

Riesgo climático-sanitario en Guatemala: tendencias térmicas extremas y su correlación con el dengue, IRAs y ETAs

Climate–health risk in Guatemala: extreme thermal trends and their correlation with dengue, ARIs and FWDs

 Wener A. Ochoa-Orozco¹
wochoa@postgrado.ingenieria.usac.edu.gt

 Joxual J. Araque-Pérez²
20249016564@fausac.gt*

 Gerson Elías Barrios Garrido³
gersonbarrios@gmail.com

Fecha de Recepción: 10-01-2026

Fecha de Aprobación: 16-03-2026

RESUMEN

Las olas de calor representan un riesgo emergente para la salud pública en Guatemala, donde la heterogeneidad climática y territorial intensifica sus impactos. El estudio evaluó la evolución espaciotemporal de las olas de calor y su asociación con dengue, infecciones respiratorias agudas (IRAs) y enfermedades transmitidas por alimentos y agua (ETAs). Se analizaron series diarias de temperatura máxima de 33 estaciones (1970–2024) y registros epidemiológicos departamentales (2014–2024). Las olas de calor se definieron como periodos de ≥ 3 días con temperatura máxima por encima del percentil 95 mensual local. Los resultados demostraron un aumento nacional promedio de 0.9 eventos por década ($p < 0.01$), con mayor recurrencia en Zacapa, Petén y Escuintla. La temperatura máxima se asoció con la incidencia de dengue ($\rho = 0.74$), IRAs ($\rho = 0.61$) y ETAs ($\rho = 0.66$), y los modelos identificaron un umbral térmico crítico de 32–34 °C. Un índice de vulnerabilidad climática-sanitaria integró variables climáticas, epidemiológicas y territoriales, destacando a Guatemala como el departamento más vulnerable (IVCS = 0.83). Estos hallazgos respaldan la incorporación de métricas de calor extremo en la vigilancia epidemiológica, los sistemas de alerta temprana y la priorización territorial de medidas de adaptación.

Palabras claves: Adaptación al cambio climático, condiciones meteorológicas, epidemiología, salud pública, zona tropical

ABSTRACT

Heat waves represent an emerging public health risk in Guatemala, where climatic and territorial heterogeneity intensifies health impacts. The study assessed the spatiotemporal evolution of heat waves and their association with dengue, acute respiratory infections (ARIs), and food- and water-borne diseases (FWDs). Daily maximum temperature series from 33 meteorological stations

¹ Universidad de San Carlos. Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrado. Guatemala, Guatemala.

² Universidad de San Carlos, Escuela de Posgrado. Guatemala, Guatemala.

³ Universidad Mariano Gálvez. Ingeniería, Ciencias y Sistemas, Estudiante de Doctorado. Guatemala, Guatemala.

*Autor de correspondencia



(1970–2024) and departmental epidemiological records (2014–2024) were analyzed. Heat waves were defined as periods of ≥ 3 consecutive days with daily maximum temperature above the local monthly 95th percentile. Results show a significant national increase, averaging 0.9 events per decade ($p < 0.01$), with higher recurrence in Zacapa, Petén, and Escuintla. The maximum temperature was positively associated with dengue ($\rho = 0.74$), ARIs ($\rho = 0.61$), and FWDs ($\rho = 0.66$), and models identified a critical thermal threshold of 32–34 °C. A climate–health vulnerability index integrated climatic, epidemiological, and territorial variables, identifying Guatemala Department as the most vulnerable (IVCS = 0.83). These findings support incorporating extreme-heat metrics into epidemiological surveillance, early warning systems, and territorial prioritization of climate adaptation strategies.

Keywords: Climate change adaptation, meteorological conditions, epidemiology, public health, tropical regions

Como citar en APA: Ochoa-Orozco, W. A., Araque-Pérez, J. J., & Barrios Garrido, G. E. (2026). Riesgo climático-sanitario en Guatemala: tendencias térmicas extremas y su correlación con el dengue, IRAs y ETAs. *Wani*, (84), e22333. <https://doi.org/10.5377/wani.v1i84.22333>

INTRODUCCIÓN

Las olas de calor se han consolidado como uno de los fenómenos climáticos extremos de mayor impacto a escala global, tanto por su frecuencia creciente como por sus efectos directos e indirectos sobre la salud humana, los ecosistemas y la infraestructura urbana. El Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC], (2021) documenta con alta confianza que el aumento de la temperatura media global, asociado al forzamiento radiativo antropogénico, ha incrementado la intensidad, duración y recurrencia de eventos extremos de calor en prácticamente todas las regiones del mundo. Estos cambios no solo reflejan una alteración del clima medio, sino una modificación sustantiva de la variabilidad térmica, con implicaciones críticas para los sistemas naturales y sociales.

En América Latina, las olas de calor se han intensificado durante las últimas décadas, con impactos documentados en la salud pública, la seguridad alimentaria y la disponibilidad hídrica (Magrin et al., 2014; Marengo et al., 2025). Investigaciones en Brasil, México y Argentina han evidenciado incrementos sustanciales en la mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias durante episodios de calor extremo, especialmente en poblaciones urbanas vulnerables (Gasparrini et al., 2015; Hajat & Kosatky, 2010). Asimismo, se ha documentado una asociación creciente entre temperaturas elevadas y la incidencia de enfermedades infecciosas sensibles al clima, como el dengue, las infecciones respiratorias agudas (IRAs) y las enfermedades transmitidas por el agua (ETAs), debido a la alteración de ciclos biológicos, patrones de movilidad humana y condiciones sanitarias (Levy et al., 2016; Ebi et al., 2021).

Desde el punto de vista climatológico, una ola de calor se define comúnmente como un periodo de al menos tres días consecutivos con temperaturas máximas que superan un umbral estadístico local, usualmente el percentil 90 o 95 de una serie histórica (Perkins y Alexander, 2013). Este enfoque permite capturar la naturaleza relativa del fenómeno y su adaptación a contextos climáticos regionales. Estudios recientes han demostrado que el incremento de estos eventos está



estrechamente vinculado a patrones de circulación atmosférica a gran escala, como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), así como a procesos locales de urbanización, pérdida de cobertura vegetal y modificación del balance energético superficial (Russo et al., 2014; IPCC, 2021).

