamiento de modelos son de gran utilidad ya que permiten visualizar zonas de continuidad entre los 4 modelos utilizados, pudiendo centrar en dichas zonas con mayores riesgos aquellos recursos necesarios para aminorar el posible impacto del dengue en dichas zonas, de la misma manera al analizar la población y el área de dichos modelos se concluyó que a mayor zona de riesgo mayor será la población en una menor área de distribución en dichos modelos.

Capítulo 6 Referencias bibliográfica

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56).
- Ashraf, U., Peterson, A. T., Chaudhry, M. N., Ashraf, I., Saqib, Z., Ahmad, S. R., & Ali, H. (2017). Ecological niche model comparison under different climate scenarios: A case study of *Olea* spp. in Asia. *Ecosphere*, 8(5), e01825. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1825>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberón, J., & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819.
- Bhatt, S., Gething, P. W., Brady, O. J., Messina, J. P., Farlow, A. W., Moyes, C. L., Drake, J. M., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., Sankoh, O., Myers, M. F., George, D. B., Jaenisch, T., Wint, G. R. W., Simmons, C. P., Scott, T. W., Farrar, J. J., & Hay, S. I. (2013). The global distribution and burden of dengue. *Nature*, 496(7446), 504-507. <https://doi.org/10.1038/nature12060>
- Brady, O. J., Gething, P. W., Bhatt, S., Messina, J. P., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., Moyes, C. L., Farlow, A. W., Scott, T. W., & Hay, S. I. (2012). Refining the global spatial limits of dengue virus transmission by evidence-based consensus. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 6(8), e1760. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001760>
- Candelario-Mejía, G., Rodríguez-Rivas, A., Muñoz-Urias, A., Ibarra-Montoya, J. L., Chávez-Lopez, C., Mosso-González, C., Cruz-Bastida, J. M., & Ramírez-García, S. A. (2015). Estudio ecológico mixto en México de la distribución de *Aedes aegypti* implicaciones en las políticas públicas. *Revista Médica MD*, 6.7(1), 13-19.
- CDC. (2018). *Ciclo de vida del mosquito. División de Enfermedades Transmitidas por Vectores (Centers for Disease Control and Prevention) (2018)*. <https://www.cdc.gov/zika/pdfs/spanish/MosquitoLifecycle-sp.pdf>
- CENAPRECE. (2020). *Vector del dengue*. <http://www.cenaprece.salud.gob.mx/programas/interior/vectores/dengue.html>
- Coto, H., & Tito, E. D. (2020). *Directrices para la prevención y control de Aedes aegypti* (p. 78).
- Dantés, H. G. (2007). Elementos económicos y políticos que impactan en el control del dengue en México. *salud pública de méxico*, 49, 117-119.
- Donner, L., Wyman, B., Hemler, R., Horowitz, L., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.-C., Ginoux, P., Lin, S.-J., Schwarzkopf, M., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W., Delworth, T., Freidenreich, S., Gordon, C., Griffies, S., Held, I., Hurlin, W., & Zeng, F. (2011). The Dynamical Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. *Journal of Climate*, 24, 3484-3519. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1>
- DRYAD Dryad Digital Repository. (2020). <https://datadryad.org/stash/>
- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *Annals of Statistics*, 7(1), 1-26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Efron, B., & Tibshirani, R. (1986). Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy. *Statistical Science*, 1(1), 54-75. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013815>
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>

Escobar-Mesa, J., & Gómez-Dantés, H. (2003). Determinantes de la transmisión de dengue en Veracruz: Un abordaje ecológico para su control. *Salud Pública de México*, 45(1), 43-53.

ESRI. (2020a). *Clasificar campos numéricos para simbología graduada—Ayuda | ArcGIS for Desktop*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm>

ESRI. (2020b). *Cómo funciona el Análisis cluster espacial de distancia múltiple (Función K de Ripley)*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/how-multi-distance-spatial-cluster-analysis-ripl.htm>

Fajardo-Dolci, G., Meljem-Moctezuma, J., Vicente-González, E., Venegas-Páez, F. V., Mazón-González, B., & Aguirre-Gas, H. G. (2012). El dengue en México Conocer para mejorar la calidad de la atención. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 50(6), 631-639.

Fernández Vásquez, R. H., Franco López, J. M., & García Martínez, C. B. (2017). *Efecto del clima en el ciclo biológico del zancudo (aedes aegypti l.), en cuatro zonas geográficas de El Salvador*. [Bachelor, Universidad de El Salvador]. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13045/>

Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>

Figueras, M. S. (2020). *Estadística: «Análisis de conglomerados o cluster»*. <http://www.ciberconta.unizar.es/leccion/cluster/INICIO.HTML>

Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J., Zhang, X., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., & Schaaf, C. (2002). Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 287. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00078-0)

García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen (SIBE)*. Instituto de Geografía UNAM. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000005735>

García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>

García, E., Soto, C., & Miranda, F. (1961). *Larrea y clima por Enriqueta García, Consuelo Soto y Faustino Miranda*.

GBIF. (2020). *GBIF Occurrence Download*. <https://www.gbif.org/>

Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Cruieger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., ... Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572-597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>

Gubler, D. J., & Clark, G. G. (1996). Community involvement in the control of *Aedes aegypti*. *Acta Tropica*, 61(2), 169-179. [https://doi.org/10.1016/0001-706x\(95\)00103-l](https://doi.org/10.1016/0001-706x(95)00103-l)

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)

GWP. (2009). *¿Qué es la seguridad hídrica?* Global Water Partnership. <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-seguridad-hidrica/>

GWP, G. W. P. (2014). *¿Qué es la GIRH?* Global Water Partnership. <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>

- Hoyos, R. C., López, T. T., Villarreal, F. C., Pineda, A., & González, M. A. (2006). Concepciones culturales sobre el dengue en contextos urbanos de México. *Rev Saúde Pública*, 9.
- Hsueh, Y.-H., Lee, J., & Beltz, L. (2012). Spatiotemporal Patterns of Dengue Fever Cases in Kaoshiung City, Taiwan, 2003-2008. *Applied Geography*, 34, 587-594. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.03.003>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427. <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- INECC-IMTA. (2014). *Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales, Informe Técnico Final*.
- INEGI. (2010). *Principales resultados del Censo de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- 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* (S. Planton, Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- 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 el Cambio Climático* (p. 157).
- IPCC, P. intergubernamental del C. climático, Grupo de trabajo I. (2001). *Tercer informe de evaluación. Cambio climático 2001: La base científica. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico*, 1-20 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf
- Jackson, S. T., & Overpeck, J. T. (2000). *Responses of plant populations and communities to environmental changes of the late Quaternary*. 27.
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. 1967, 7(International Yearbook of Cartography), 186-190.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Wan, Z., Huete, A. R., Leeuwen, W. V., Wolfe, R. E., ... Barnsley, M. J. (1998). The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- K. Didan. (2015). *MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006*. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>
- Khatchikian, C., Sangermano, F., Kendell, D., & Livdahl, T. (2011). Evaluation of species distribution model algorithms for fine-scale container-breeding mosquito risk prediction. *Medical and Veterinary Entomology*, 25(3), 268-275. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.2010.00935.x>
- Köppen, W. P. (1948). *Climatología, con un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Económica.
- Kormondy, E. (1991). *Concepto De Ecología*. Alianza. <https://www.iberlibro.com/Concepto-Ecologia-alianza-Universidad-Au32-Kormondy/30442519152/bd>

