

Evaluación cuantitativa de riesgos biofísicos de sequías e inundaciones en Guatemala. Un análisis geoespacial de la paradoja hídrica basado en índices de aridez y humedad (1970-2023)

Quantitative assessment of biophysical risks of droughts and floods in Guatemala. A geospatial analysis of the water paradox based on aridity and humidity indices (1970-2023)

Wener Armando Ochoa Orozco¹,

Bayron Geovany González Chavajay²,

Paris Francisco Rivera³

¹Escuela de Postgrado, Facultad de Agronomía y de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Campus Central, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala.

²Centro de Estudios Urbanos y Regionales (CEUR), Universidad de San Carlos de Guatemala. Edificio S11 tercer nivel, Campus Central, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala.

³Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemáticas y Ciencias Físicas, Universidad Mariano Gálvez. Interior Finca el Zapote, Zona 2, Guatemala.

E mail: wenerarmando8a@gmail.com

Ochoa Orozco, W.A., González Chavajay, B.G., Rivera, P.F. Evaluación cuantitativa de riesgos biofísicos de sequías e inundaciones en Guatemala (2024). Un análisis geoespacial de la paradoja hídrica basado en índices de aridez y humedad (1970-2023). *Revista Estudios Ambientales*, 12 (1), 112-127.

Recibido: 07/05/2024 - **Aceptado:** 25/06/2024— **Publicado:** 31/07/2024

RESUMEN

Este artículo explora la paradoja hídrica en Guatemala, caracterizada por una distribución heterogénea de los riesgos de sequías e inundaciones a lo largo del país, utilizando un enfoque cuantitativo. El objetivo principal fue determinar el riesgo biofísico a sequías e inundaciones basándose en el índice de aridez y humedad, utilizando datos climáticos de 1970 a 2023 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). La metodología se centra exclusivamente en parámetros físicos como la precipitación, temperatura y la evapotranspiración, empleando las ecuaciones de Thornthwaite para clasificar los departamentos en categorías de riesgo mediante análisis geoespacial, según umbrales y cálculos basados en Hidrología y Climatología. Los resultados indican una división regional clara, con

algunos departamentos enfrentando altos riesgos de sequía mientras otros están amenazados significativamente por inundaciones. Esto ilustra la paradoja hídrica del país y subraya la necesidad de una gestión diferenciada y una respuesta de emergencia rápida. Se concluye que la evaluación de riesgos biofísicos mediante esta metodología cuantitativa permite una identificación rápida de áreas propensas a enfrentar desafíos hídricos extremos, facilitando la planificación inmediata y las respuestas de emergencia, crucial en la adaptación al cambio climático antropogénico. Este enfoque subraya la importancia de combinar la conservación de recursos con el desarrollo de infraestructura resiliente.

PALABRAS CLAVE: paradoja hídrica, evaluación de riesgos biofísicos, análisis geoespacial, cambio climático antropogénico, metodología cuantitativa.

ABSTRACT

This article explores the water paradox in Guatemala, characterized by a heterogeneous distribution of drought and flood risks throughout the country, using a quantitative approach. The main objective of this work was to determine the biophysical risk to droughts and floods drawing on the aridity and humidity index, using climate data from 1970 to 2023 from the National Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology and Hydrology (INSIVUMEH). The methodology focuses exclusively on parameters such as precipitation, temperature, and evapotranspiration, using Thornthwaite's equations to classify departments into risk categories through geospatial analysis, according to thresholds and calculations based on Physical Hydrology and Climatology. The results indicate a clear regional division, with some departments facing high risks of drought and others significantly threatened by floods. This condition illustrates the country's water paradox and underlines the need for differentiated management and rapid emergency response. It is concluded that the assessment of biophysical risks using this quantitative methodology allows for rapid identification of areas prone to facing extreme water challenges, facilitating immediate planning and emergency responses, which is crucial in adaptation to anthropogenic climate change. This approach highlights the importance of combining resource conservation with the development of resilient infrastructure.

KEYWORDS: water paradox, biophysical risk assessment, geospatial analysis, anthropogenic climate change, quantitative methodology.

INTRODUCCIÓN

Este estudio, basado en datos desde 1970 hasta 2023 del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), evalúa cuantitativamente los riesgos biofísicos de sequías e inundaciones. Emplea índices de aridez y humedad calculados a partir de la precipitación, temperatura y evapotranspiración, proporcionando un marco para clasificar y visualizar las zonas de riesgo a nivel departamental (García, 2018; Magaña et al., 1999). Este enfoque destaca la influencia de fenómenos como la sequía de medio verano o canícula, caracterizada por una disminución de la lluvia durante la estación lluviosa (Small et al., 2007).

Aunque este método permite una identificación rápida de áreas propensas a desafíos hídricos, es esencial reconocer sus limitaciones. No abarca factores como la permeabilidad del suelo o el drenaje urbano, que son cruciales para una evaluación completa del riesgo de inundaciones. Por ello, se recomienda su uso dentro de un enfoque más amplio que incluya aspectos geotécnicos y sociales (Ochoa, 2022; Pérez, 2018).

Este análisis revela una marcada división regional en los riesgos de sequía e inundación, subrayando la necesidad de una gestión diferenciada y adaptativa. El "GAR Special Report on Drought 2021" de la UNDRR y estudios de Rivera, et al. (2019) enfatizan que los impactos del cambio climático, como el aumento de las temperaturas y la alteración de los patrones de lluvia, agudizan estos riesgos, haciendo imperativo un enfoque integrado que combine la conservación de recursos con el desarrollo de infraestructura resiliente al clima.