En Centroamérica, y particularmente en Guatemala, el análisis sistemático de las olas de calor ha sido limitado, fragmentado o centrado únicamente en variables meteorológicas aisladas. Esto resulta crítico si se considera que el país presenta una alta heterogeneidad climática, una topografía compleja y un proceso acelerado de urbanización, caracterizado por expansión desordenada, déficit de áreas verdes y presión creciente sobre los servicios básicos (Ochoa-Orozco et al., 2022). Estas condiciones incrementan la exposición y vulnerabilidad de la población ante extremos térmicos, especialmente en áreas metropolitanas y corredores urbanos intermedios.

A nivel nacional, los estudios existentes han abordado principalmente la variabilidad climática y sus efectos en la agricultura o la disponibilidad hídrica, pero persiste una brecha significativa en la integración entre clima, salud y urbanización desde un enfoque multiescalar y longitudinal. Asimismo, los sistemas de vigilancia epidemiológica rara vez incorporan variables climáticas como insumo para la prevención y gestión del riesgo sanitario, a pesar de la evidencia internacional que respalda su utilidad (WHO, 2018; Ebi et al., 2021).

En este contexto, el presente estudio busca contribuir mediante un análisis integrado de la evolución de las olas de calor en Guatemala entre 1970 y 2024 y su relación con la incidencia de enfermedades sensibles al clima durante el periodo 2014–2024. El enfoque combina información climática, epidemiológica y urbana para identificar patrones espaciales y temporales, así como niveles diferenciados de vulnerabilidad territorial. Esta aproximación permite caracterizar el fenómeno desde una perspectiva física e interpretar sus implicaciones sanitarias y sociales, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos asumidos por el país en el marco de sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC).

MATERIALES Y MÉTODOS

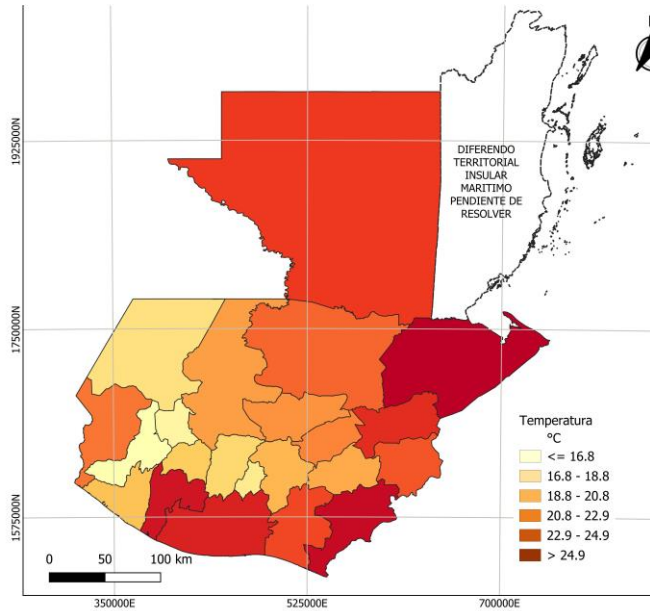
Área de estudio

El estudio se desarrolló a escala nacional para los 22 departamentos de Guatemala, país localizado en Mesoamérica entre los 13°44' y 17°49' N y los 88°14' y 92°13' O (WGS-84). Presenta heterogeneidad climática y fisiográfica, determinada por la interacción entre la Cordillera Volcánica, el Altiplano Central, las planicies costeras del Pacífico y las tierras bajas del norte (Petén). Estas condiciones generan fuertes gradientes térmicos, pluviométricos y ecológicos. El país posee un clima tropical con marcada estacionalidad, caracterizado por una estación seca (noviembre–abril) y una lluviosa (mayo–octubre), siendo los meses de marzo a julio el periodo de mayor ocurrencia de temperaturas extremas (Figura, 1).



Figura 1

Mapa de la República de Guatemala y su temperatura media anual. Climatología 1970-2024



Datos utilizados

Se integraron tres tipos de información: climática, epidemiológica y territorial, estos, provenientes del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social de Guatemala [MSPAS], (2025), Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación [MAGA], 2021, y el Instituto nacional de estadísticas de Guatemala [INE], 2025. Las series climáticas se obtuvieron de 33 estaciones meteorológicas con registros continuos y sometidos a control de calidad por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala [INSIVUMEH], 2024 (proyecciones). Los datos epidemiológicos correspondieron a registros oficiales consolidados por departamento y fueron depurados para eliminar duplicados y valores inconsistentes. (Tabla 1).

Tabla 1

Fuentes de datos oficiales utilizadas para el análisis del estudio.

Tipo de Dato	Variable	Fuente	Periodo
Climático	Temperatura máxima diaria	INSIVUMEH	1970–2024
Epidemiológico	Dengue, IRAs, ETAs	MSPAS (2025)	2014–2024
Territorial	Urbanización, cobertura vegetal	Landsat / MAGA, 2021	2000–2024
Demográfico	Población departamental	INE, 2025 (proyecciones)	2014–2024

Las olas de calor se definieron por la metodología propuesta por Perkins y Alexander (2013) para: “Períodos de al menos tres días consecutivos con temperatura máxima diaria superior al percentil 95 de la climatología mensual local.” Estas se calcularon por estación meteorológica y mes para el periodo 1970–2023. La identificación de eventos se realizó mediante scripts en Python (NumPy, Pandas, xarray), permitiendo el cálculo de: a) Frecuencia anual de olas de calor, b) Duración media por evento, c) Intensidad térmica acumulada, d) Tendencias temporales.