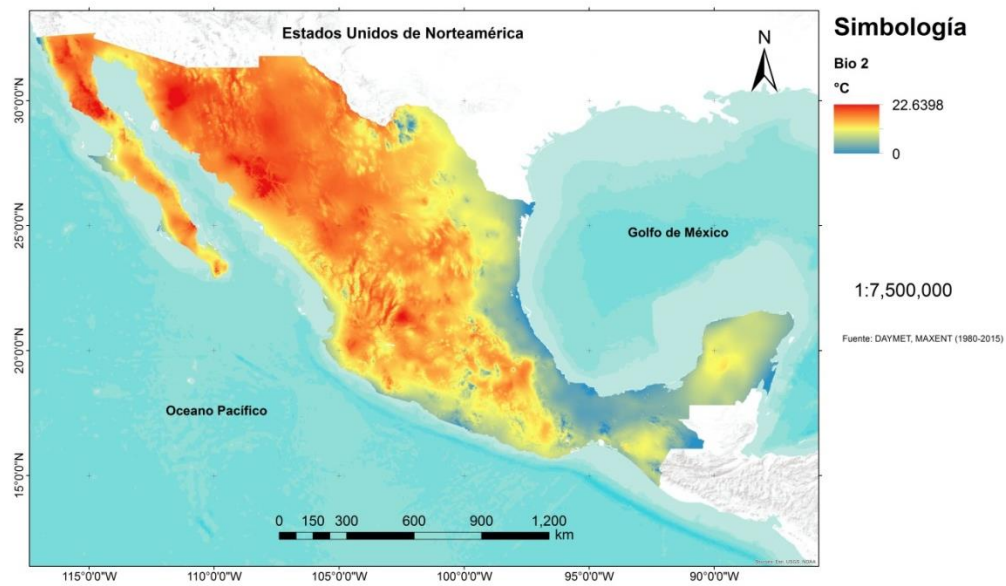
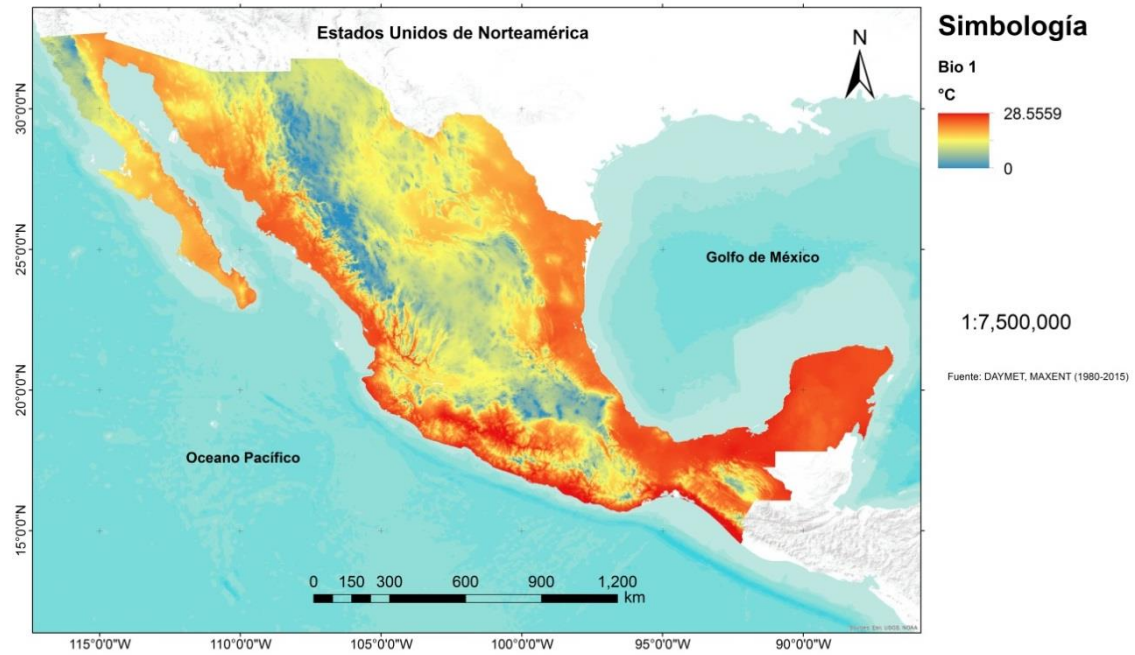
- Leite, P. (2018, mayo 31). *OPS/OMS | INDICADORES DE SALUD: Aspectos conceptuales y operativos (Sección 2)*. Pan American Health Organization / World Health Organization.
https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14402:health-indicators-conceptual-and-operational-considerations-section-2&Itemid=0&lang=es
- Liria, J., & Navarro, J.-C. (2010). Modelo de nicho ecológico en *Haemagogus Williston* (Diptera: Culicidae), vectores del virus de la fiebre amarilla. *Revista Biomédica*, 21(3), 149-161.
- Longley, P. (2011). *Geographic information systems & science*. Wiley.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O'Connor, F. M., Roberts, M. J., Rodriguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., ... Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723-757.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Martínez Torres, E. (2008). Dengue. *Estudios Avanzados*, 22(64), 33-52.
<https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000300004>
- Mas, J. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240.
<https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- McMurtrie, R. E., Leuning, R., Thompson, W. A., & Wheeler, A. M. (1992). A model of canopy photosynthesis and water use incorporating a mechanistic formulation of leaf CO₂ exchange. *Forest Ecology and Management*, 52(1), 261-278. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90505-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90505-4)
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213.
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Nychka, D., Furrer, R., Paige, J., Sain, S., Gerber, F., Iverson, M., & Research, U. C. for A. (2020). *fields: Tools for Spatial Data* (10.3) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=fields>
- O'Donnell, M. S., & Ignizio, D. A. (2012). *Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States* (Data Series) [Data Series]. U.S. Geological Survey.
- OMS. (2018). *Dengue y dengue grave*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
- OMS. (2019). *Enfermedades transmitidas por vectores*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>
- OPS/OMS. (2020). *Dengue—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud*. <https://www.paho.org/es/temas/dengue>
- Ordoñez, R. (2018). *Dinámica De Zonas Climáticas Y Su Relación Con La Distribución Potencial Del Aedes Aegypti* [Doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México, CIRA.
- PAYAM, R., LEI, T., & HUAN, L. (2008, noviembre 6). *Cross-Validation*. Arizona State University. <http://leitang.net/papers/ency-cross-validation.pdf>
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions. En *Monographs in Population Biology* (Vol. 49).