Guatemala, situada en el istmo centroamericano, presenta una diversidad de microclimas que generan variadas condiciones hidrológicas, lo que la convierte en un área ideal para estudiar los extremos hídricos. La investigación

destaca cómo las sequías afectan la seguridad alimentaria y los servicios ecosistémicos, citando a Anderson (2018) y Rodríguez et al. (2019), mientras que las inundaciones, según Bernal (2021) y el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH] (2020), pueden provocar desastres significativos que impactan el desarrollo sostenible.

Apoyado en un marco teórico robusto que interconecta la variabilidad climática con la gestión de riesgos y la adaptación al cambio climático, este estudio utiliza datos climáticos históricos y el análisis de la Organización Meteorológica Mundial y el IPCC (2022) para afirmar que Guatemala ha visto un incremento en la frecuencia de eventos extremos. Los objetivos se centraron en analizar la climatología de la precipitación, temperatura y evapotranspiración desde 1970 a 2023, realizando un mapeo detallado de los índices de humedad y aridez para clasificar las zonas de riesgo según umbrales y cálculos basados en principios científicos establecidos en Hidrología y Climatología. Este enfoque metodológico, que combina investigación cuantitativa con modelado geoespacial, permite interpretar los riesgos asociados con sequías e inundaciones en la planificación hídrica y la adaptación climática. El análisis propone que una comprensión profunda de la climatología histórica puede informar políticas proactivas para mitigar la vulnerabilidad hídrica futura de Guatemala, estableciendo un marco efectivo para enfrentar estos desafíos ambientales.

METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este estudio se centra en un enfoque cuantitativo que analiza exclusivamente los parámetros físicos como precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Este enfoque se justifica por su capacidad para proporcionar una evaluación directa y

objetiva de los riesgos biofísicos asociados con sequías e inundaciones en Guatemala.

Obtención de datos

Se recopilaron series temporales de datos climáticos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), que abarcan desde 1970 hasta 2023. Estos datos incluyen precipitación media anual, temperatura media anual y evapotranspiración potencial media anual, registrados en treinta y ocho estaciones meteorológicas distribuidas en los 22 departamentos del país.

VARIABLES ANALIZADAS

Las variables primarias incluyen:

- Precipitación Media Anual (Pp): Calculada como el promedio total anual de precipitación durante el periodo de estudio.
- Temperatura Media Anual (T): Promedio de las temperaturas anuales a lo largo del mismo periodo.
- Evapotranspiración Potencial Media Anual (ETP): Estimada utilizando el método de Thornthwaite, representa la cantidad total de agua que se evaporaría y transpiraría en condiciones ideales de cobertura vegetal completa.

Métodologías de Análisis

Para analizar estos datos, se utilizaron dos índices principales para evaluar los riesgos:

- El Índice de humedad (Im): Calculado como $((Pp - ETP) / ETP) * 100$, este índice permite clasificar las áreas según su susceptibilidad a inundaciones, como indicativo de potencial de saturación del suelo.
- El Índice de Aridez: Este índice compara directamente la precipitación total anual con la

ETP, proporcionando una medida del riesgo de sequía.

Metodología de clasificación de riesgo por inundaciones

Este riesgo se evaluó a través del índice de humedad (Im), que compara la precipitación y la ETP. Se definieron los siguientes umbrales de Im:

- Muy Alto: Índice de humedad igual o superior al 80%.
- Alto: Índice de humedad menor que 80% pero mayor o igual a 60%.
- Moderado: Índice de humedad menor que 60% pero mayor o igual a 40%.
- Normal: Índice de humedad menor que 40% pero mayor o igual a 20%.
- Bajo: Índice de humedad menor que 20%.

Metodología de clasificación de riesgo de sequía

Para determinar el riesgo de sequía, se utilizó el índice de aridez calculado por la relación precipitación media anual y evapotranspiración potencial media anual (P/ETP). Los umbrales aplicados fueron los siguientes:

- Alto: Índice de aridez mayor o igual a 1,5.
- Moderado: Índice de aridez menor a 1,5.
- Normal: Índice de aridez mayor o igual a 1.
- Bajo: Índice de aridez menor 1.

El análisis se llevó a cabo mediante el cálculo de estos índices para cada departamento, utilizando datos de precipitación y temperatura proporcionados por INSIVUMEH y la evapotranspiración potencial estimada por el método de Thornthwaite. Los resultados se visualizan en mapas geoespaciales que permiten una interpretación visual de las zonas de riesgo.

Análisis Geoespacial

Se utilizó sistemas de información geográfica (SIG) para mapear y visualizar los índices calculados, lo que facilita la identificación de patrones geográficos y áreas de alto riesgo en términos de sequía e inundación.

Para la clasificación del riesgo de sequía e inundaciones en Guatemala según la climatología de 1970 a 2023, se establecieron umbrales específicos basados en los índices de aridez y humedad. Estos umbrales fueron fundamentales para analizar la susceptibilidad de las distintas regiones del país.

Este enfoque metodológico permitió no solo identificar las áreas de riesgo en el presente sino también proporcionar una base para proyecciones y escenarios futuros en el contexto del cambio climático antropogénico.

Si bien este estudio proporciona una base sólida para la evaluación de riesgos biofísicos, es importante destacar que los resultados no capturan factores sociales que pueden influir en la vulnerabilidad a estos riesgos. Por lo tanto, recomendamos

que esta metodología se utilice como parte de un enfoque más amplio que incluya evaluaciones geotécnicas y sociales, proporcionando así una visión más completa del riesgo de desastres. Esto es coherente con las prácticas sugeridas en el marco de la GERIDE y otras políticas públicas de gestión del riesgo de desastres en Latinoamérica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Guatemala pertenece a la región de Centroamérica (Figura 1). Limita al norte con México, al este con Belice y al sur con Honduras y El Salvador, al oeste con el océano Pacífico (254 km) y al este con el golfo de Honduras (148 km). Las diferentes zonas climáticas varían desde el nivel del mar hasta aproximadamente 4.000 m.s.n.m., con lluvias que varían desde los 400 hasta aproximadamente 4 mm anuales. Es el país más poblado de Centroamérica con 14.901.286 habitantes según el censo del 2018 en un área de 108.889 km² (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2019).