Análisis estadístico y detección de tendencias

Para evaluar la evolución temporal de las olas de calor, primero se verificó la consistencia y homogeneidad de las series de temperatura máxima diaria mediante la prueba SNHT (Standard Normal Homogeneity Test), para identificar inhomogeneidades asociadas a cambios no climáticos en la medición (Alexandersson, 1986). Se detectaron puntos de cambio múltiples mediante el algoritmo PELT para caracterizar rupturas estructurales en las métricas temporales derivadas de las olas de calor (frecuencia, duración e intensidad); (Killick et al., 2012), (Figura, 2). La tendencia monótonica (creciente o decreciente) se evaluó con la prueba de Mann–Kendall utilizando una corrección para autocorrelación, y la magnitud del cambio (Hamed y Rao, 1998). Las asociaciones entre temperatura máxima e incidencia de dengue, IRAs y ETAs se estimaron inicialmente mediante correlaciones de Spearman (ρ), definida como (Ecuación 1):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

Donde d_i representa la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones y n el número de pares emparejados. Cada observación correspondió a una unidad mes–departamento para el periodo 2014–2024, emparejando la temperatura máxima media mensual con la tasa mensual de cada evento sanitario, y evaluando significancia con $\alpha=0.05$, coeficientes que derivan directamente de la matriz mensual de datos y no de agregaciones arbitrarias (MSPAS, 2025).

Finalmente, para capturar relaciones no lineales y posibles umbrales entre temperatura y desenlaces sanitarios, se ajustaron Modelos Aditivos Generalizados (GAM) ecuación 2, (Wood, 2017),

$$g(E[Y]) = \beta_0 + s(T_{max}) + s(PP) + s(U) \quad (2)$$

Donde: Y representó la tasa mensual de enfermedad (Dengue, IRAs o ETAs), modelada mediante enlace logarítmica $g(\cdot)$ mientras que $s(\cdot)$ correspondió a funciones suavizadas tipo spline aplicadas a la temperatura máxima mensual (T_{max}), la precipitación mensual (PP) y urbanización (cobertura vegetal). A partir de estos GAM se identificó un umbral térmico crítico de 32–34 °C. El análisis se realizó en R (R-Core Team, 2026) (mgcv, trend, Kendall) y Python (statsmodels, scipy), toda la construcción metodológica está expresada en la figura 2.

Construcción del índice de vulnerabilidad climática-sanitaria (IVCS)

El índice se fundamenta en el enfoque de índices compuestos, para estudios de vulnerabilidad climática y salud pública, que permite combinar variables heterogéneas mediante estandarización y agregación en una escala común (Chan et al., 2019). Las variables incluidas son: frecuencia de olas de calor, incidencia de dengue, incidencia de infecciones respiratorias agudas (IRAs),

incidencia de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs), densidad poblacional, cobertura vegetal estimada mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y nivel de urbanización. Todas las variables fueron normalizadas utilizando el método min–max, con el fin de transformar los valores originales a un rango adimensional entre 0 y 1, según la expresión de la Ecuación 3:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

Este procedimiento es recomendado cuando se integran indicadores con distintas unidades y magnitudes, y ha sido aplicado de forma consistente en índices de vulnerabilidad climática y sanitaria (Edmonds et al., 2020). El IVCS se calculó mediante un promedio aritmético simple de las variables normalizadas, asumiendo pesos iguales para cada componente. Esta aproximación es común en estudios exploratorios y comparativos a escala subnacional (Reckien et al., 2018) y se expresa como la Ecuación 4:

$$IVCS = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4)$$

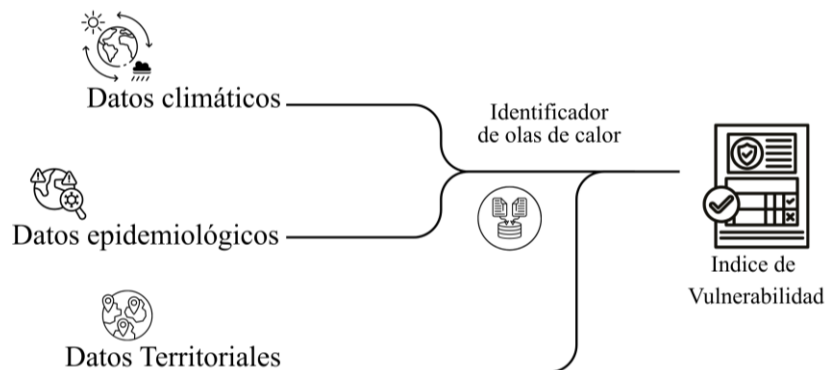
Los valores obtenidos se clasificaron en cuatro categorías de vulnerabilidad: muy alta (≥ 0.80), alta (0.70–0.79), moderada (0.50–0.69) y baja (< 0.50). Se establecieron dentro de una escala normalizada 0–1 consistentes con clasificaciones empleadas en estudios regionales de vulnerabilidad y riesgo climático en América Latina y el Caribe (Chan et al., 2019).

Consideraciones éticas

El estudio utilizó información secundaria de acceso público. No se trabajó con datos personales identificables, por lo que no requirió aprobación de comité de ética, conforme a normativas internacionales de investigación epidemiológica.

Figura 2

Esquema metodológico del índice creado. Resumen general del empleo de los datos para el análisis y generación del índice de vulnerabilidad climática.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución temporal de las olas de calor en Guatemala (1970–2023)

Se evidencia un incremento sostenido en la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor en Guatemala durante el periodo 1970–2024. La aplicación de la prueba de Mann–Kendall mostró una tendencia positiva significativa ($p < 0.01$) a escala nacional, con un aumento promedio de 0.9 eventos de ola de calor por década. La pendiente de *Sen* indicó que el incremento fue más pronunciado a partir de la década de 1990, coincidiendo con el periodo de mayor calentamiento regional documentado para Centroamérica.

