



Análisis espacio-temporal del dengue en Bolivia: factores climáticos, ambientales y sociodemográficos

Spatio-temporal analysis of dengue fever in Bolivia: climatic, environmental and sociodemographic factors

Maritza Cabrera^{1,a}, José Naranjo-Torres^{2,b}, Julio San-Martín-Órdenes^{3,c}, Christian Segovia^{4,d}, Gerardo Fernández^{5,e}

Resumen

El dengue es un arbovirus global. En América, su incidencia ha aumentado de manera significativa en los últimos años, impulsada por el cambio climático y la movilidad humana. Bolivia registró su mayor incidencia acumulada a principios de 2023, lo que representa un importante problema de salud pública. **Objetivo:** Analizar la incidencia del dengue en Bolivia (2014-2023) desde una perspectiva espacio-temporal, identificando los factores climáticos, ambientales y sociodemográficos asociados a la transmisión y a la expansión del vector *Aedes aegypti*. **Métodos:** Se realizó un estudio observacional longitudinal con datos departamentales. Se calculó la Incidencia Estándar Anual (ISA). Las variables climáticas y ambientales incluyeron NDVI, temperatura máxima y precipitación. Se aplicaron Modelos Aditivos Generalizados (GAM) para capturar asociaciones no lineales y para interpretar las estructuras espacio-temporales. **Resultados:** Las ISA más altas se concentraron en los departamentos orientales: Pando, Beni, Tarija y Santa Cruz. Los brotes críticos (2015, 2016, 2020 y 2023) coincidieron con la temporada de lluvias. El NDVI mostró la correlación más fuerte con la incidencia. El modelo GAM óptimo explicó el 67,8% de la varianza. La incidencia se estabilizó a los 20 mm de lluvia y descendió con temperaturas inferiores 20 °C. **Conclusión:** La transmisión del dengue en Bolivia está impulsada principalmente por factores climáticos y ambientales, con riesgos emergentes asociados a la movilidad de población extranjera y al almacenamiento de agua de lluvia. Los hallazgos respaldan la integración de modelos eco-epidemiológicos bajo un enfoque enfoque One Health para un control transfronterizo más efectivo.

Palabras claves: *Aedes aegypti*, Arbovirus, Cambio climático, Epidemiología del dengue.

Abstract

Dengue is a prevalent arbovirus globally, with incidence rising sharply in the Americas due to climate change and increased human mobility. Bolivia recorded its highest cumulative incidence in early 2023, signaling a severe public health crisis. **Objective:** To analyze dengue cases in Bolivia (2014-2023) from a spatio-temporal perspective, identifying the climatic, environmental, and sociodemographic factors associated with transmission and the expansion of *Aedes aegypti* vector. **Methods:** A longitudinal observational study was conducted using departmental data. Annual Standardized Incidence (ASI) was calculated. Climatic and environmental variables included NDVI, maximum temperature, and precipitation. Generalized Additive Models (GAM) were applied to interpret spatio-temporal structures. **Results:** The highest ASI values were concentrated in the eastern departments: Pando, Beni, Tarija, and Santa Cruz. Major outbreaks (2015, 2016, 2020, and 2023) coincided with the rainy season. NDVI showed the strongest correlation with incidence. The optimal GAM explained 67.8% of the variance. Incidence stabilized after 20 mm of rain and decreased below 20 °C. **Conclusion:** Dengue transmission in Bolivia is driven by climatic and environmental factors, primarily affecting the eastern regions. Foreign mobility and rainwater collection tanks are emerging risks. The study supports integrating eco-epidemiological models under a One Health approach for effective cross-border control.

Keywords: *Aedes aegypti*, Arbovirus, climate change, Dengue epidemiology.

Recibido el
16 de agosto de 2025
Aceptado
20 de diciembre de 2025

¹Centro de Investigaciones de Estudios Avanzados del Maule (CIEAM)
<https://orcid.org/0000-0001-7279-9921>,
mcabrera@ucm.cl

²Academic and ML Consulting Dpt., Global Consulting H&G, U.S.A.;
<https://orcid.org/0000-0002-3653-9601>
josenaranjotorres@gmail.com

³Programa de Doctorado en Salud Ecosistémica, Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Maule (CIEAM), Universidad Católica del Maule (UCM), Talca, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-3717-7881>
julio.sanmartin@alumnos.ucm.cl

⁴Laboratorio de Microbiología y Parasitología, Departamento de Ciencias Preclínicas, Facultad de Medicina, Universidad Católica del Maule (UCM), Talca, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7240-9812>
christian.segovia@alumnos.ucm.cl

⁵Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ecuador.
<https://orcid.org/0000-0002-0246-0380>
gfernandez@live.edpuniversity.edu

*Correspondencia:
José Naranjo-Torres
Correo electrónico:
josenaranjotorres@gmail.com

DOI:
<https://doi.org/10.47993/gmbv48i2.1143>

El dengue, uno de los arbovirus más prevalentes y graves del mundo, supone un riesgo para hasta el 40 % de la población mundial, con 390 millones de infecciones y 20 000 muertes al año en más de 125 países^{1,2}. En América, los casos de dengue han aumentado significativamente, con 2.8 millones de casos notificados en 2022, más del doble de las cifras registradas en 2021. La vigilancia y el seguimiento realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) mostraron que 2023 comenzó con una fuerte transmisión del dengue en América del Sur, y se espera que esta aumente en un futuro próximo debido a las condiciones climáticas favorables para la proliferación de mosquitos².