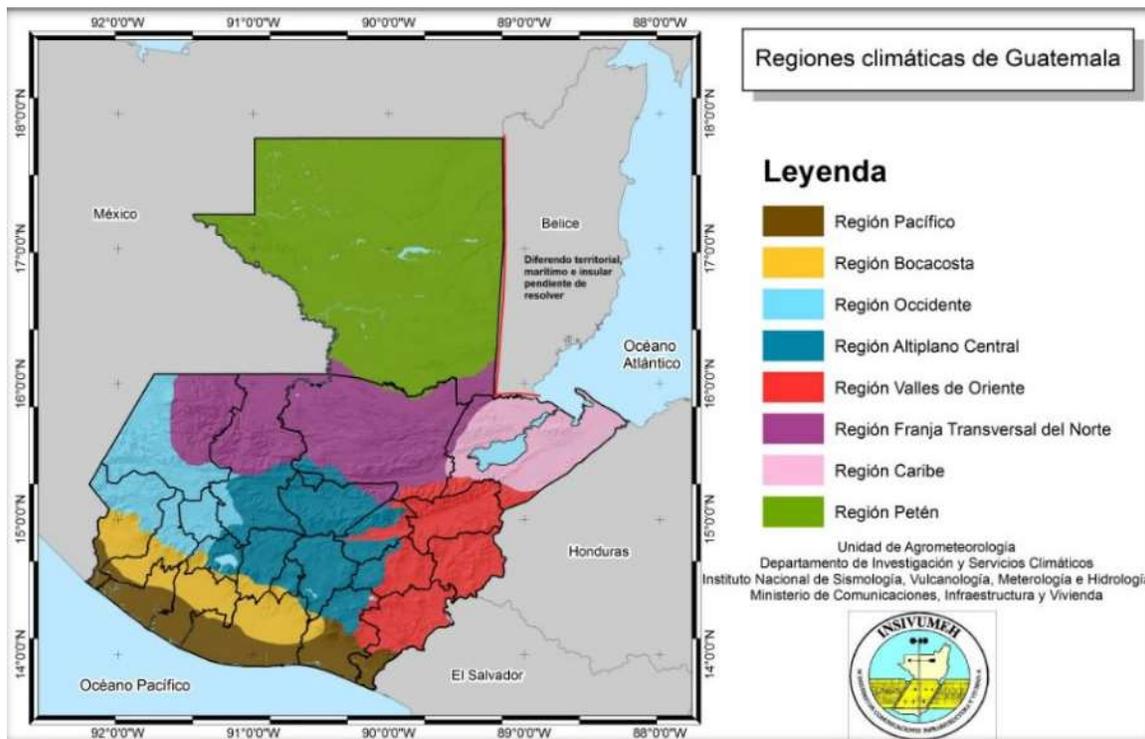


Figura 1. Regiones climáticas de Guatemala.

Los resultados obtenidos de la climatología de 1970 a 2023 presentan un panorama complejo de riesgos hídricos en Guatemala. Al examinar los datos de precipitación promedio (Figura 2),

temperatura promedio (Figura 3) y la evapotranspiración potencial estimada por departamento (Figura 4), se revelan patrones distintivos que subrayan la paradoja hídrica de la región.