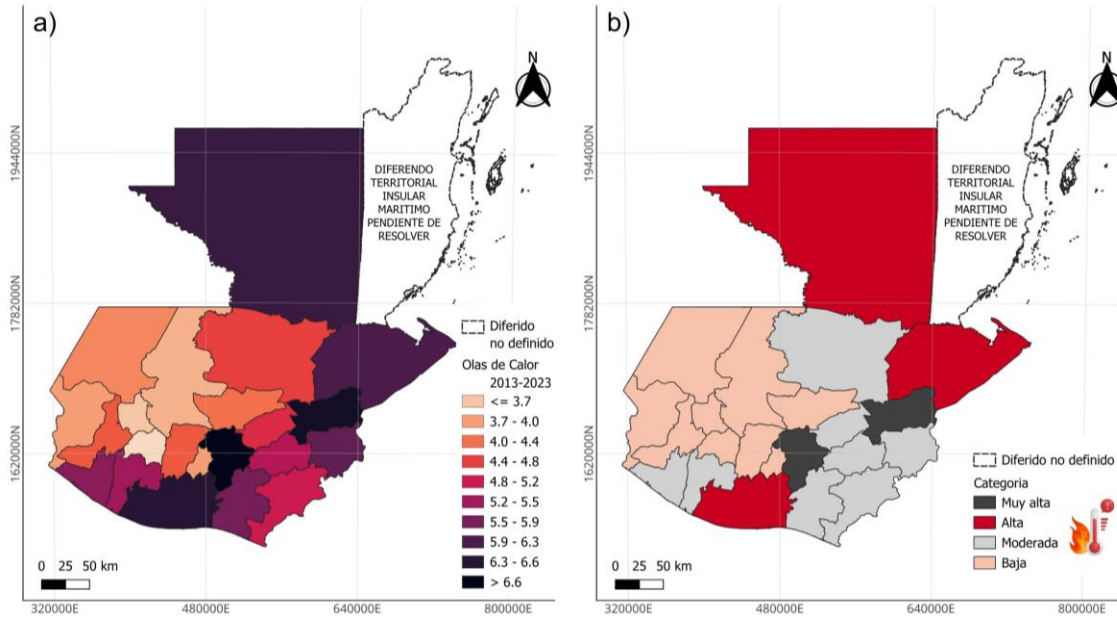
Los resultados confirman que las olas de calor han aumentado en frecuencia y persistencia en Guatemala (1970–2024) y que, en el periodo epidemiológico (2014–2024), la temperatura máxima se asocia de forma positiva y significativa con dengue, ETAs e IRAs. Este patrón es consistente con la literatura internacional que documenta el incremento de extremos térmicos bajo calentamiento antropogénico y su traducción en riesgos sanitarios multicausales (IPCC, 2021; Ebi et al., 2021). En términos de comparabilidad metodológica, el uso de un umbral relativo (P95) y duración mínima (≥ 3 días) se alinea con definiciones operativas ampliamente adoptadas para capturar riesgo localmente relevante y permitir comparaciones espaciales (Perkins y Alexander, 2013).

Distribución espacial de las olas de calor

Existe marcada heterogeneidad territorial en la ocurrencia de olas de calor. Las regiones del oriente y norte del país concentraron los mayores valores de frecuencia e intensidad térmica. Zacapa y Petén registraron los mayores acumulados de días con temperaturas superiores al percentil 95, superando los 22–24 días por año en los periodos recientes. La duración media de los eventos pasó de 2.1 ± 0.6 días (1970–1989) a 3.7 ± 0.9 días (2004–2023), evidenciando no solo mayor frecuencia, sino también persistencia térmica. Los departamentos que presentaron las mayores tasas de incremento fueron Zacapa, Petén, Escuintla y Guatemala, con valores superiores a 1.2 eventos por década.

El aumento nacional estimado (eventos por década) es congruente con la evidencia global que muestra intensificación de olas de calor y expansión de su magnitud bajo escenarios recientes y proyectados (Russo et al., 2014). En Guatemala, la heterogeneidad espacial (máximos en Zacapa, Petén, Escuintla y Guatemala) sugiere una combinación de forzantes regionales y amplificadores locales. La literatura sobre isla de calor urbana demuestra mecanismos físicos consistentes (balance energético, reducción de evapotranspiración, almacenamiento térmico), que elevan temperaturas nocturnas y aumentan la duración de episodios cálidos, incluso donde el máximo absoluto no sea el más alto (Oke, 1982). Por tanto, el hallazgo de incremento en el departamento de Guatemala, pese a su altitud relativa, es esperable cuando se integra urbanización y pérdida de cobertura vegetal (Figura, 3).

Figura 3
 Distribución espacial de la Onda de Calor en Guatemala



Nota. a) Índice definido por eventos, b) definiciones asociadas a categorías de eventos.

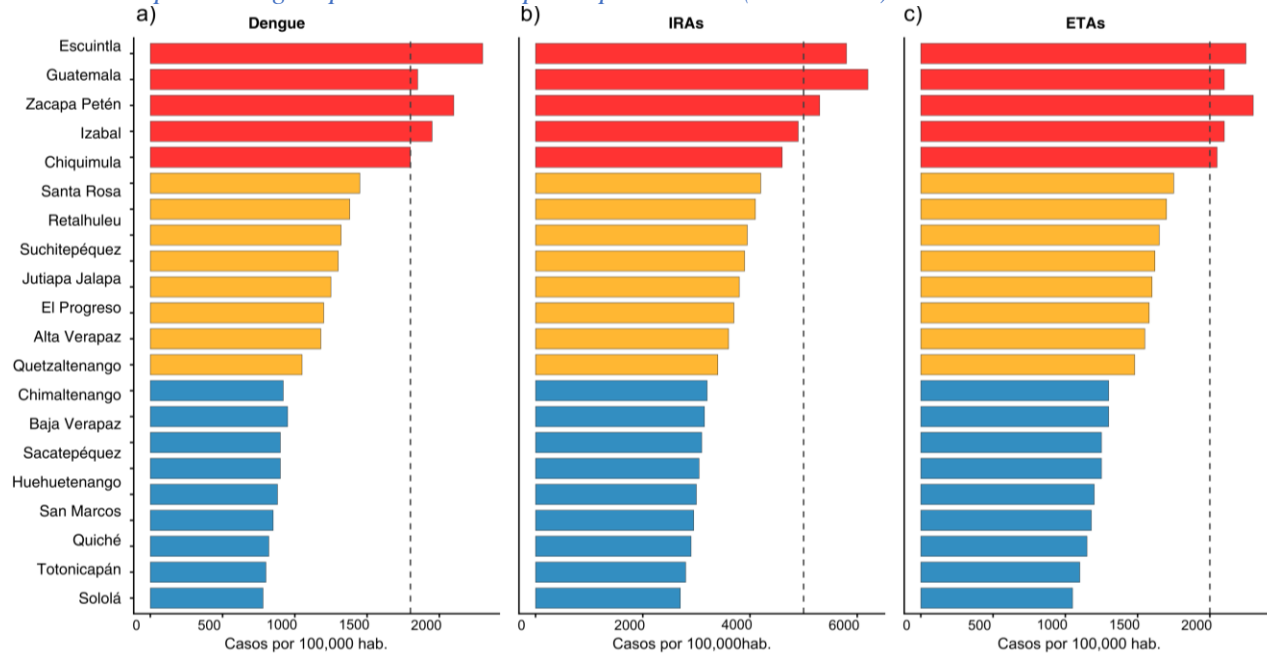
En contraste, departamentos de mayor altitud como Totonicapán y Quiché mostraron incrementos más moderados, aunque estadísticamente significativos. En el área metropolitana de Guatemala, se observó un aumento sostenido en la frecuencia de eventos, asociado al efecto de isla de calor urbana y a la reducción progresiva de cobertura vegetal. El análisis espacial mostró una clara correspondencia entre densidad urbana y recurrencia de olas de calor (Figura 3).