Los efectos del cambio climático, como el aumento de las precipitaciones y las temperaturas medias más elevadas, han creado las condiciones ideales para la colonización de nuevas zonas por el *Aedes aegypti*, propagando el dengue a países sudamericanos no tropicales, como Bolivia³.

Si bien el dengue es una enfermedad multifactorial, el aumento del tráfico interno y externo, impulsado por el movimiento por carretera y aéreo, las poblaciones migratorias, el comercio y el turismo, facilita el transporte de arbovirus por parte de viajeros infectados (casos importados)³, lo que posteriormente puede conducir al establecimiento de la transmisión local en nuevas áreas, lo que se ve agravado por la actividad de los vectores y la susceptibilidad de la población⁵.

Durante el primer trimestre de 2023, se registró la mayor incidencia acumulada observada hasta ahora en Bolivia, alcanzando los 264,4 casos por cada 100 000 habitantes. Además, desde 2014 han circulado varios serotipos diferentes en Bolivia⁴. Un estudio anterior⁴ destacó el papel clave del serotipo en la gravedad de la enfermedad; por ejemplo, el DENV-2 puede causar siete veces más casos de enfermedad grave en comparación con otros serotipos, debido a su mayor patogenicidad y replicación más rápida. Además, se ha demostrado que la especie *Aedes aegypti* se ha adaptado con éxito a altitudes superiores a los 2200 m, colonizando, por ejemplo, el departamento boliviano de Cochabamba⁶.

En consecuencia, las enfermedades transmisibles suelen traspasar fronteras, lo que requiere una atención especial^{4,5}. El enfoque en la crisis sanitaria del dengue en América del Sur, dada la actual aparición del dengue en zonas anteriormente no afectadas, podría dar lugar al desarrollo de una posible vía de transmisión terrestre transfronteriza, que afectaría a países geográficamente conectados, como Chile, Bolivia y Perú. En este nuevo escenario, será necesaria la colaboración urgente de organismos nacionales e internacionales para abordar el problema de salud pública.

Este estudio tiene como objetivo analizar los casos de dengue en Bolivia desde una perspectiva estadística espacio-temporal. Se tendrán en cuenta los factores climáticos, ambientales y sociodemográficos implicados mediante la realización de un análisis estadístico exploratorio y la aplicación de modelos aditivos generalizados (GAM), junto con un análisis etiológico. El objetivo es identificar los factores que contribuyen a comprender la aparición inesperada del *Aedes aegypti*. Para ello, el estudio utilizará datos anuales de incidencia del dengue agregados por provincia en Bolivia durante el periodo 2014-2023.

Aunque estudios recientes en América Latina han investigado la influencia del clima en el dengue, la mayoría de ellos son descriptivos y se centran en regiones limitadas o periodos de tiempo específicos. Por ejemplo, los estudios realizados en Perú enfatizan el papel de El Niño, sin aplicar modelos espacio-temporales capaces de captar dinámicas no lineales³. Esta laguna pone de relieve la escasez de estudios que integren variables climáticas, ambientales y demográficas en un marco unificado para explicar la incidencia del dengue en contextos ecológicos heterogéneos. Nuestro estudio aborda esta necesidad utilizando modelos aditivos generalizados (GAM), que permiten modelar relaciones flexibles y no lineales, lo que ofrece una comprensión más sólida de la dinámica del dengue en Bolivia.

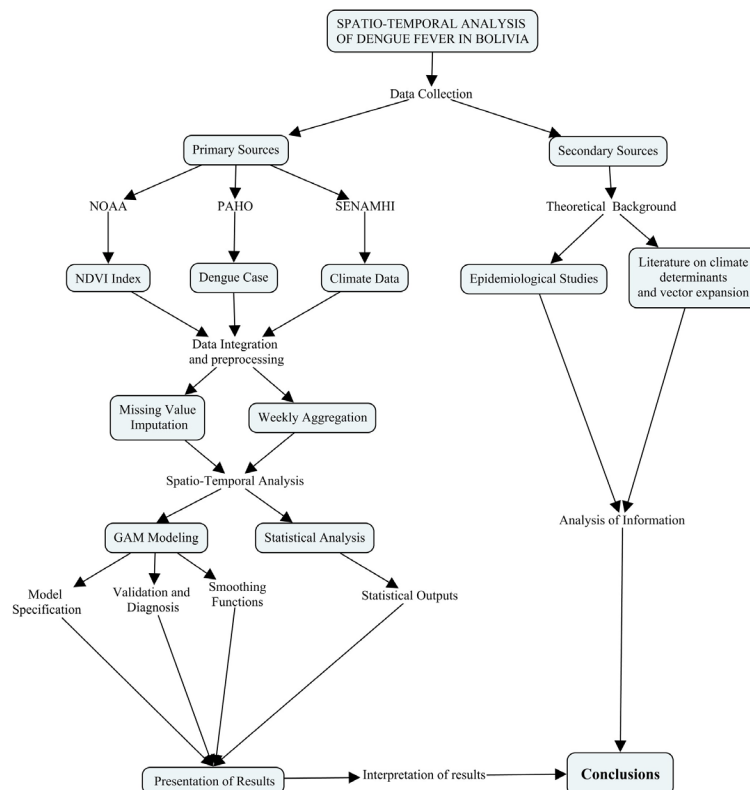


Figure 1. Flowchart created with CmapTools of the methodological process for the spatio-temporal analysis of dengue in Bolivia. It describes the primary and secondary data sources, the integration and preprocessing steps, and the analytical methods applied.