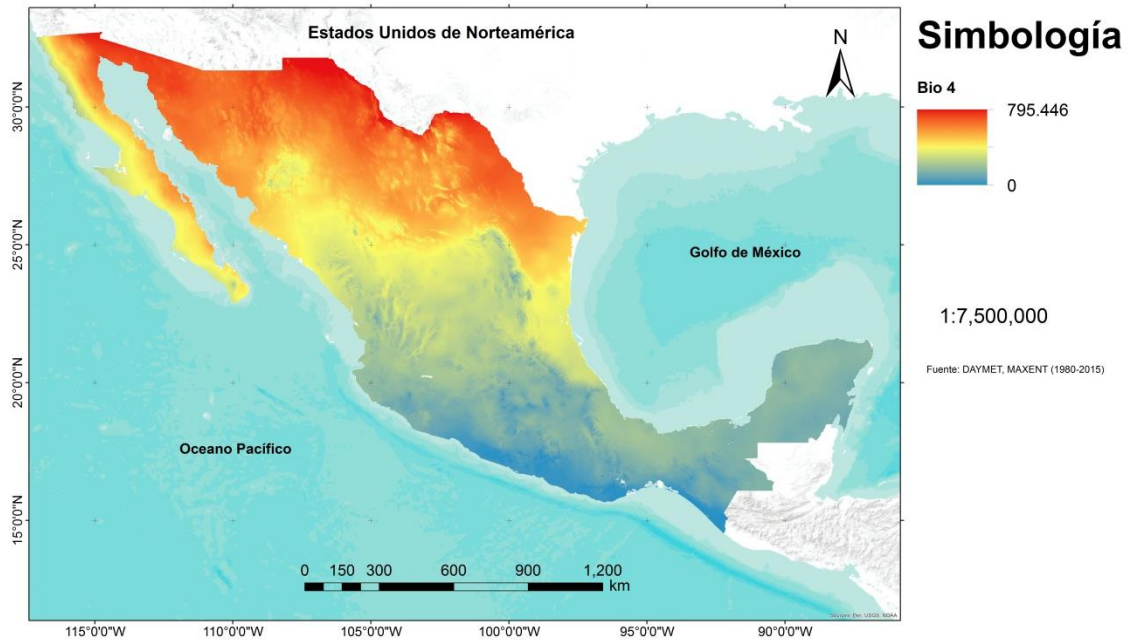
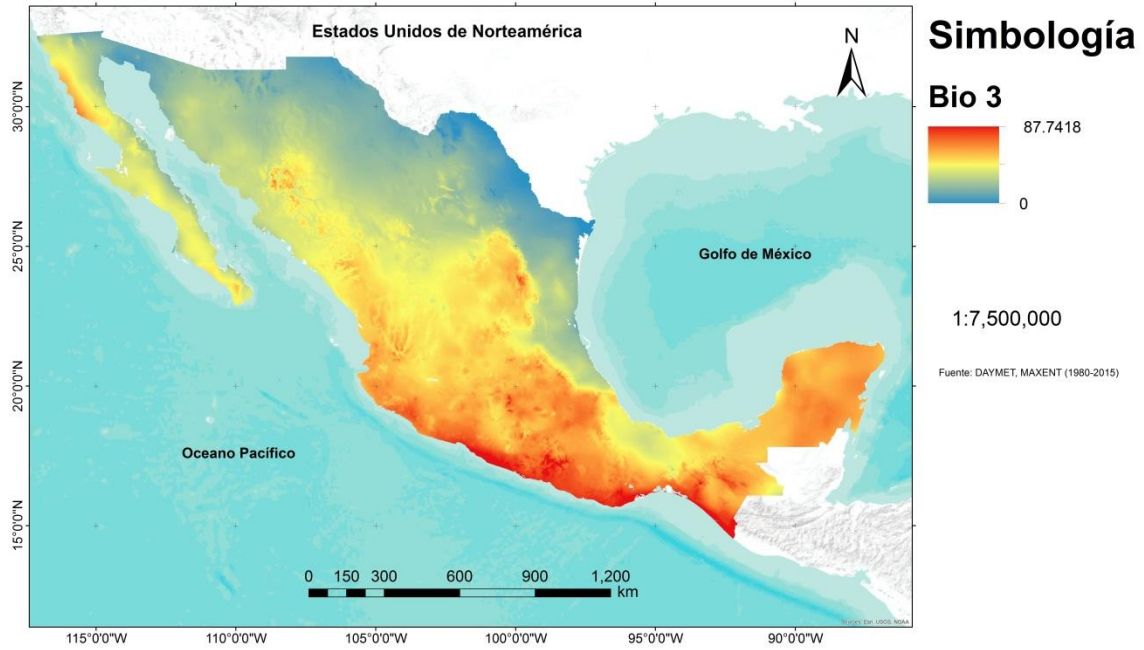
- Peterson, A. T., Martínez-Campos, C., Nakazawa, Y., & Martínez-Meyer, E. (2005). Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 99(9), 647-655. <https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2005.02.004>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and Correlative Models of Ecological Niches. *European Journal of Ecology*, 1(2), 28-38. <https://doi.org/10.1515/eje-2015-0014>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Pita, M. F., & Cuadrat, J. M. (2006). *CLIMATOLOGÍA*. <https://www.iberlibro.com/CLIMATOLOG%C3%8DA-Mar%C3%ADa-Fernanda-Pita-Jos%C3%A9-Cuadrat/12966018273/bd>
- Qiao, H., Soberón, J., & Peterson, A. T. (2015). No silver bullets in correlative ecological niche modelling: Insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(10), 1126-1136. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12397>
- Real-Cotto, J. J. (2017). Factores relacionados con la dinámica del dengue en Guayaquil, basado en tendencias históricas. *Anales de la Facultad de Medicina*, 78(1), 23-28. <https://doi.org/10.15381/anales.v78i1.13017>
- Richards, J. A. (2013). *Remote sensing digital image analysis: An introduction* (Fifth edition). Springer.
- Robles, J. N., & Gómez-Dantés, H. (1995). El dengue en México: Un problema prioritario de salud pública. *Salud Pública de México*, 37(0), Article 0. <http://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/4560>
- Running, S., & Gower, S. (1991). FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree physiology*, 9, 147-160. <https://doi.org/10.1093/treephys/9.1-2.147>
- Salvutella, R. (1996). *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus* (Diptera, Culicidae) y su papel como vectores en las Américas. *La situación de Uruguay*. 12(Revista Médica Uruguay), 28-36.
- Saupe, E., Barve, V., Myers, C., Soberón, J., Barve, N., Hensz, C., Peterson, A., Owens, H., & Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 237-238, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.04.001>
- Segurado, P., Araújo, M. B., & Kunin, W. E. (2006). Consequences of spatial autocorrelation for niche-based models. *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 433-444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01162.x>
- SEMARNAT. (2010). *ATLAS GEOGRÁFICO DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES*.
- Shannon, C. E. (1949). Communication theory of secrecy systems. *The Bell System Technical Journal*, 28(4), 656-715. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Tamayo, J. L. (2013). *Geografía Moderna De Mexico* (E. TRILLAS, Ed.; Edición: 13). TRILLAS, EDITORIAL.