Comportamiento epidemiológico de enfermedades sensibles al clima (2014–2024)

Durante el periodo 2014–2024, el análisis epidemiológico demuestra alta carga de enfermedades sensibles al clima, más de 600,000 casos anuales de infecciones respiratorias agudas (IRAs), entre 180,000 y 250,000 casos anuales de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) y picos epidémicos de dengue que superaron los 37,000 casos por año, especialmente en 2019 y 2023. A escala territorial, los departamentos de Guatemala, Escuintla, Petén y Zacapa concentraron las mayores incidencias acumuladas, mostrando una coincidencia espacial con las zonas donde se registró mayor frecuencia de olas de calor, lo que sugiere un patrón de riesgo climático-epidemiológico (Figura 4).

Figura 4

Incidencia epidemiológica promedio anual por departamento (2014-2024)



Nota. Los mayores valores de incidencia epidemiológica se concentraron en los departamentos de Guatemala, Zacapa, Escuintla y Petén, donde las tasas de dengue superaron los 1,800 casos por 100,000 habitantes y las IRAs excedieron los 5,000 casos por 100,000 habitantes. Estos territorios coinciden con las zonas de mayor frecuencia de olas de calor, lo que refuerza la relación entre extremos térmicos y carga sanitaria.

^aPanel para casos de Dengue en base a la media acumulada, ^bInfecciones respiratorias ^cEnfermedades transmitidas por agua. ^dLa línea discontinua identifica saturación de casos.

Dengue y temperatura extrema: coherencia mecánica

La asociación positiva temperatura–dengue (y su concentración en territorios más cálidos/urbanizados) es consistente con evidencia mecánica y epidemiológica: la transmisión por *Aedes* muestra una dependencia no lineal de temperatura porque esta controla la supervivencia del vector, el tiempo de desarrollo y el período de incubación extrínseca del virus. Modelos mecánicos demuestran rangos térmicos óptimos y umbrales superiores donde el riesgo puede aumentar rápidamente antes de caer por estrés térmico en el vector (Mordecai et al., 2017).

Además, estudios han mostrado que no solo la temperatura media importa: la variabilidad diaria y el rango diurno también modifican la capacidad vectorial y el potencial epidémico (Liu-Helmersson et al., 2014). A escala global, la redistribución del riesgo de virus transmitidos por *Aedes* bajo cambio climático y urbanización está bien documentada, con énfasis en incrementos de exposición y cambios en estacionalidad (Ryan et al., 2019, Zúñiga et al., 2025). En este contexto, que Guatemala, Escuintla, Zacapa y Petén presenten simultáneamente más olas de calor y alta



incidencia de dengue es epidemiológicamente coherente y refuerza la plausibilidad causal (sin sustituir análisis causal formal).

El estrés térmico prolongado (magnitud + duración) puede interactuar con otros factores epidemiológicos y climáticos. La mayor frecuencia de eventos ocurre en magnitudes moderadas, entre 1 °C y 2 °C por encima del p95, lo cual incidirá para dar las condiciones óptimas en la supervivencia del mosquito y la transmisión del virus. Se debe de considerar, que sí hay un aumento en la temperatura de los departamentos donde los casos de dengue son menores (Totonicapán, Chimaltenango, Retalhuleu, Sololá) aumentara el número de casos como el área para que *Ae. Aegypti* se puede reproducir y sobrevivir. Liu-Helmersson et al., (2016) señalan que, temperaturas por encima de 25 °C - 28 °C influyen en la ecología del dengue al afectar la dinámica de los vectores, el desarrollo del virus y las interacciones entre humanos y mosquitos. Sin embargo, la relación entre dengue y factores climáticos es muy compleja y es necesario destacar factores sociales, económicos y rangos de edades para predecir con más precisión (Morin et al., 2013), (Figura, 5).

ETAs, calor y riesgo hidrosanitario

La relación positiva entre temperatura extrema y ETAs es consistente con revisiones sistemáticas que muestran asociación entre temperatura y diarreas bacterianas, además de incrementos tras eventos hidrometeorológicos extremos que alteran la calidad del agua (inundaciones, lluvias intensas), (Levy et al., 2016). Aunque una ola de calor no es en sí un evento híbrido puede aumentar el riesgo por múltiples vías: mayor proliferación microbiana en fuentes y almacenamiento doméstico; reducción de caudales y concentración de contaminantes; deterioro de la cadena de frío, y estrés sobre sistemas de agua potable y saneamiento.