Material y métodos

El diseño del estudio es observacional longitudinal y utiliza modelos estadísticos con un enfoque exploratorio, con el objetivo de identificar patrones espacio-temporales en la incidencia del dengue en Bolivia entre 2014 y 2023. Este estudio quedó exento de revisión y aprobación ética, ya que no se realizó con animales ni seres humanos, sino que se basó en la integración de datos disponibles públicamente procedentes de fuentes oficiales. Bolivia^{7,8}, con una superficie de 1 098 581 km², se encuentra en el centro de América del Sur. Limita con cinco países y está dividida administrativamente en nueve departamentos.

El proceso metodológico, tal y como se ilustra en la **figura 1**, se estructura en cinco fases que permiten la reproducibilidad del estudio.

Primera fase: recopilación de datos:

Recopilamos datos de fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias fueron:

Datos epidemiológicos y demográficos: Los datos epidemiológicos sobre los casos de dengue en Bolivia se obtuvieron de los informes semanales de la Organización Panamericana de la Salud (OPS)⁹ y se agregaron desde enero de 2014 hasta septiembre de 2023. Los datos sobre la población de Bolivia se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística (INE) de Bolivia¹⁰.

Datos meteorológicos y datos ambientales: Los datos climáticos de Bolivia fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)¹¹. Se seleccionaron la temperatura máxima y las precipitaciones como variables clave, debido a su relación demostrada con el dengue¹². Los valores del índice de anomalía de la temperatura superficial del mar (SST) de El Niño 3,4 se obtuvieron de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)¹³.

El valor de la anomalía del NDVI se obtuvo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y de la NOAA. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se utiliza para la distribución de datos ambientales, el índice NDVI. Es un indicador para evaluar la vegetación que indica la densidad y la salud de la misma.

Segunda fase: integración y preprocesamiento de datos

Todos los conjuntos de datos se sincronizaron en cada departamento y se agregaron semanalmente. Los valores faltantes se imputaron utilizando una estrategia de interpolación de valores anteriores, repitiendo el último valor disponible o añadiéndolo

Table 1. Summary of the variables used in Spatio-Temporal Analysis in this study.

| Variable | Type | Unit of Measurement | Variable type in the model | Observation |
|------------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| Standard Incidence of dengue | Quantitative | #Cases/100,000 inhabitants | Dependent | Dengue cases over time and space Impacts vector |
| Mean temperature | Quantitative | °C | Independent | reproduction and survival |
| Total precipitation | Quantitative | mm | Independent | Affects reproduction site availability for the mosquito |
| NDVI | Quantitative | Index (-1 to +1) | Independent | Vegetation cover, important to the vector's habitat |
| Population density | Quantitative | Inhabitants/km ² | Independent | Influence exposure and transmission |
| SST | Quantitative | Index (-4 to +4) | Independent | Correlation with changes in atmospheric circulation and weather patterns |
| Department | Categorical | Spatial | Geographic | Administrative division departmental |
| Year/Month | Categorical | Year/Month | Adjustment | Supports modeling of seasonal and temporal effects |

al período anterior en caso de interrupciones. Se calculó la incidencia anual estandarizada (ASI) por cada 100 000 habitantes para cada departamento utilizando:

La **tabla 1** presenta un resumen de las variables que se incorporarán al análisis espacio-temporal de la incidencia del dengue en Bolivia. La tabla clasifica cada variable según su función dentro del marco GAM, su naturaleza y la justificación de su inclusión. Se seleccionaron variables climáticas, como la precipitación y la temperatura máxima, por su influencia demostrada en la reproducción de los mosquitos y la transmisión viral. Se incluyó el NDVI como indicador de la cobertura vegetal y la idoneidad ecológica de los hábitats. Se incorporó el índice ENSO 3.4 SST para captar la variabilidad climática a gran escala que afecta a los patrones regionales. Por último, se integraron indicadores demográficos, como la población total por departamento, para estandarizar las tasas de incidencia y reflejar la exposición de la población.

Tercera fase: análisis espacio-temporal

Aplicamos un modelo aditivo generalizado (GAM)¹⁷, que amplía los modelos lineales generalizados sustituyendo los predictores lineales por la suma de funciones suavizadas de las variables, captando las relaciones no lineales entre la incidencia del dengue y los predictores climáticos/ambientales. El proceso de modelización incorporó:

- Especificación del modelo utilizando splines cúbicos suavizados.
- Estimación mediante máxima verosimilitud restringida (REML) y verosimilitud marginal.
- Validación y diagnóstico, incluyendo análisis residual, desviación explicada y criterios penalizados utilizando puntuaciones de validación cruzada generalizada (GCV) y criterio de información de Akaike (AIC) para un rendimiento óptimo.

Resultados estadísticos y Los modelos se implementaron en R (v4.3.3)¹⁸ utilizando los paquetes *mgcv*¹⁷ y *MASS*¹⁹. Los gráficos de los resultados también se crearon utilizando el lenguaje R y el paquete *ggplot2*²⁰.

Cuarta fase: interpretación de los resultados.

Se realizó una interpretación epidemiológica de los resultados, identificando áreas críticas, períodos de alta transmisión y la posible asociación de la variación interanual de la incidencia con fenómenos climáticos.

Quinta fase: conclusiones.

Consistió en debatir los resultados para generar conclusiones y recomendaciones de salud pública, centrándose en la vigilancia epidemiológica y las estrategias de control de vectores.