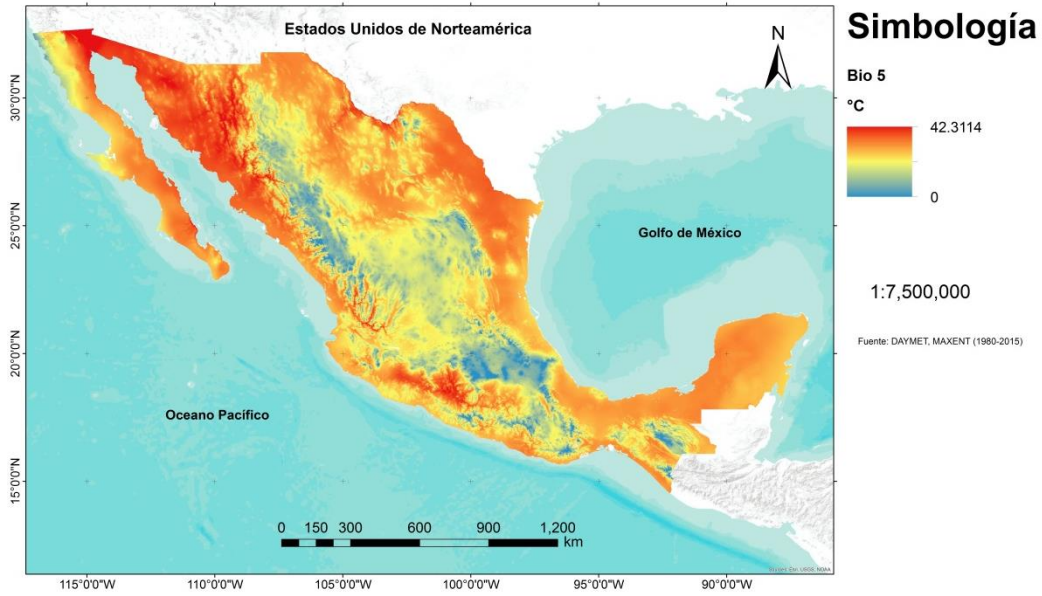
- Thornton, P.E., Thornton, M. M., Mayer, B. W., Wei, Y., Devarakonda, R., Vose, R. S., & Cook, R. B. (2016). *Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 3*. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1328>
- Thornton, Peter E., Running, S. W., & White, M. A. (1997). Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190(3-4), 214-251. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03128-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03128-9)
- Toribio, G. (2020). NDVI, ¿qué es y para qué sirve? *Cursos de Teledetección, Drones y LIDAR*. <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Torres-Galicia, I., Cortés-Poza, D., & Becker, I. (2014). Dengue en México: Análisis de dos décadas. *Gaceta Médica de México*, 150(2), 122-127.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Méliá, D. S. y, Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., ... Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9), 2091-2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- World Health Organization (Ed.). (1995). *Clasificación estadística internacional de enfermedades y problemas relacionados con la salud* (Décima revisión. [10a rev.]). OPS, Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.
- WorldClim. (2020). *Downscaled CMIP5 data, 30 second spatial resolution—WorldClim 1 documentation*. https://www.worldclim.org/data/v1.4/cmip5_30s.html
- Yañez-Arenas, C., Rioja-Nieto, R., Martín, G. A., Dzul-Manzanilla, F., Chiappa-Carrara, X., Buenfil-Ávila, A., Manrique-Saide, P., Correa-Morales, F., Díaz-Quiñónez, J. A., Pérez-Rentería, C., Ordoñez-Álvarez, J., Vazquez-Prokopec, G., & Huerta, H. (2018). Characterizing environmental suitability of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Mexico based on regional and global niche models. *Journal of Medical Entomology*, 55(1), 69-77. <https://doi.org/10.1093/jme/tjx185>