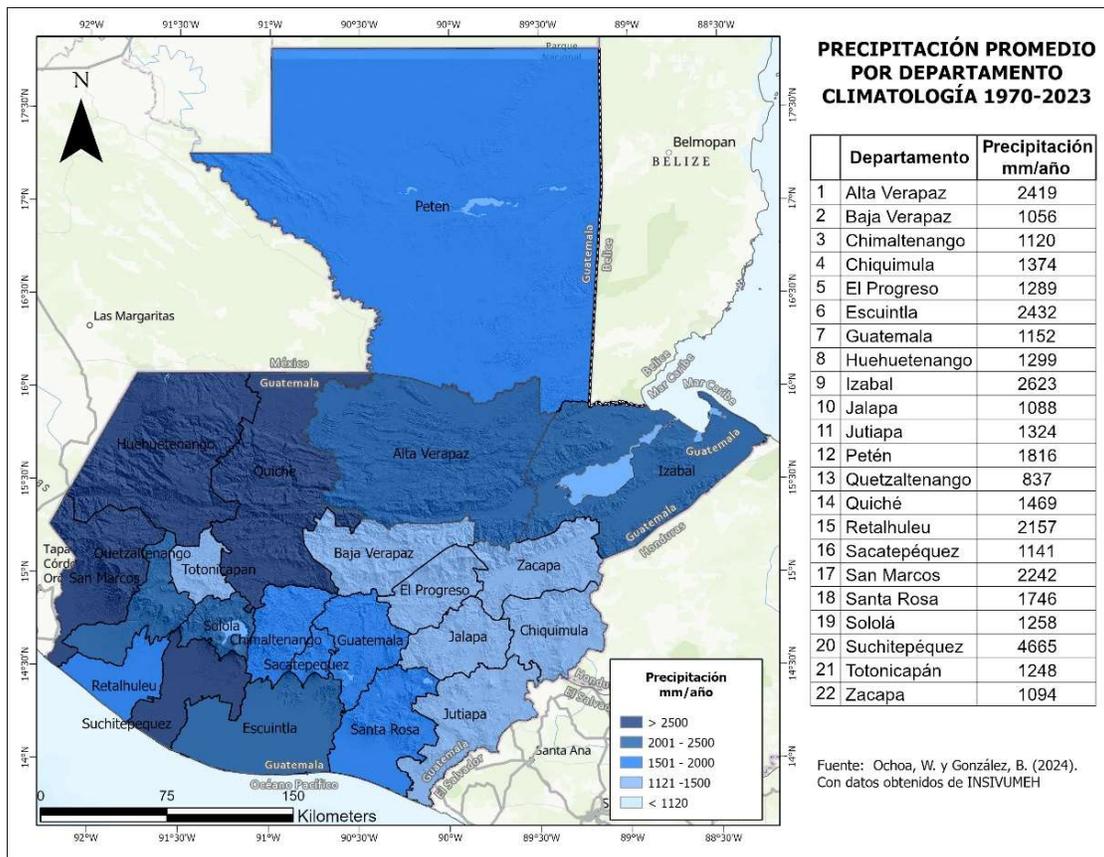


Figura 2. Precipitación promedio anual 1970-2023.

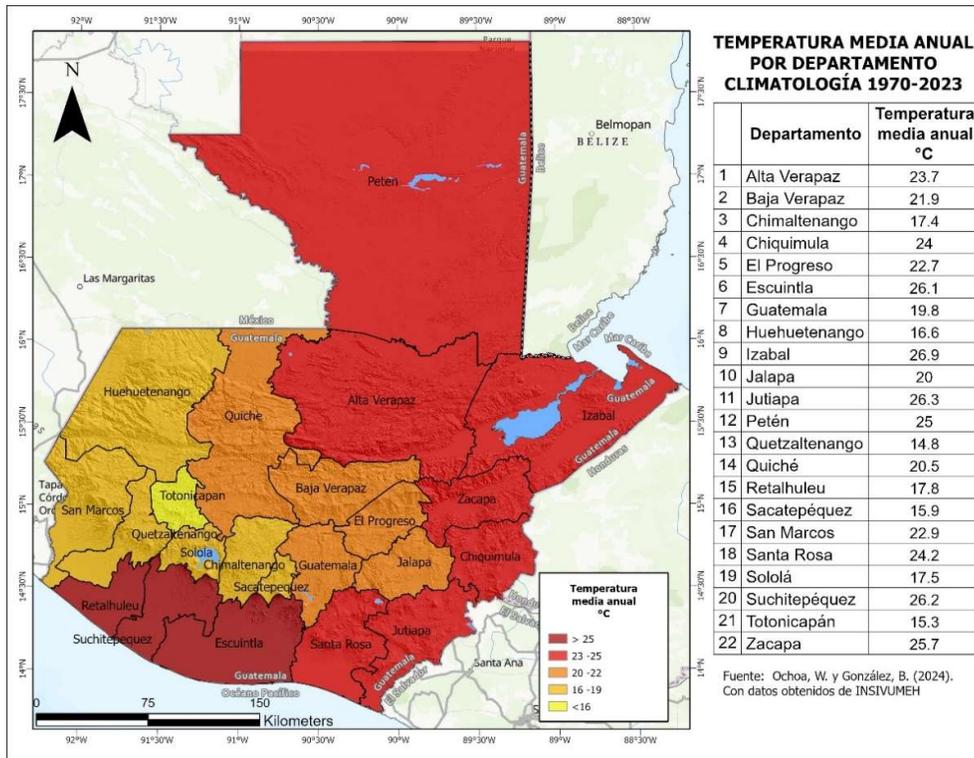


Figura 3. Temperatura promedio 1970-2023.

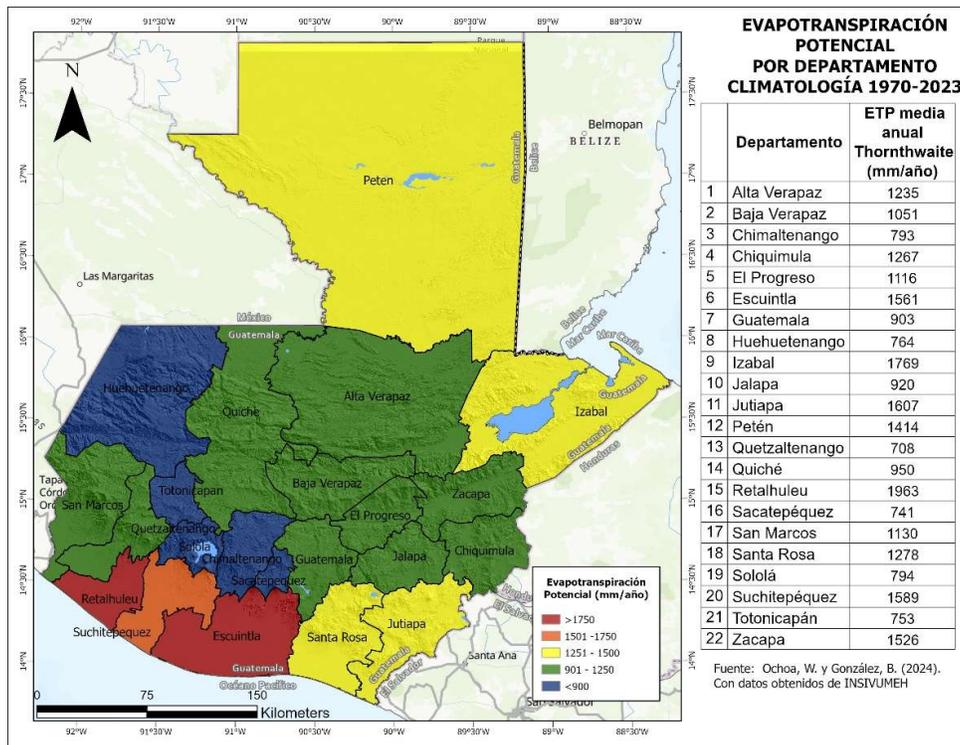


Figura 4. Evapotranspiración 1970-2023.