Resultados

Los resultados del análisis espacio-temporal exploratorio se muestran en la **figura 2**. Los resultados identificaron valores más altos de ASI en Pando, Beni, Tarija y Santa Cruz, mientras que Oruro y Potosí registraron las tasas de incidencia más bajas. Los años más críticos fueron 2015, 2016, 2020 y 2023, con una tasa máxima de incidencia de 30,2 por cada 10 000 habitantes en 2023 en Tarija, con altos valores de incidencia de dengue durante las primeras 20 semanas en todos los departamentos. Se observó un aumento de los valores de ASI a partir de la semana 40, especialmente en Beni, Pando y Cochabamba, lo que indica una variación estacional asociada a factores climáticos.

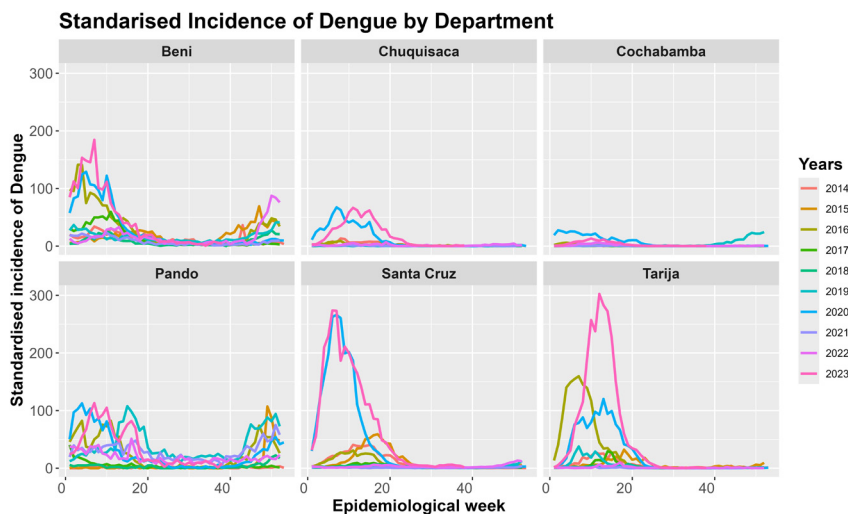


Figure 2. Departmental ASI of dengue in Bolivia, aggregated from 2014 to 2023 showing an increase in dengue cases from week 40 onwards with interannual fluctuations in 2016, 2020 and 2023, indicating seasonal variations related to climate.

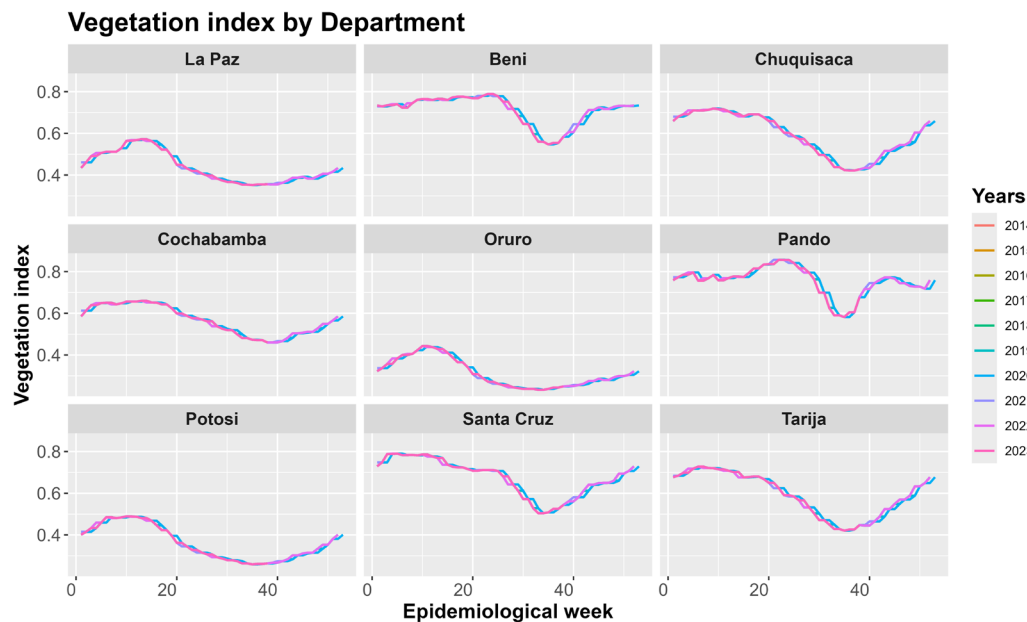


Figure 3. Highlights the weekly patterns of NDVI in the Bolivian departments. All years show a seasonal trend with a decrease around week 20 and an increase around week 40. The departments with the lowest NDVI levels have the lowest dengue incidence rates

Los resultados también detectaron una oscilación interanual en la incidencia del dengue durante 2016, 2020 y 2023. Las causas subyacentes de este fenómeno podrían estar relacionadas con el impacto de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO)^{6,21}.

Como se puede observar, los brotes de dengue en Bolivia tienden a coincidir con la temporada de lluvias, que generalmente se extiende desde la semana 40 de un año hasta la semana 20 del año siguiente. Según los datos reportados por el SENAMHI, las temperaturas máximas durante este período oscilaron entre 20,0 °C y 35,0 °C en Beni, La Paz, Pando y Santa Cruz, condiciones que favorecen la proliferación del *Aedes aegypti*.