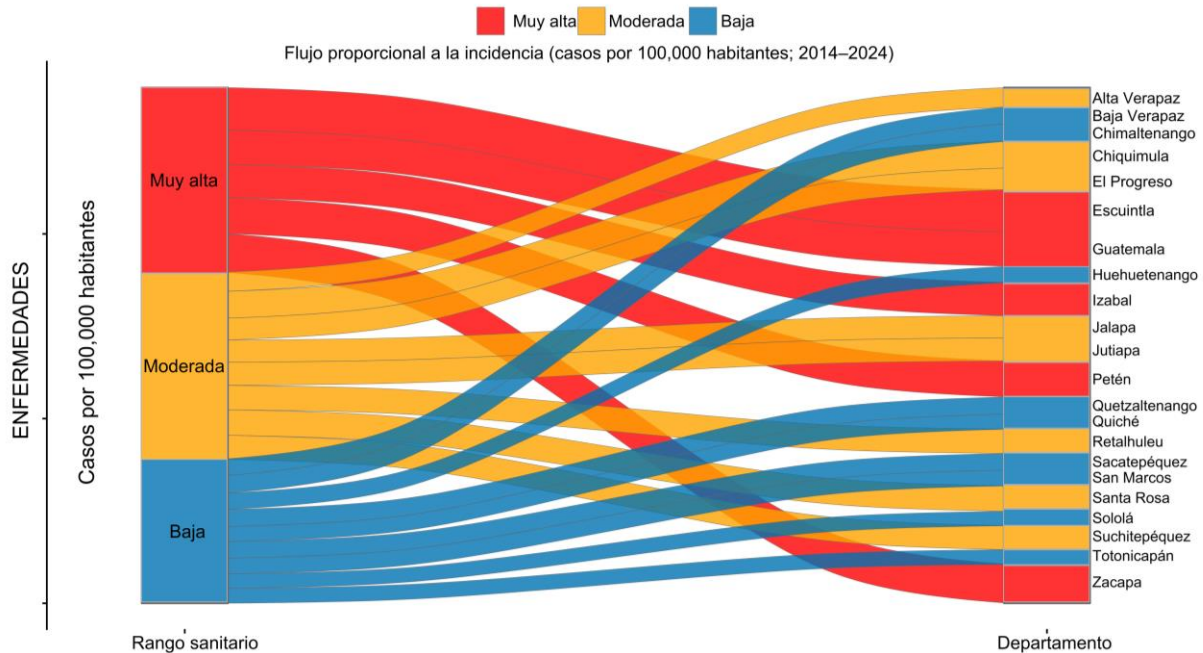
Esto implica que en la lectura de los resultados, no se debe interpretar únicamente que la temperatura causa ETAs, sino que es un proceso en el que la temperatura extrema amplifica vulnerabilidades preexistentes en los sistemas WASH (*Water, Sanitation and Hygiene*), entendidos como un enfoque de análisis de vulnerabilidad que identifica deficiencias en el acceso, la infraestructura y la gestión de los servicios de agua, saneamiento e higiene, las cuales incrementan la exposición de las poblaciones a riesgos para la salud, especialmente en contextos de crisis, baja inversión o efectos del cambio climático (Figura 5).

IRAs y calor: vías fisiológicas y ambientales

La asociación temperatura-IRAs debe interpretarse con cautela porque las IRAs son un síndrome amplio y multietiológico. Sin embargo, revisiones de salud pública han documentado que el calor extremo incrementa la carga cardiorrespiratoria y puede agravar condiciones respiratorias, a la vez que interactúa con contaminantes y alérgenos; el impacto depende del contexto y del acceso a servicios (Hajat & Kosatky, 2010; Ebi et al., 2021). En entornos urbanos, el calor puede actuar como estresor adicional que incrementa consultas y complicaciones, particularmente en población vulnerable, y puede coincidir con variaciones de calidad del aire y exposición ocupacional (Figura, 5).

Figura 5

Comportamiento de la incidencia epidemiológica para Dengue, IRAs, ETAs por departamento.



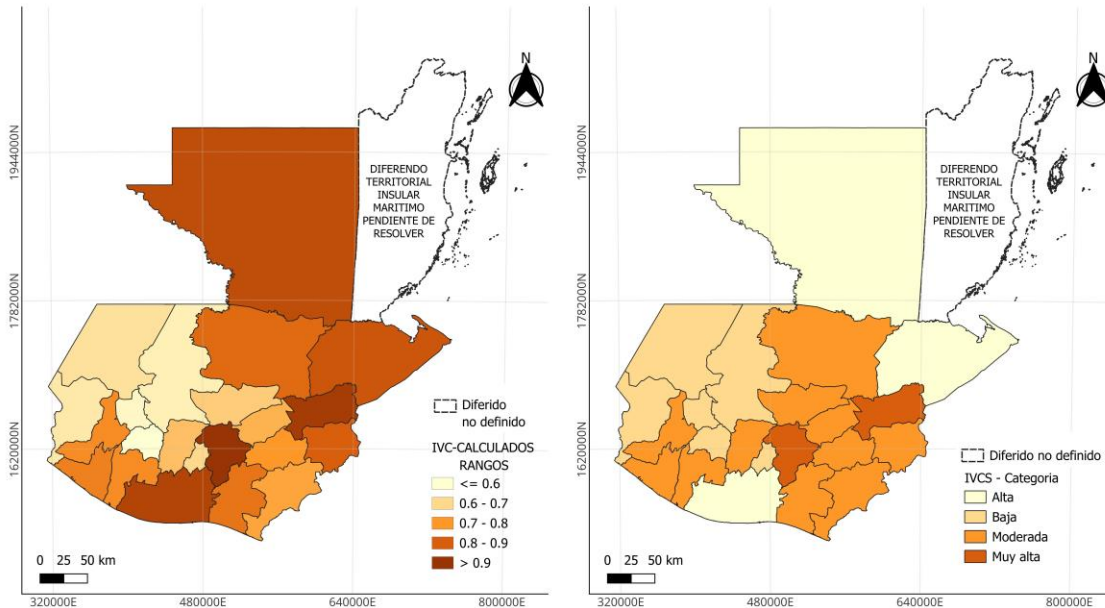
La temperatura máxima mostró una correlación fuerte con la incidencia de dengue ($r = 0.74$; $p < 0.01$), así como asociaciones moderadas pero significativas con las IRAs ($r = 0.61$; $p < 0.05$) y las ETAs ($r = 0.66$; $p < 0.01$). Para los modelos aditivos generalizados (GAM) se identifican relaciones no lineales entre la temperatura máxima y la incidencia sanitaria, indicando que el riesgo se incrementa de manera acelerada cuando las temperaturas máximas superan el rango aproximado de $32\text{ }^{\circ}\text{C} - 34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este patrón se manifestó de forma más marcada para todas las enfermedades en los departamentos de Guatemala, Escuintla, Zacapa, Petén e Izabal, territorios que combinan mayor exposición a olas de calor con alta densidad poblacional y elevada carga epidemiológica.