Tabla 1. Índices calculados por departamento de la república de Guatemala.

Departamento	Índice de humedad (<i>Im</i>)	Índice de aridez	Riesgo de sequía	Riesgo de inundación
Alta Verapaz	95,87	1,96	Alto	Muy Alto Riesgo
Baja Verapaz	0,48	1,00	Moderado	Normal
Chimaltenango	41,24	1,41	Moderado	Riesgo Moderado
Chiquimula	8,45	1,08	Moderado	Normal
El Progreso	15,50	1,16	Moderado	Normal
Escuintla	55,80	1,56	Alto	Riesgo Moderado
Guatemala	27,57	1,28	Moderado	Bajo Riesgo
Huehuetenango	70,03	1,70	Alto	Alto Riesgo
Izabal	48,28	1,48	Moderado	Riesgo Moderado
Jalapa	18,26	1,18	Moderado	Normal
Jutiapa	-17,61	0,82	Moderado	Normal
Petén	28,43	1,28	Moderado	Bajo Riesgo
Quetzaltenango	18,22	1,18	Moderado	Normal
Quiché	54,63	1,55	Alto	Riesgo Moderado
Retalhuleu	9,88	1,10	Moderado	Normal
Sacatepéquez	53,98	1,54	Alto	Riesgo Moderado
San Marcos	98,41	1,98	Alto	Muy Alto Riesgo
Santa Rosa	36,62	1,37	Moderado	Bajo Riesgo
Sololá	58,44	1,58	Alto	Riesgo Moderado
Suchitepéquez	193,58	2,94	Alto	Muy Alto Riesgo
Totonicapán	65,74	1,66	Alto	Alto Riesgo
Zacapa	-28,31	0,72	Moderado	Normal

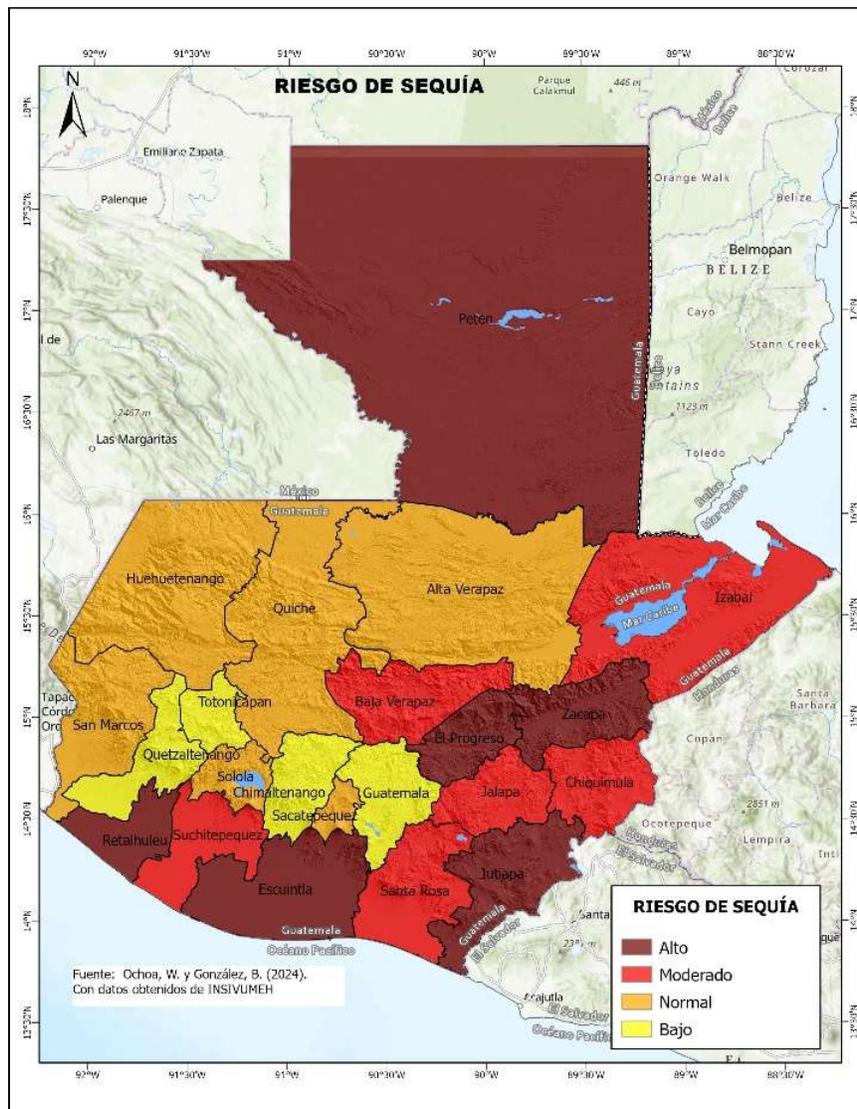


Figura 5. Riesgo de sequía por departamento.