La **figura 3** muestra los patrones departamentales del NDVI agregado semanalmente durante el período estudiado. Se observó una tendencia estacional para todos los años, con una caída en el nivel alrededor de la semana 20 y un aumento alrededor de la semana 40, siguiendo un patrón similar durante las primeras semanas del año siguiente. La Paz, Oruro y Potosí mostraron los niveles más bajos de NDVI. Es precisamente en estos departamentos donde las tasas de incidencia del dengue son más bajas.

Entre 2014 y 2023, la incidencia del dengue mostró las correlaciones más fuertes con el NDVI, la temperatura máxima y las precipitaciones, mientras que el índice Niño 3.4 solo mostró una asociación débil. Los análisis centrados en años críticos 2016, 2020 y 2023 confirmaron estas tendencias, y el NDVI obtuvo sistemáticamente los coeficientes de correlación más altos. La dinámica de las precipitaciones, potencialmente influenciada por los fenómenos de El Niño, puede contribuir al aumento de la incidencia del dengue en la región.

Se implementaron y evaluaron cuatro modelos GAM representativos con fines comparativos. La **tabla 2** resume comparativamente los coeficientes y las estadísticas de bondad de ajuste (R cuadrado, desviación explicada, UBRE y AIC) de los cuatro modelos. Esta comparación nos permite evaluar qué especificación captura mejor la variabilidad espacio-temporal de la incidencia del dengue. El modelo 4 se perfila como el modelo óptimo, ya que explica el 67,8 % de la varianza y presenta los valores más bajos de AIC y UBRE, lo que representa los mejores datos y, en consecuencia, su rendimiento predictivo óptimo.

Los patrones espaciales revelados por el Modelo 4 indican que Oruro y Potosí presentan las tendencias de incidencia más bajas, mientras que departamentos como Pando, Beni, Chuquisaca, Cochabamba, Tarija y Santa Cruz muestran tendencias moderadas. Del mismo modo, las precipitaciones y las temperaturas máximas fueron de interés, respaldadas por el NDVI y Niño 3,4, que suavizan eficazmente estos valores. Estos resultados se ilustran en la **Figura 4**, que muestra las funciones suavizadas del Modelo 4. La figura demuestra la relación no lineal entre las precipitaciones y la incidencia del dengue, lo que confirma que la incidencia se estabiliza después de aproximadamente 20 mm de lluvia, un umbral coherente con la resistencia biológica de los huevos del *Aedes aegypti* y su capacidad de transmisión vertical.

En relación con la temperatura máxima, se observa que la incidencia del dengue disminuye por debajo de los 20 °C, mientras que este patrón contrario a la intuición es coherente con efectos similares de la temperatura observados en otras partes del mundo. Además, los valores más altos del NDVI se correlacionan linealmente con la incidencia del dengue, lo que lo convierte en un indicador que podría ser útil y que debería evaluarse para otras ubicaciones geográficas. Por último, en el caso de El Niño 3.4, las temperaturas entre 26 y 29 °C aumentan la incidencia de casos de dengue, pero las temperaturas superiores a 29 °C la disminuyen. Es probable que esto se deba a la influencia de El Niño en las precipitaciones.

Table 1. GAM models performed to assess whether climate variables and the NDVI index explain the incidence of dengue in Bolivia during the period January 2014 to September 2023.

| Variable | Model 1 | | Model 2 | | Model 3 | | Model 4 | | |
|--------------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|---------|
| | Coeffic | p-value | Coeffic | p-value | Coeffic | p-value | Coeffic | p-value | |
| Intercept | 1.147 | <2e-16 | 1.147 | <2e-16 | 0.7079 | 2e-12 | 0.689 | 6.5e-6 | |
| Departamento | Oruro | -1.742 | 4.5e-10 | -1.742 | 4.5e-10 | -1.659 | 1.3e-8 | -1.585 | 9.8e-8 |
| | Potosí | -3.882 | 2.7e-13 | -3.882 | 2.7e-13 | -3.806 | 1.2e-12 | -3.716 | 5.3e-12 |
| | Pando | -1.274 | <2e-16 | -1.274 | <2e-16 | -0.695 | 1.7e-5 | -0.697 | 2e-5 |
| | Beni | -0.853 | 1.5e-9 | -0.853 | 1.5e-9 | -0.511 | 0.001 | -0.614 | 9.8e-5 |
| | Chuquisaca | -0.712 | 1.3e-11 | -0.712 | 1.3e-11 | -0.713 | 1.3e-8 | -0.710 | 9.8e-8 |
| | Cochabamba | -0.559 | 3e-6 | -0.559 | 3e-6 | -0.311 | 0.025 | -0.237 | 0.101 |
| | Santa Cruz | -0.981 | <2e-16 | -0.981 | <2e-16 | -0.644 | 3.9e-7 | -0.609 | 3.3e-6 |
| | Tarija | 0.162 | 0.108 | 0.162 | 0.108 | 0.132 | 0.273 | 0.138 | 0.284 |
| | Smooth terms | p-value | Smooth terms | p-value | Smooth terms | p-value | Smooth terms | p-value | |
| Precipitation | 1.930 | <2e-16 | 1.930 | <2e-16 | 3.918 | <2e-16 | 4.170 | <2e-16 | |
| Max Temperature | 1.722 | <2e-16 | 1.722 | <2e-16 | 3.971 | <2e-16 | 5.853 | <2e-16 | |
| NDVI | 1.000 | <2e-16 | 1.000 | <2e-16 | 3.979 | <2e-16 | 5.861 | <2e-16 | |
| Niño 3.4 | 1.865 | <2e-16 | 1.865 | <2e-16 | 3.747 | <2e-16 | 5.732 | <2e-16 | |
| General indicators | | | | | | | | | |
| R-square (adj) | 0.149 | | 0.149 | | 0.23 | | 0.251 | | |
| Deviance explained | 64.8% | | 64.8% | | 66.6% | | 67.8% | | |
| UBRE | 0.1722 | | 0.1722 | | 0.1167 | | 0.0778 | | |
| AIC | 19102.24 | | 19102.24 | | 18849.9 | | 18671.9 | | |

Discusión

La aplicación de modelos aditivos generalizados (GAM) junto con el NDVI y el índice El Niño 3,4 SST resultó eficaz para identificar las variables climáticas y ambientales asociadas con la transmisión del dengue en Bolivia.