Índice de vulnerabilidad climática-sanitaria

El Índice de Vulnerabilidad Climática-Sanitaria (IVCS) permitió identificar y jerarquizar la vulnerabilidad relativa de los 22 departamentos integrando las variables climáticas, epidemiológicas y territoriales en una escala de 0 a 1. A nivel del territorio, es muy heterogéneo con un patrón de vulnerabilidad diferenciado entre departamentos. Esto demuestra exposición a extremos térmicos y carga sanitaria (Figura, 6). Los mayores rangos del IVCS se concentraron en departamentos caracterizados por altas temperaturas, mayor frecuencia de olas de calor y una elevada incidencia de enfermedades sensibles al clima.



Figura 6
 Índice espacial de vulnerabilidad climática sanitaria (IVCS) por departamento.



Es particularmente relevante que el departamento de Guatemala haya presentado el valor más alto del índice (0.83) (Figura 6), ya que contradice la percepción tradicional de que las mayores vulnerabilidades se concentran únicamente en zonas rurales o de alta pobreza. En este caso, la alta densidad poblacional, la expansión urbana acelerada, la reducción de cobertura vegetal y el efecto de isla de calor urbana actúan como factores amplificadores del riesgo, aun cuando exista mayor disponibilidad de servicios de salud. Este patrón ha sido ampliamente documentado en estudios urbanos internacionales, donde la urbanización no planificada incrementa la exposición térmica y la carga sanitaria (Oke, 1982; Ebi et al., 2021).

Zacapa y Escuintla (Figura 6), clasificados también en el rango de vulnerabilidad muy alta o alta, reflejan un perfil distinto, pero igualmente crítico. En estos territorios, el componente climático tiene un peso mayor debido a temperaturas máximas persistentemente elevadas, baja humedad del suelo y alta recurrencia de olas de calor. A ello, se suma una elevada incidencia de dengue y ETAs, lo que refuerza la evidencia de que los climas cálidos y secos, combinados con déficits estructurales de agua y saneamiento, generan condiciones propicias para crisis sanitarias recurrentes. Estos resultados son coherentes con estudios regionales que identifican a las zonas cálidas y semiáridas como altamente sensibles a extremos térmicos bajo escenarios de cambio climático (Magrin et al., 2014; IPCC, 2021).

El caso de Petén, resulta particularmente ilustrativo el carácter multicausal del riesgo. Aunque presenta menor densidad urbana que el área metropolitana, su alta vulnerabilidad se explica por la combinación de temperaturas elevadas, cambios acelerados de uso del suelo, expansión urbana reciente y limitaciones en la cobertura de servicios básicos. Esta configuración coincide con hallazgos de estudios que documentan cómo la deforestación y la urbanización periférica

incrementan la exposición a enfermedades sensibles al clima, especialmente dengue y ETAs (Levy et al., 2016; Ryan et al., 2019).

El IVCS también evidencia que la vulnerabilidad climática-sanitaria no depende exclusivamente del clima extremo, sino de la capacidad territorial para absorber, responder y adaptarse a dichos eventos. Por ejemplo, departamentos con temperaturas relativamente moderadas, pero con alta cobertura vegetal y menor presión urbana presentan valores inferiores del índice, lo que refuerza el papel protector de los servicios ecosistémicos urbanos y periurbanos. Esta relación ha sido ampliamente documentada en la literatura, que reconoce la infraestructura verde como un componente clave de la adaptación climática y la salud pública (WHO, 2018; Ebi et al., 2021).

Desde una perspectiva metodológica, el índice constituye una herramienta para la priorización territorial, al integrar variables normalizadas y comparables. Sin embargo, debe reconocerse que su carácter compuesto implica ciertas limitaciones: la ponderación uniforme de variables puede subestimar dinámicas locales específicas, y la disponibilidad de datos a escala departamental impide capturar micro vulnerabilidades intraurbanas.

En conjunto, el análisis del IVCS confirma que el impacto sanitario de las olas de calor en Guatemala no es uniforme ni aleatorio, sino el resultado de una interacción compleja entre clima, urbanización y desigualdad estructural. Esta evidencia respalda la necesidad de incorporar explícitamente el componente climático en la planificación del sector salud y en las estrategias nacionales de adaptación, alineando la gestión territorial con los compromisos asumidos en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

CONCLUSIONES

El análisis de series diarias de temperatura máxima de 33 estaciones para 1970-2024 y de registros epidemiológicos oficiales para 2014-2024 confirma un incremento sostenido de las olas de calor en Guatemala, con un aumento nacional promedio de 0.9 eventos por década y una marcada heterogeneidad territorial, destacando mayores intensidades en Zacapa, Petén y Escuintla. En correspondencia con el objetivo sanitario del estudio, la temperatura máxima se asocia de manera significativa con la incidencia de dengue, infecciones respiratorias agudas y enfermedades transmitidas por alimentos/agua, con correlaciones moderadas a altas ($\rho = 0.61-0.74$) y la presencia de un umbral térmico crítico identificado en el rango de 32 °C - 34 °C.

La integración de variables climáticas, epidemiológicas y territoriales en el índice de vulnerabilidad climática-sanitaria permite diferenciar patrones de riesgo y evidencia que los mayores niveles se concentran en departamentos con alta presión urbana, donde la densidad poblacional, la expansión urbana y la reducción de cobertura vegetal amplifican la exposición térmica, incluyendo el caso del departamento de Guatemala con el valor más alto del índice (0.83).

Para Guatemala, esto respalda tres implicaciones operativas: a) Fortalecer alerta temprana climática-epidemiológica con umbrales P95 por territorio/estación; b) Priorizar intervenciones en departamentos de mayor vulnerabilidad (índice integrado) para orientar recursos, c) Incorporar medidas urbanas de reducción térmica (infraestructura verde, sombra, materiales) como intervención sanitaria preventiva, coherente con la física urbana del calor.