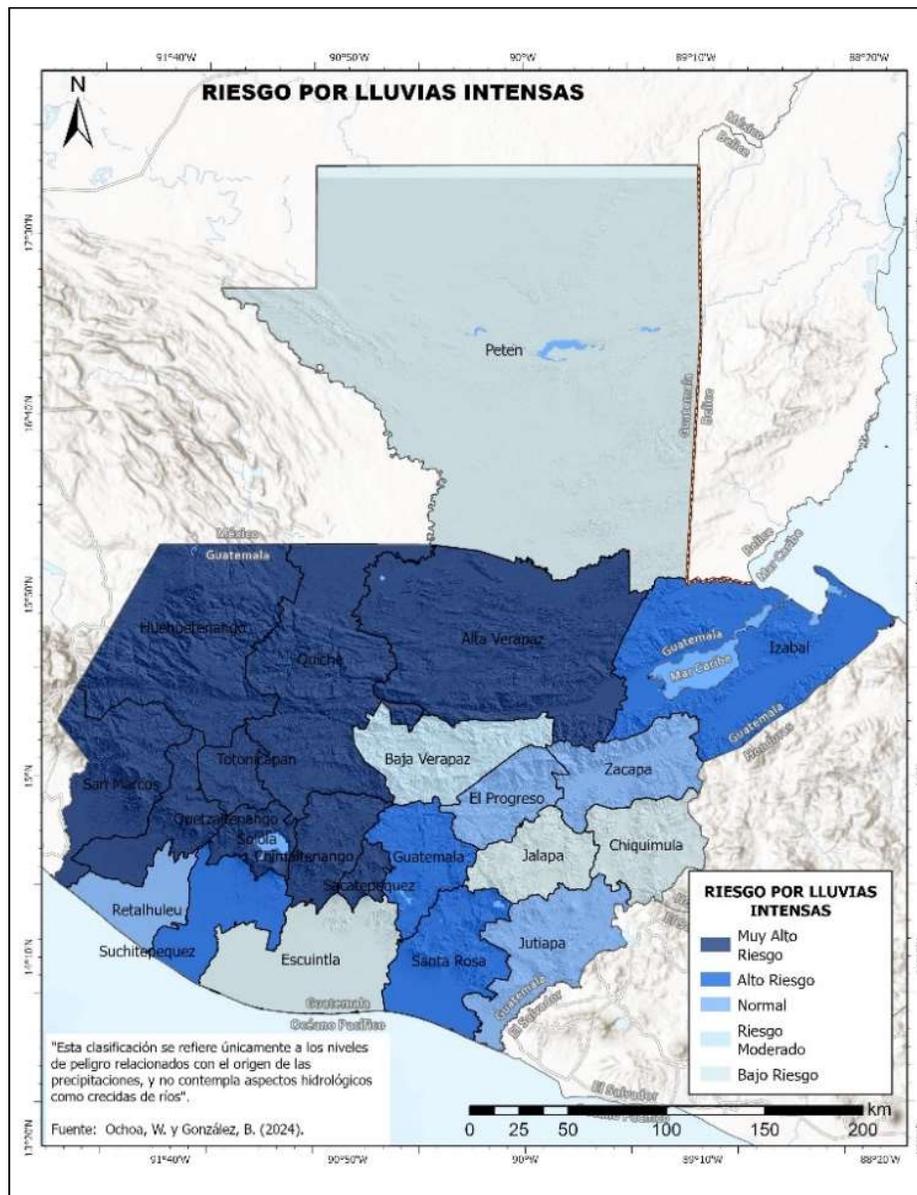


Figura 6. Riesgo de lluvia por departamento.

En cuanto al mapa de meses secos (Figura 7), muestra la distribución de los meses secos a lo largo del país. Se pueden observar diferentes regiones categorizadas según la cantidad de meses secos que experimentan al año:

- Áreas en amarillo: Estas áreas experimentan de 4 a 6 meses secos al año. Esto sugiere un clima con una estación seca marcada, pero con suficientes meses de lluvia para soportar

algunos tipos de agricultura de temporal, siempre que se planifique adecuadamente alrededor de estos períodos secos.

- Áreas en naranja: Las zonas marcadas en naranja indican que tienen más de 6 meses secos al año, lo cual se acerca a las condiciones semiáridas. Estas áreas están probablemente sujetas a restricciones en la agricultura y podrían requerir estrategias de manejo del agua

como el riego o la selección de cultivos resistentes a la sequía.

- Áreas en rojo: Estos lugares están categorizados como los más secos, con más de 6 meses secos al año, lo que sugiere condiciones de aridez. En estas

regiones, la gestión del agua y el suelo es crítica, y las prácticas como la conservación del agua, la reforestación y la agroforestería pueden ser necesarias para mantener la sostenibilidad ambiental y agrícola.