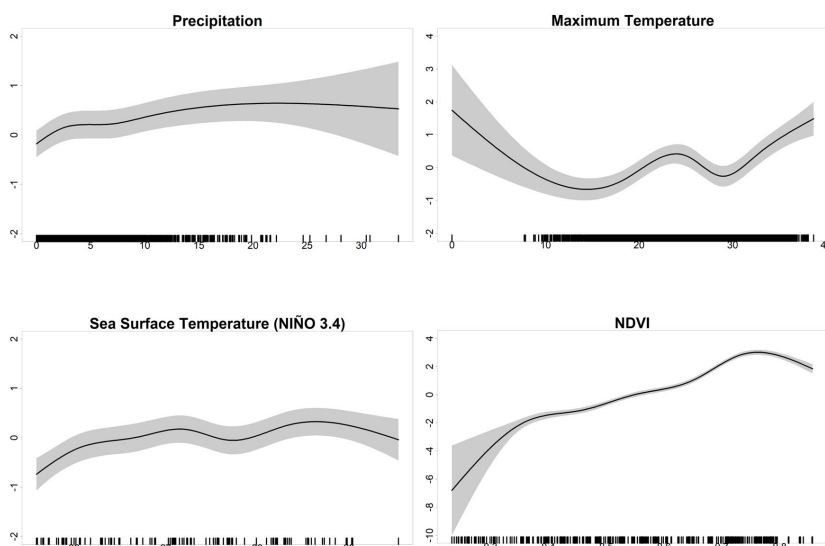


Figure 4. Estimated smooth functions from GAM optimal model (model 4), using epidemiological data for dengue fever in Bolivia from 2014 to 2023, showing that the incidence of dengue cases is correlated with rainfall per epidemiological week

Sin embargo, el poder explicativo de estos modelos no fue absoluto, lo que subraya que la incidencia del dengue no puede explicarse completamente solo por variables climáticas, ambientales o sociodemográficas. Otros factores determinantes, como el comportamiento humano, la densidad de población, los flujos migratorios, las deficiencias en los servicios públicos y la distribución ecológica de las especies de mosquitos, siguen sin tenerse en cuenta en gran medida y deberían incorporarse en futuros análisis^{4,21}.

El presente estudio muestra que la incidencia del dengue en Bolivia es mayor en las zonas orientales, lo que podría extenderse al oeste y al sur del país. La enfermedad afecta principalmente a jóvenes vulnerables de entre 10 y 39 años, según estudios realizados en otras partes del mundo²². La situación sanitaria en Bolivia también podría empeorar en el futuro, debido a la precariedad del sistema de salud boliviano. Aunque el dengue no es una enfermedad nueva en la parte sur del continente (en particular en Chile y Bolivia), la información sobre salud pública solo se difunde en muy pocos medios de comunicación, limitándose en gran medida a publicaciones dirigidas a turistas, y también hay pocos estudios epidemiológicos sobre el tema.

El estudio también demuestra que la tendencia espacial y temporal del dengue está relacionada con factores climáticos, ambientales y sociodemográficos a nivel regional, lo que confirma el impacto futuro del cambio climático en la proliferación del dengue y otros *arbovirus*, impulsado por los cambios sociodemográficos y ecológicos futuros. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos realizados por otros autores^{3,12,23}.

Un estudio en Argentina reportó una fuerte relación entre las variables climáticas y la dinámica del dengue¹². En Perú, estudios recientes han señalado la importancia de la movilidad de la población y la densidad urbana como factores de riesgo³, que han identificado de manera similar la variabilidad climática, los patrones de uso del suelo y la dinámica de la población como factores clave en la expansión e intensificación de la transmisión del dengue.

El aumento de la movilidad de los extranjeros y la proliferación de tanques de agua de lluvia pueden facilitar la transmisión del dengue en zonas que antes estaban libres del *Aedes aegypti*. La abundancia de mosquitos se correlaciona con los criaderos temporales que aumentan durante la temporada de lluvias. Los huevos del *Aedes aegypti* pueden sobrevivir en seco entre 12 y 15 meses y eclosionar con las lluvias. Si estos huevos están infectados por transmisión vertical, las nuevas larvas pueden transmitir el virus a los seres humanos inmediatamente después de la eclosión, lo que da lugar a una mayor incidencia del dengue después de las lluvias intensas, especialmente en las zonas fronterizas densamente pobladas²³.

De manera similar, aunque se incorporó la variable demográfica de la población total por departamento para el cálculo del ASI, este estudio tiene limitaciones debido a la falta de datos sociodemográficos abiertos, homogéneos y desglosados en Bolivia (por ejemplo, densidad de población, niveles de pobreza, movilidad, etc.). Esto limita la evaluación precisa del papel de los determinantes sociales en la transmisión del dengue, a pesar de utilizar la población total para la incidencia. Se recomienda que los estudios futuros integren fuentes adicionales (encuestas, registros detallados) para fortalecer los modelos eco-epidemiológicos y mejorar la predicción.