Anexos

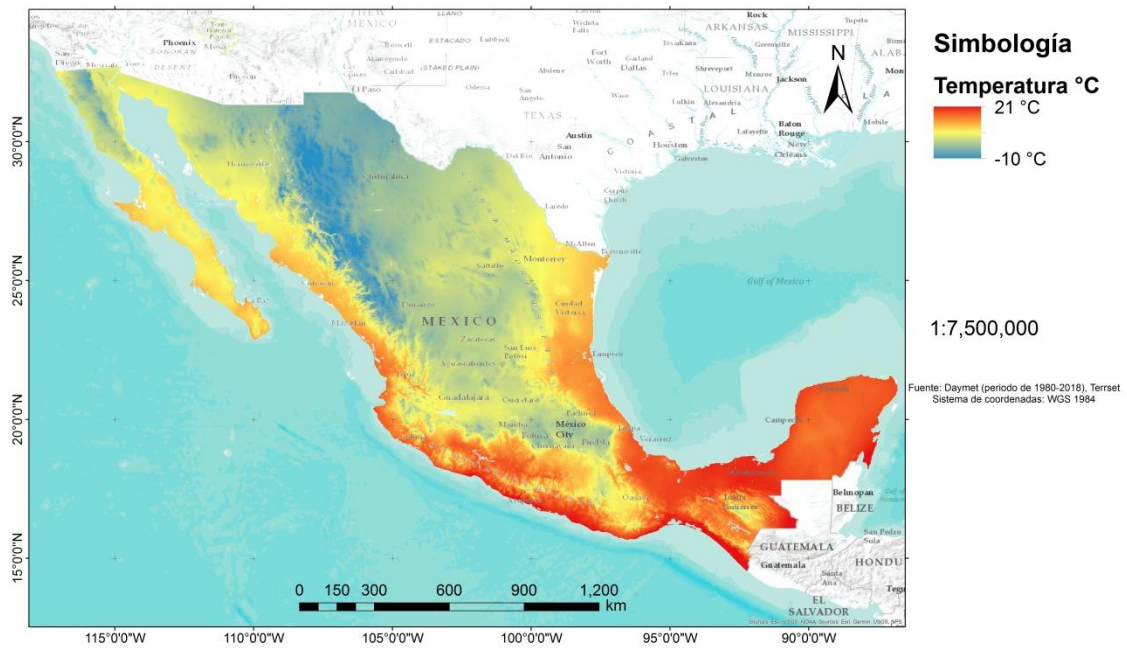
Anexo 1: 19 variables bioclimáticas

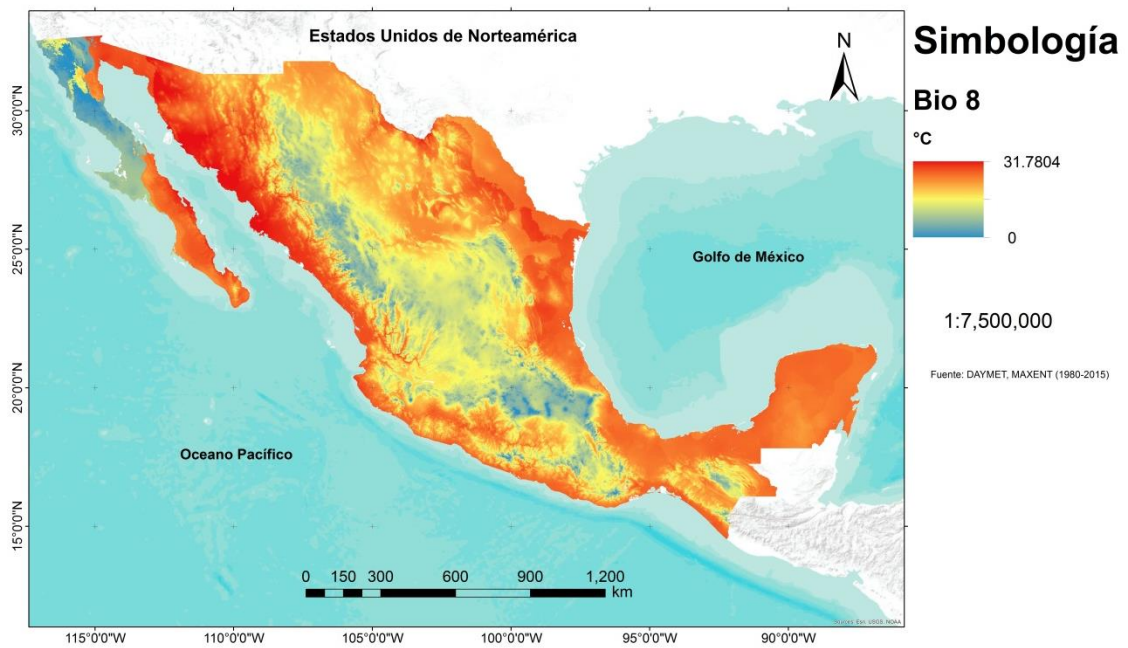
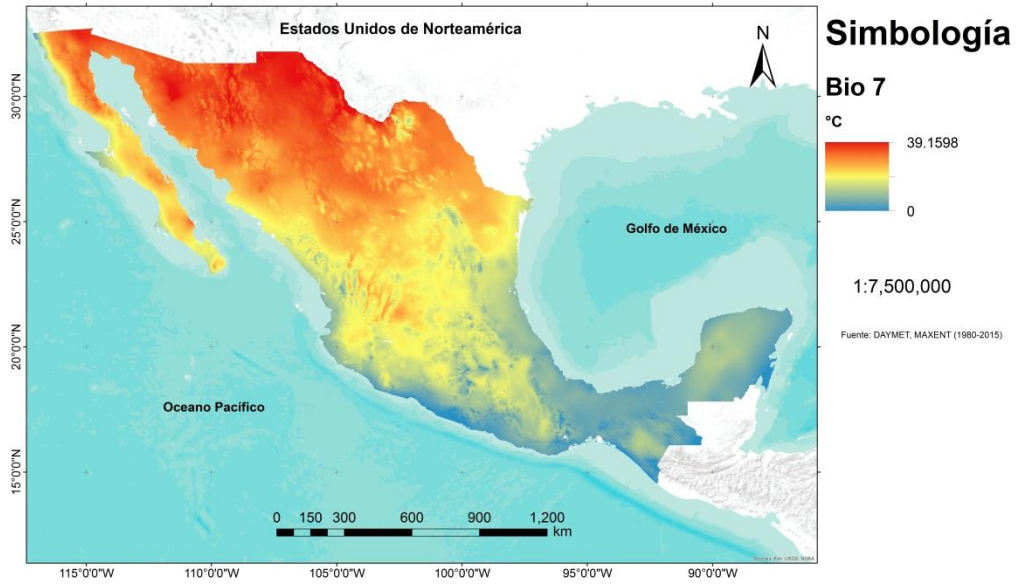


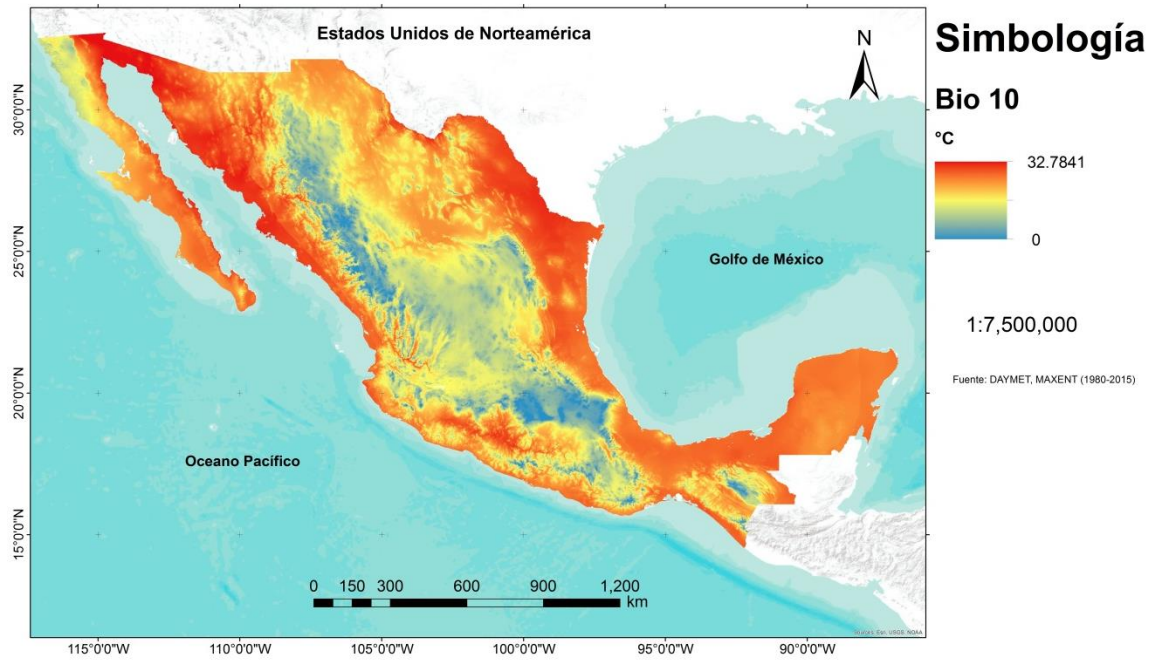
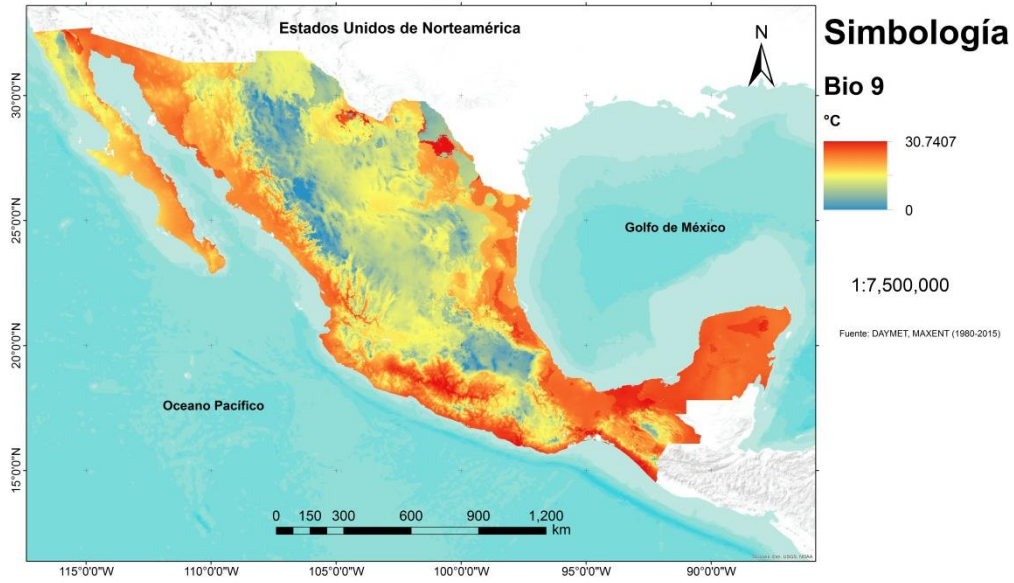