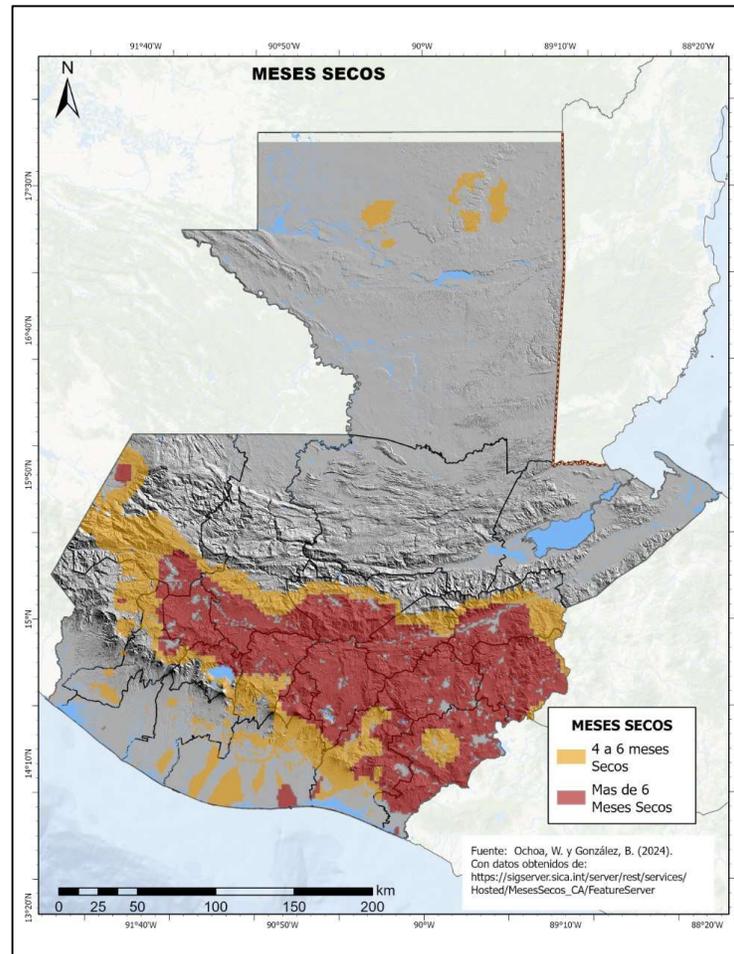


Figura 7. Meses secos (sin lluvia).

En términos de interpretación, las áreas con una mayor cantidad de meses secos serán más vulnerables a los efectos del cambio climático antropogénico, en particular al incremento en la frecuencia e intensidad de eventos de sequía. Esto podría tener implicancias significativas para la seguridad alimentaria, la planificación del uso del suelo y la

conservación de los recursos naturales en Guatemala.

El riesgo de sequía, medido por el índice de aridez, muestra una variabilidad significativa entre los departamentos. Sacatepéquez y Suchitepéquez exhiben un alto riesgo, lo cual es consistente con estudios previos que destacan la vulnerabilidad de estas áreas a la variabilidad climática (Rodríguez-Morales

et al., 2019). Estos hallazgos reiteran la importancia de adoptar prácticas de manejo sostenible del agua y del suelo, como sugieren la UNCCD y SEMARNAT. Por otro lado, los departamentos de Izabal y Alta Verapaz muestran un alto riesgo de lluvias intensas, lo que podría demandar estrategias de gestión de cuencas y reforestación para mitigar los efectos de las inundaciones. La distribución geográfica del riesgo sugiere que los patrones de lluvia y las características topográficas juegan un papel crucial en la definición de áreas de riesgo, subrayando la complejidad de la gestión hídrica en un contexto de cambio climático.

La coexistencia de altos riesgos de sequía e inundaciones en departamentos como Sacatepéquez y Huehuetenango ilustra la paradoja hídrica de Guatemala. Este fenómeno refuerza la necesidad de un enfoque adaptativo y multifacético en la gestión del agua que considera tanto la conservación como la preparación para excesos hídricos.

Los resultados enfatizan la importancia de una planificación proactiva y de adaptación al cambio climático. La adaptación estratégica debe basarse en un análisis detallado de los índices de humedad y aridez para anticipar y mitigar los efectos adversos de la variabilidad climática (Jehanzaib et al., 2020; Meza et al., 2020).

Kim & Jehanzaib (2020) destacan que el cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de las sequías en todo el mundo, incluso en regiones que tradicionalmente no eran susceptibles. Esta tendencia se refleja en Guatemala, donde departamentos como Sacatepéquez y Huehuetenango muestran patrones de variabilidad climática extrema, con temporadas de sequía prolongadas seguidas de precipitaciones intensas. Estos hallazgos respaldan los resultados que muestran cómo la variabilidad interanual y espacial de la sequía de medio verano afecta especialmente a estos departamentos (Ochoa et al., 2022).

Dai (2011) y Leng et al. (2015) documentan cómo el aumento global de las temperaturas contribuye a cambios en los ciclos hidrológicos, exacerbando tanto las sequías como las inundaciones. En Guatemala, los departamentos con mayor riesgo de inundaciones, como Izabal y Alta Verapaz, podrían estar experimentando estos efectos debido a un aumento de las precipitaciones intensas en un ambiente de temperaturas elevadas.

Ma et al. (2004) y Zou et al. (2005) discuten las implicaciones del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos, especialmente en cómo los patrones alterados de lluvia y temperatura afectan la disponibilidad y demanda de agua. En Guatemala, esto se traduce en la necesidad de desarrollar estrategias de gestión que puedan adaptarse a condiciones extremadamente variables, una conclusión apoyada por los patrones observados en los mapas de riesgo recientemente actualizados.

Blenkinsop & Fowler (2007) y Conde et al. (2008) resaltan la importancia de integrar estrategias de adaptación y mitigación en la planificación de la gestión del riesgo climático. Esto incluye el desarrollo de sistemas de alerta temprana y respuestas adaptativas a eventos extremos, especialmente en áreas de alto riesgo como las identificadas en los departamentos de Guatemala. Estas estrategias son vitales para responder a las dinámicas cambiantes del clima y asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio confirman la existencia de una paradoja hídrica en Guatemala, caracterizada por una distribución heterogénea de riesgos hídricos. Se observó que mientras algunos departamentos enfrentan altos riesgos de sequía, otros sufren amenazas significativas de inundaciones, lo que

destaca la complejidad de la gestión de recursos hídricos en el país.

La aplicación de índices de aridez y humedad, calculados a partir de datos climáticos históricos y recientes, ha demostrado ser una herramienta eficaz para identificar y clasificar las áreas de riesgo. Esta metodología, centrada exclusivamente en parámetros físicos, proporcionó una base sólida para evaluar los riesgos biofísicos asociados a sequías e inundaciones, facilitando la interpretación objetiva y directa de las condiciones climáticas e hidrológicas.