Este estudio también destaca la necesidad de realizar estudios futuros que examinen la redistribución de la población de mosquitos en Bolivia, en particular en las zonas aún no invadidas, situadas principalmente en la frontera con Chile, y la necesidad de realizar estudios ecológicos y epidemiológicos que abarquen diversas etapas de la enfermedad y en diferentes entornos. Además, los modelos ecoepidemiológicos deberían incorporarse a las respuestas de salud pública, con una perspectiva “Una sola salud” en contextos transfronterizos^{4,5}.

Aunque nuestros resultados ofrecen información importante, es necesario abordarlos con cautela debido a los posibles sesgos y errores en la metodología. En primer lugar, existe un posible sesgo de selección derivado de la heterogeneidad de la capacidad de vigilancia epidemiológica entre los distintos departamentos, ya que dicha capacidad varía según la zona geográfica. En segundo lugar, es posible que exista un sesgo de medición debido a la heterogeneidad en la distribución espacial de las estaciones meteorológicas, que pueden no reflejar plenamente la variabilidad climática local. En tercer lugar, podrían producirse errores sistemáticos debido al infraregistro o la clasificación errónea de los casos de dengue en los registros oficiales, un problema muy extendido en las regiones endémicas. Por último, el uso de datos departamentales agregados puede ocultar la heterogeneidad intradepartamental, lo que limita la precisión de las inferencias espaciales.

Conclusiones

Este estudio confirma la importancia de las variables climáticas y ambientales en la salud de la población en relación con el dengue. Es probable que sea aplicable a otras enfermedades transmitidas por el *Aedes aegypti*²⁴, como el *chikungunya*^{24,25}, el Mayaro y la fiebre amarilla²⁶.

A medida que la incidencia mundial de estas enfermedades aumenta con el cambio climático y el incremento de la migración, la incorporación urgente de estudios epidemiológicos sobre enfermedades transmitidas por vectores en contextos de salud pública se vuelve cada vez más crítica^{2,5,6,27}. Por lo tanto, un sistema de monitoreo mucho más confiable, con registros exhaustivos a escala espacial y temporal, proporcionaría las respuestas eficaces cada vez más necesarias en la lucha contra las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores.

En consonancia con los modelos ecoepidemiológicos y el marco “Una sola salud”, dichos sistemas deben integrar variables climáticas (precipitaciones, temperatura), indicadores ambientales (*NDVI*) y oscilaciones climáticas a gran escala (*ENSO 3.4*

SST), ya que estos determinantes se han relacionado teórica y empíricamente con la dinámica de transmisión del dengue en América Latina^{5,28}. Estudios comparativos en Argentina y Brasil han demostrado que los umbrales de precipitación y temperatura son factores críticos de las epidemias²⁹, mientras que revisiones sistemáticas en Perú destacan el papel de la variabilidad climática y los fenómenos de El Niño en la expansión de las zonas de riesgo³.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que revelar.

Financiación: No se declara ninguna financiación para este artículo.

Contribuciones de los autores: Maritza Cabrera: Conceptualización, investigación, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición, supervisión; José Naranjo-Torres: investigación, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición, supervisión; Julio San-Martín-Órdenes: investigación, metodología, redacción del borrador original, revisión, Christian Segovia: redacción del borrador original; Gerardo Fernández: investigación, redacción del borrador original, revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Disponibilidad de los datos: Los conjuntos de datos analizados en este estudio son públicos y de acceso abierto, y están disponibles en sus respectivos repositorios, que se citan en el texto del manuscrito y se enlazan en sus respectivas referencias.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial: La idea principal, la investigación y la redacción de este manuscrito son totalmente generadas por humanos, y cualquier uso de la IA se limitó a un apoyo editorial no sustantivo, como la corrección gramatical.