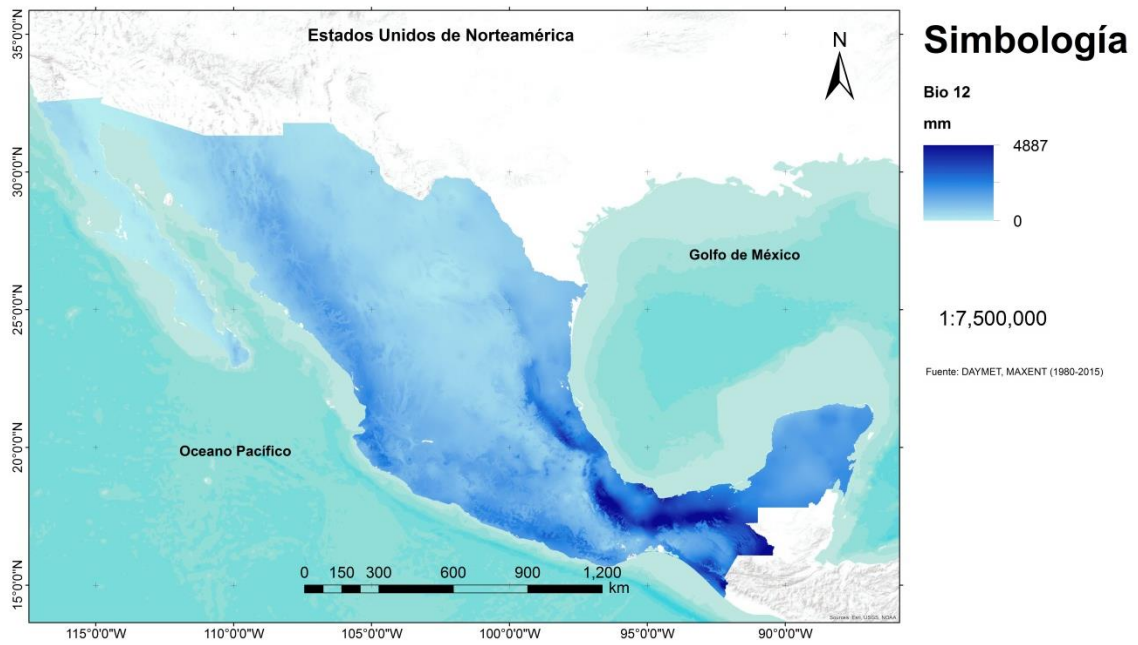
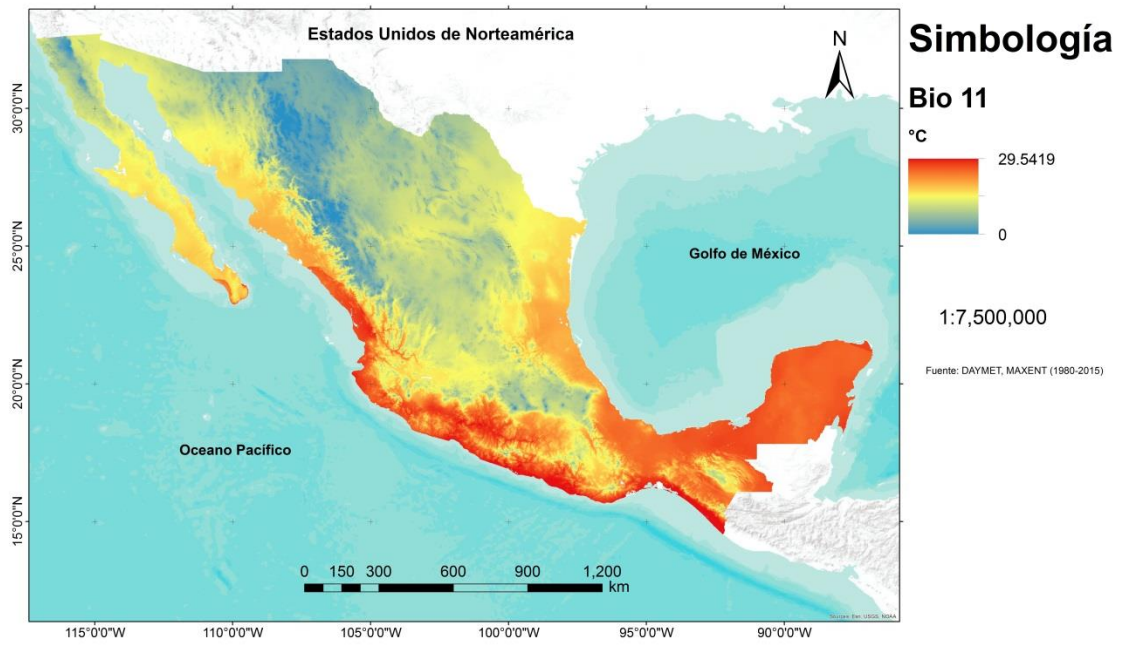


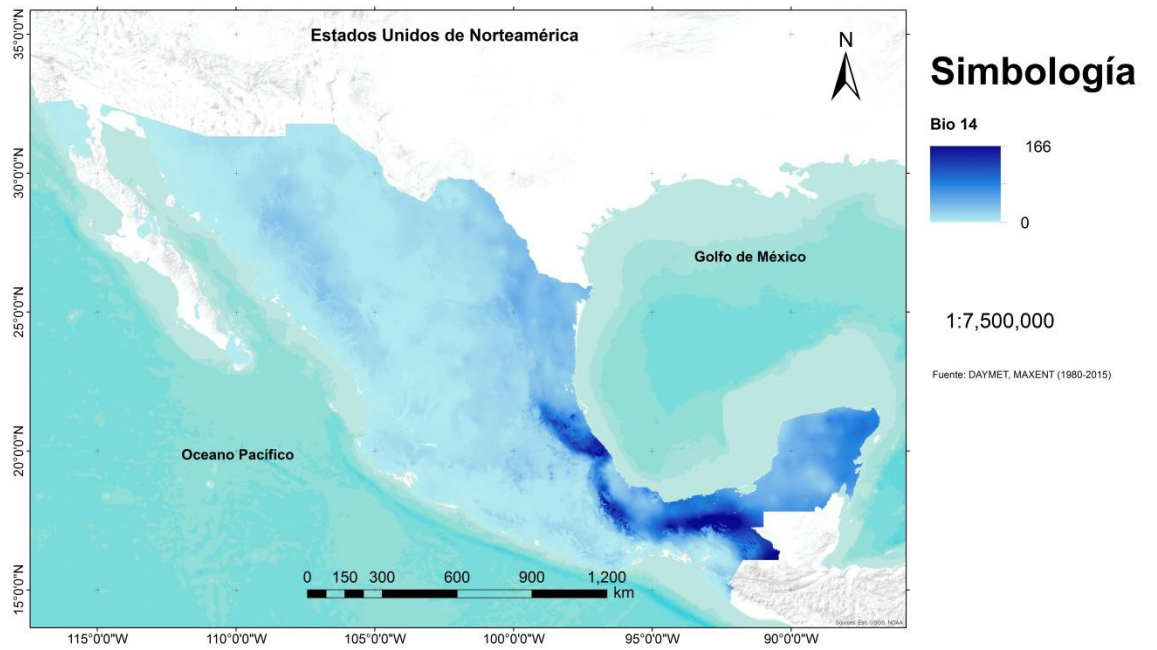
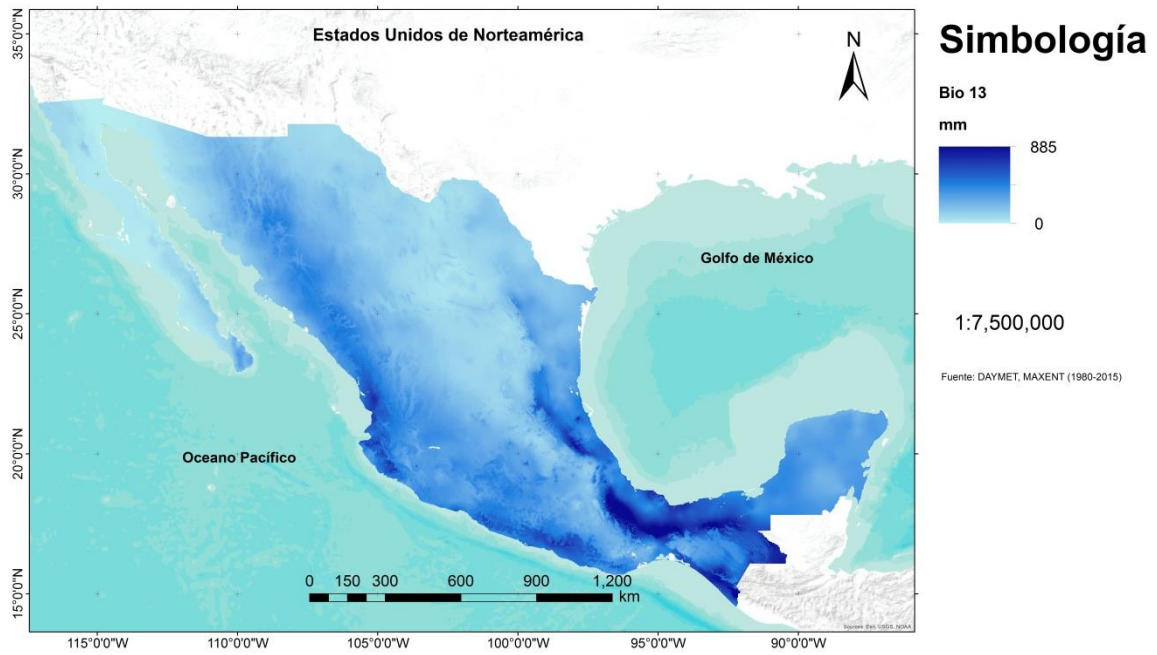
Variable bioclimática 6 en México: Temperatura media del cuarto más cálido del año