Finalmente, con los resultados obtenidos se abren nuevas líneas de investigación que resultan fundamentales para dar continuidad y profundizar el alcance de este trabajo. Entre ellas, la posibilidad de estudiar la eco-epidemiología del vector (*Aedes* u otros) bajo escenarios de olas de calor, orientada a comprender cómo el estrés térmico modifica la dinámica de transmisión, incluyendo cambios en la supervivencia, la disponibilidad de sitios de cría y el potencial de transmisión (p. ej., posible aceleración del ciclo viral), y cómo estos efectos varían según el territorio. Además, el mapeo de islas de calor urbanas a escala fina, permitiría capturar gradientes térmicos intraurbanos y su relación con eventos sanitarios, priorizando el desarrollo de mediadas de adaptación territorial basadas en evidencia, integrando clima, salud y planificación del territorio como ejes de una respuesta sistémica frente al calentamiento extremo. Lo anterior, con la intención de buscar estrategias de adaptación climática con enfoque sanitario en Guatemala.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala por compartir los datos, y al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por becarne y darme la oportunidad de ser formado en dicha temática, así como a la empresa de Geoingeniería, Agua y Ambiente 888, por contribuir con el análisis e interpretación de datos. Al Departamento de Vigilancia y Control Dirección de Epidemiología y Gestión del Riesgo Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social por apoyarnos con los datos. A los revisores por sus comentarios constructivos, los cuales mejoraron la calidad de este trabajo.

REFERENCIAS

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Chan, E. Y. Y., Huang, Z., Lam, H. C. Y., Wong, C. K. P., y Zou, Q. (2019). Health vulnerability index for disaster risk reduction: Application in Belt and Road Initiative (BRI) region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 380. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030380>
- Ebi, K. L., Vanos, J., Baldwin, J. W., Bell, J. E., Hondula, D. M., Errett, N. A., y Berry, P. (2021). Extreme weather and climate change: Population health and health system implications. *Annual Review of Public Health*, 42, 293–315. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-012420-105026>
- Edmonds, H. K., Lovell, J. E., y Lovell, C. A. K. (2020). A new composite climate change vulnerability index. *Ecological Indicators*, 117, 106529. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106529>
- Gasparrini, A., Guo, Y., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Huber, V., Tong, S., ... Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *The Lancet*, 386(9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Hajat, S., y Kosatky, T. (2010). Heat-related mortality: A review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 64(9), 753–760. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.087999>

- Hamed, K. H., y Rao, A. R. (1998). A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Instituto Nacional de Estadística de Guatemala (INE). (2025). Estimación y proyecciones de la población de Guatemala (nacional y departamental). <https://www.ine.gob.gt/proyecciones/>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH). (2024). *Sección de climatología: Datos de la red de estaciones meteorológicas convencionales de Guatemala*. <https://insivumeh.gob.gt/?p=92918>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Killick, R., Fearnhead, P., y Eckley, I. A. (2012). Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 107(500), 1590–1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>
- Levy, K., Woster, A. P., Goldstein, R. S., y Carlton, E. J. (2016). Untangling the impacts of climate change on waterborne diseases. *Environmental Science & Technology*, 50(10), 4905–4922. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06186>
- Liu-Helmersson, J., Quam, M., Wilder-Smith, A., Stenlund, H., Ebi, K., Massad, E., y Rocklöv, J. (2016). Climate change and *Aedes* vectors: 21st century projections for dengue transmission in Europe. *eBioMedicine*, 7, 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2016.03.046>
- Liu-Helmersson, J., Stenlund, H., Wilder-Smith, A., y Rocklöv, J. (2014). Vectorial capacity of *Aedes aegypti*: Effects of temperature and implications for global dengue epidemic potential. *PLOS ONE*, 9(3), e89783. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089783>
- Magrin, G., Marengo, J., Boulanger, J. P., Buckeridge, M., Castellanos, E., Poveda, G., y Villamizar, A. (2014). *Central and South America*. In *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability* (pp. 1499–1566). Cambridge University Press.
- Marengo, J. A., Costa, M. C., Cunha, A. P., Espinoza, J.-C., Jimenez, J. C., Libonati, R., Miranda, V., Trigo, I. F., Sierra, J. P., Geirinhas, J. L., Ramos, A. M., Skansi, M., Molina-Carpio, J., y Salinas, R. (2025). Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. *Frontiers in Climate*, 7, Article 1529082. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1529082>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). (2021). *Determinación de la cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, año 2020*. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS). (2025). Datos abiertos de enfermedades. <https://datosabiertos.mspas.gob.gt/>
- Mordecai, E. A., Cohen, J. M., Evans, M. V., Gudapati, P., Johnson, L. R., Lippi, C. A., Miazgowiec, K., Murdock, C. C., Rohr, J. R., y Ryan, S. J. (2017). Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 11(4), e0005568. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005568>
- Morin, C. W., Comrie, A. C., y Ernst, K. C. (2013). Climate and dengue transmission: Evidence and implications. *Environmental Health Perspectives*, 121(11–12), 1264–1272. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306556>

- Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., y Herrera, E. (2022). Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(2), 150–165. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Perkins, S. E., y Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- R Core Team. (2026). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Reckien, D. (2018). What is in an index? Construction method, data metric, and weighting scheme determine the outcome of composite social vulnerability indices in New York City. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1439–1451. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1273-7>
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., y Vogt, J. V. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24), 12,500–12,512. <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>
- Ryan, S. J., Carlson, C. J., Mordecai, E. A., y Johnson, L. R. (2019). Global expansion and redistribution of Aedes-borne virus transmission risk with climate change. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 13(3), e0007213. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007213>
- Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: An introduction with R* (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>
- World Health Organization. (2018). *COP24 special report: Health and climate change*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/cop24-special-report-health-climate-change>
- Zúñiga, S. P., Castillo, L. C., Gonzalez, N., Araque, J., Hernández, F., Ramos, J., Nuñez, N., Vasquez, F., Barrientos, A., Bolaños, E. J. A., Santos, E., Motta, M. L., Ambikan, A., & Neogi, U. (2025). Temporal trends and public health implications of dengue in Guatemala: A decade of challenges and emerging threats (2013–2024). *IJID Regions*, 15, 100667. <https://doi.org/10.1016/j.ijregi.2025.100667>