Los resultados subrayan la necesidad de una gestión diferenciada y adaptativa para abordar los distintos niveles de riesgo identificados. La clasificación de departamentos según los riesgos de sequía e inundación permite una planificación más precisa y una respuesta de emergencia más efectiva, crucial para

mitigar los impactos del cambio climático antropogénico.

Este estudio resalta la necesidad de continuar la investigación en el ámbito de la hidrología y la climatología en Guatemala. Futuras investigaciones deberían explorar la incorporación de variables sociales y económicas para complementar la evaluación de riesgos biofísicos, lo cual podría ofrecer una visión más holística de la vulnerabilidad y capacidad de adaptación de las comunidades locales.

Los índices calculados son indicativos de las condiciones actuales que afectan la disponibilidad de agua. Se requiere un monitoreo continuo y acciones proactivas para evitar la degradación de los bienes naturales y para salvaguardar la seguridad hídrica y la resiliencia climática de la región.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, L. (2018). Sequía y Seguridad Alimentaria en Guatemala. *Revista de Investigaciones Ambientales*, 6(1), 45-59.

Bernal, G. (2021). Inundaciones en Guatemala: Retos y Respuestas. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Blenkinsop, S. & Fowler, H.J. (2007). Cambios en la frecuencia, severidad y duración de la sequía para las Islas Británicas proyectados por los modelos climáticos regionales PRUDENCE. *J. Hydrol.* 2007, 342, 50-71.

Conde, C., Ferrer, R., & Orozco, S. (2008). Vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales al cambio climático en México. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.unam.mx/>

Dai, A. (2011). Sequía bajo el calentamiento global: una revisión. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 2011, 2, 45-65

Dai, A., Trenberth, K.E. & Qian, T. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 1117-1130. <https://doi.org/10.1175/JHM-386.1>

García, L. (2018). Caracterización de la canícula en la región guatemalteca usando el modelo climático regional Regcm [Tesis]. Universidad de San Carlos de Guatemala. <https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2018-11/Tesis%20Lilian%20Garc%C3%ADa.pdf>

Instituto Nacional de Estadística. (2019). Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos ENEI 2-2019. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2020/08/13/2020081353830FopQpWf6BcBWj8taVS3Q3mRKxgDsvwPe.pdf>

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH. (2020). Informe Anual de Fenómenos Hidrometeorológicos.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2022). Cambio Climático y Sus Impactos en Centroamérica. Informe Especial.

Jehanzaib, M., Shah, S.A., Yoo, J., Kim, T.W. (2020). Investigación de los impactos del cambio climático y las actividades humanas en la sequía hidrológica utilizando enfoques no estacionarios. *J. Hydrol.* 2020, 588, 125052

Kim, T.-W. & Jehanzaib, M. (2020). Drought Risk Analysis, Forecasting and Assessment under Climate Change. *Water*, 12, 1862. <https://doi.org/10.3390/w12071862>

Leng, G., Tang, Q., Rayburg, S. (2015). Impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en China. *Glob. Planeta. Chang.* 2015, 126, 23-34.

Ma, Z. & Fu, C. (2020). Características interanuales de las variables hidrológicas superficiales en las zonas áridas y semiáridas del norte de China. *Glob. Planeta. Chang.* 2003, 37, 189-200.

Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)

Meza, I., Siebert, S., Döll, P., Kusche, J., Herbert, C., Eyshi Rezaei, E., Nouri, H., Gerdener, H., Popat, E., Frischen, J., Naumann, G., Vogt, J. V., Walz, Y., Sebesvari, Z. & Hagenlocher, M. (2020). Global-scale drought risk assessment for agricultural systems. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 695–712. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-695-2020>

Ochoa, W. (2022). *Dinámica del uso de la tierra y la variabilidad climática en la subcuenca del río Panajachel, cuenca del Lago Atitlán, Sololá, Guatemala*. [Tesis de Doctorado]. Universidad de San Carlos de Guatemala. USAC. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29408.76802>

Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., & 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>

Paulo, B., & Vogt, J. (2021). Drought risk analysis, forecasting and assessment under climate change. *Water*, 13(11), 1479. <https://doi.org/10.3390/w13111479>

Pérez, T. (2018). Cambios de uso de suelo y de clima: Guatemala, un caso de estudio. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM]. <http://132.248.9.195/ptd2018/enero/0769553/Index.html>

Rivera, P., Ochoa, W., & Salguero, M. (2020). Escenarios de cambio climático para Guatemala, C.A. Programa de Doctorado En Cambio Climático y Sostenibilidad. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala., 112.

Rodríguez-Morales, B., et al. (2019). Efectos de las Sequías en la Biodiversidad de Guatemala. *Conservación Guatemalteca*, 15(3), 22-34.

SEMARNAT. (2005). Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación y la Sequía. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat>

Sheffield, J., Madera, E.F., Roderick, M.L. (2012). Poco cambio en la sequía global en los últimos 60 años. *Nature* 2012, 491, 435-438

Small, R., Szoeké, S., & Xie, S. (2007). The Central American Midsummer Drought: Regional Aspects and Large-Scale Forcing. *Journal of Climate*, 20, 4853-4873. <https://doi.org/10.1175/JCLI4261.1>

UNCCD. (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. <https://www.unccd.int/>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2021). *GAR Special Report on Drought 2021*. <https://www.undrr.org/publication/gar-special-report-drought-2021>

Zou, X., Zhai, P., Zhang, Q. (2005). Variaciones en las sequías sobre China: 1951-2003. *Geophys. Res. Lett.* 2005, pág. 32