Bibliographic references

1. Soni S, Gill VJS, Singh J, Chhabra J, Gill GJS, et al. Dengue, chikungunya, and Zika: the causes and threats of emerging and re-emerging arboviral diseases. *Cureus*. 2023;15(7):e41717. doi: 10.7759/cureus.41717
2. World Health Organization. Dengue and severe dengue [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2024 Nov 1]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
3. Herrera Serrano GE, Mogrovejo Palacios DR, Ruilova Córdova DT, Jiménez Abad ME, Carrión Martínez PF. Efecto de los factores climáticos en la propagación del dengue, zika y chikunguña, transmitidas por el mosquito *Aedes* spp. en Sudamérica: una revisión sistemática. *Cienc Lat Rev Científica Multidiscip*. 2025;9(1):4972-5018. doi: 10.37811/cl_rcm.v9i1.16197
4. Mollinedo-Pérez JS, Mollinedo ZA, Girona WJ, Mollinedo RE. Traveller's dengue: tropical diseases outside the tropics in Bolivia. *Adv Med Eng Interdiscip Res*. 2023;1(3):1266. doi: 10.32629/ameir.v1i3.1266
5. Cabrera M, Leake J, Naranjo-Torres J, Valero N, Cabrera JC, Rodríguez-Morales AJ. Dengue prediction in Latin America using machine learning and the One Health perspective: a literature review. *Trop Med Infect Dis*. 2022;7(10):322. doi: 10.3390/tropicalmed7100322
6. World Health Organization. Geographical expansion of cases of dengue and chikungunya beyond the historical areas of transmission in the Region of the Americas [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2024 Nov 1]. Available from: <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON448>
7. Central Intelligence Agency. The World Factbook. Bolivia [Internet]. Washington (DC): CIA; 2024 [cited 2024 Dec 1]. Available from: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/bolivia/>
8. Bolivia. Wikipedia [Internet]. 2025 [cited 2025 Oct 4]. Available from: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bolivia&oldid=1314000032>
9. Gutiérrez LA. PAHO/WHO data - Bolivia - Dengue cases [Internet]. Washington (DC): PAHO/WHO; 2024 [cited 2024 Nov 3]. Available from: <https://www3.paho.org/data/index.php/en/mnu-topics/indicadores-dengue-en/dengue-subnacional-en/540-bol-dengue-casos-en.html>
10. Instituto Nacional de Estadística. Censos y banco de datos [Internet]. La Paz: INE; 2024 [cited 2024 Dec 3]. Available from: <https://www.ine.gov.bo/index.php/censos-y-banco-de-datos/>
11. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Inicio [Internet]. La Paz: SENAMHI; 2024 [cited 2024 Dec 25]. Available from: <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
12. López MS, Gómez AA, Müller GV, Walker E, Robert MA, Estallo EL. Relationship between climate variables and dengue incidence in Argentina. *Environ Health Perspect*. 2023;131(5):057001. doi: 10.1289/EHP11616
13. National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Prediction Center - Monitoring & data: current monthly atmospheric and sea surface temperatures index values [Internet]. College Park (MD): NOAA; [cited 2023 Dec 9]. Available from: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>
14. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO GIEWS earth observation: Bolivia (Plurinational State of) [Internet]. Rome: FAO; 2024 [cited 2024 Dec 7]. Available from: <https://www.fao.org/giews/earthobservation/country/index.jsp?lang=en&type=21&code=BOL>
15. Earth Science Data Systems. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [Internet]. Greenbelt (MD): NASA; 2024 [cited 2025 Sep 14]. Available from: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi>
16. Alwateer M, Atlam ES, El-Raouf MMA, Ghoneim OA, Gad I. Missing data imputation: a comprehensive review. *J Comput Commun*. 2024;12(11):53-75. doi: 10.4236/jcc.2024.1211004
17. Wood S. mgcv: mixed GAM computation vehicle with automatic smoothness estimation [Internet]. Vienna: R Foundation; 2025 [cited 2025 Sep 14]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/index.html>
18. R Core Team. R: a language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2023. Available from: <https://www.r-project.org/>
19. Ripley B, Venables B, Bates DM, et al. MASS: support functions and datasets for Venables and Ripley's MASS [Internet]. Vienna: R Foundation; 2025 [cited 2025 Sep 14]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/MASS/index.html>
20. Wickham H. ggplot2: elegant graphics for data analysis [Internet]. New York: Springer-Verlag; 2016 [cited 2025 Oct 7]. Available from: <https://ggplot2.tidyverse.org/>
21. Cabrera M, Muñoz-Quezada MT, Antini C, Díaz M. A cross-sectional study on the quality of life and psychosocial risk of migrant workers. *Medwave*. 2023;23(03):e2640. doi: 10.5867/medwave.2023.03.2640
22. Mancilla-Vino D, Santalla-Vargas J, Mamani-Huanca L. Vigilancia virológica de

- casos de dengue de enero 2020 a febrero 2023, en el Departamento de La Paz-Bolivia. *Rev CON-Cienc.* 2023;11(1):29-43. doi: 10.53287/yvrj5971db60i
23. Fu Y, Chen F, Chen X. Population dynamics and seasonal distribution of mosquitoes. *J Mosq Res.* 2024;14:42. Available from: <http://emtoscupublisher.com/index.php/jmr/article/view/3824>
24. Pezzi L, Diallo M, Rosa-Freitas MG, Vega-Rua A, Ng LFP, Boyer S, et al. GloPID-R report on chikungunya, o'nyong-nyong and Mayaro virus, part 5: entomological aspects. *Antiviral Res.* 2020;174:104670. doi: 10.1016/j.antiviral.2019.104670
25. Silva-Ramos CR, Mejorano-Fonseca JA, Hidalgo M, Rodríguez-Morales AJ, Faccini-Martínez AA. Clinical, epidemiological, and laboratory features of Mayaro virus infection: a systematic review. *Curr Trop Med Rep.* 2023;10(4):309-19. doi: 10.1007/s40475-023-00308-6
26. Rodríguez-Morales AJ, Bonilla-Aldana DK, Suárez JA, Franco-Paredes C, Forero-Peña DA, Mattar S, et al. Yellow fever reemergence in Venezuela - implications for international travelers and Latin American countries during the COVID-19 pandemic. *Travel Med Infect Dis.* 2021;44:102192. doi: 10.1016/j.tmaid.2021.102192
27. World Health Organization. Dengue - global situation [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2024 Nov 1]. Available from: <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON498>
28. Barkhad A, Lecours N, Stevens-Uninsky M, Mbuagbaw L. The ecological, biological, and social determinants of dengue epidemiology in Latin America and the Caribbean: a scoping review of the literature. *EcoHealth.* 2025;22(2):203-21. doi: 10.1007/s10393-025-01706-0
29. López MS, Lovino MA, Gómez AA, Rodríguez ST, Radosevich AL, Müller GV, et al. Climate extremes, average conditions and temperature variability as drivers of dengue epidemics in a temperate city of Argentina. *J Clim Change Health.* 2025;22:100426. doi: 10.1016/j.jocl.2025.100426