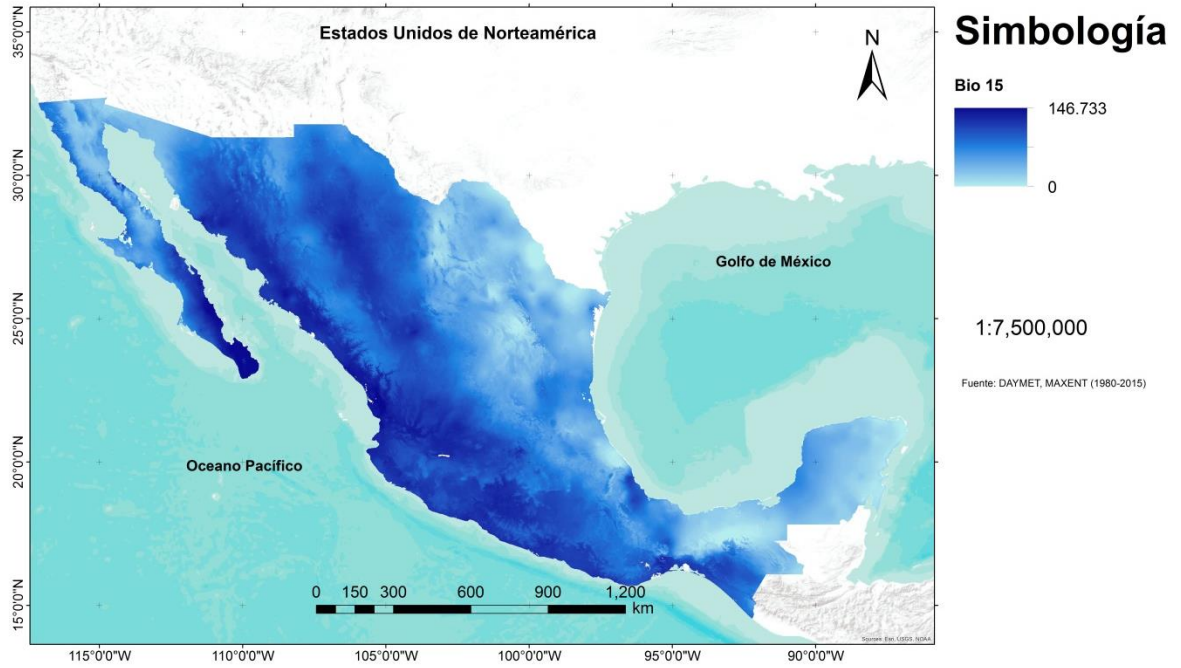




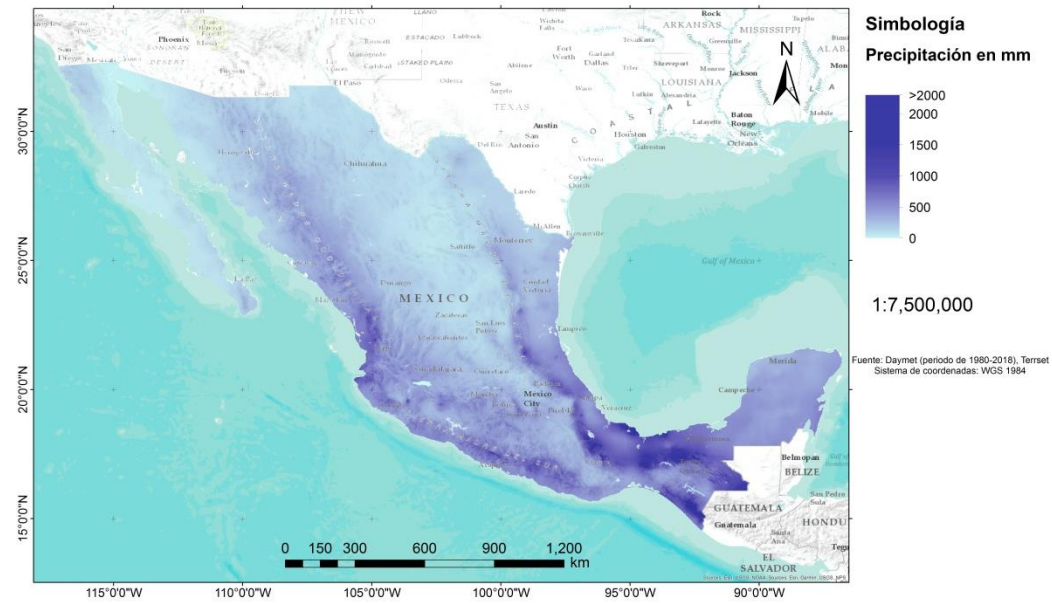


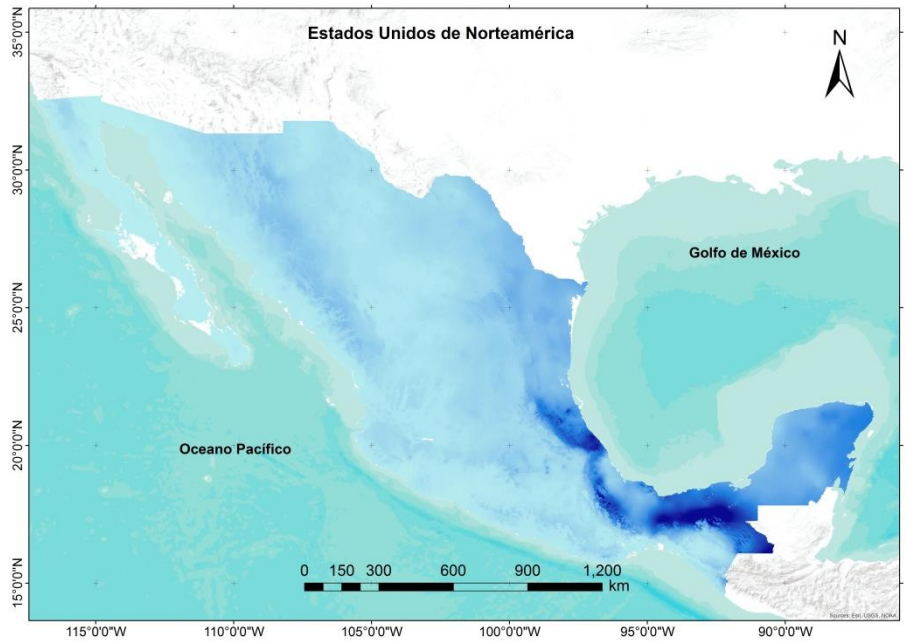






Variable bioclimática 16 en México: Precipitación del cuarto mas húmedo del año

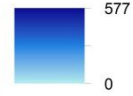




Simbología

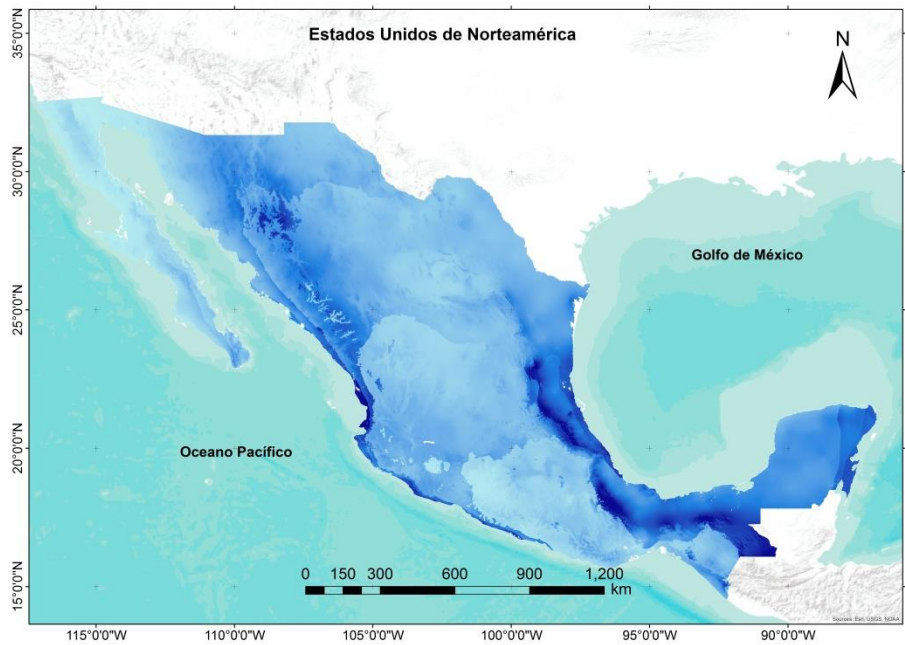
Bio 17

mm



1:7,500,000

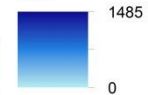
Fuente: DAYMET, MAXENT (1980-2015)



Simbología

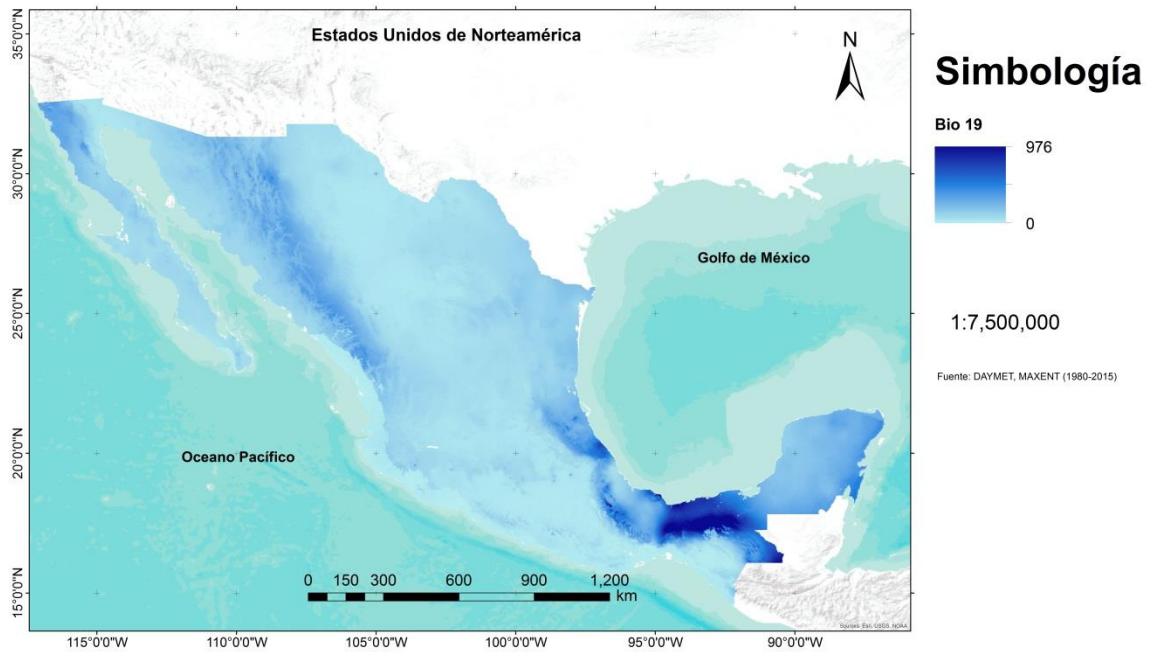
Bio 18

Value



1:7,500,000

Fuente: DAYMET, MAXENT (1980-2015)



Anexo 2: Código ocupado para la eliminación de la autocorrelación espacial

```
presencia1km <-
  thin( loc.data = presencia, #Archivo de presencia
        lat.col = "Lat", long.col = "Long", #Columna de latitud y longitud en el archivo#
        spec.col = "Especie", #Columna con el nombre de especie
        thin.par = 1, # numero en km para el buffer de nearest neighbor distance
        reps = 50,
        locs.thinned.list.return = TRUE,
        write.files = TRUE,
        max.files = 10, # numero de archivos filtrados
        out.dir = "presencia1km", out.base = "presencia1km", #direccion de salida
        write.log.file = TRUE,
        log.file = "pres_log_file1km.txt" )
```


Anexo 4: **Numero de presencias registradas por institución** (Fuente: *Elaboración propia*)

Institución/ Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total por institución	
Sin dato	3		24	13	8	10	16	14	32	43	26	25	1									215
CIP-INSP			21	2																		23
CP															8							8
CRISP-INSP	1			22	7	10	59	89	6													194
ECOSUR													48	8								56
FCB-UANL		94	21	21	18	45	46			8												253
iNaturalist												1				1	1	5	2	4		14
InDRE-SSA					17			27	304	218	1569	1428	970									4533
Secretaria de salud	21	227	564	694	438	318	175	313	1144	859	833	878										6464
Total anual	25	321	630	752	493	373	247	413	1569	1134	2428	2332	971	48	16	1	1	5	2	4		11765