

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria, Ciudad de México, México.

ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,

Volumen 10, Número 1.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i1](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1)

## **ZONIFICACIÓN ESPACIAL DE ÁREAS DE RECARGA ACUÍFERA EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO TONALÁ: UNA APROXIMACIÓN MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

SPATIAL ZONING OF AQUIFER RECHARGE AREAS IN THE MIDDLE BASIN OF THE TONALÁ RIVER: A GIS-BASED APPROACH

**Antonia Villarreal Alvarez**

TecNM-ITS Las Choapas

**Javier Arcos Roa**

TecNM-ITS Las Choapas

**Jackeline Carrillo Ramos**

TecNM-ITS Las Choapas

**Jorge Leonardo Frias Bayona**

TecNM-ITS Las Choapas

**José Antonio Zárate Urgell**

TecNM-ITS Las Choapas

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v10i1.22317](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22317)

## Zonificación espacial de áreas de recarga acuífera en la cuenca media del río Tonalá: una aproximación mediante sistemas de información geográfica

**Antonia Villarreal Alvarez<sup>1</sup>**

[a-villarreal@choapas.tecnm.mx](mailto:a-villarreal@choapas.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-7092-0254>

TecNM-ITS Las Choapas

México

**Javier Arcos Roa**

[j-arcosr@choapas.tecnm.mx](mailto:j-arcosr@choapas.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0009-0004-4346-0717>

TecNM-ITS Las Choapas

México

**Jackeline Carrillo Ramos**

[j-carrillor@choapas.tecnm.mx](mailto:j-carrillor@choapas.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0009-0003-1977-8680>

TecNM-ITS Las Choapas

México

**Jorge Leonardo Frias Bayona**

[j-friasb@choapas.tecnm.mx](mailto:j-friasb@choapas.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0009-0002-3837-7009>

TecNM-ITS Las Choapas

México

**José Antonio Zárate Urgell**

[a-zarateu@choapas.tecnm.mx](mailto:a-zarateu@choapas.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-1442-0121>

TecNM-ITS Las Choapas

México

### RESUMEN

La seguridad hídrica en la región sur de Veracruz enfrenta desafíos crecientes debido a la expansión urbana y agrícola, lo que exige herramientas precisas para el ordenamiento territorial. El objetivo de esta investigación fue identificar y cartografiar las zonas potenciales de recarga acuífera en la cuenca media del río Tonalá, utilizando un enfoque multicriterio soportado en Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología integró el análisis espacial de variables biofísicas clave, incluyendo litología, edafología, uso de suelo y pendiente, aplicando álgebra de mapas para determinar la capacidad de infiltración. Los resultados permitieron generar una zonificación que destaca áreas críticas para la recarga, como las subcuenca de Poza Crispín y Tancochapa. Se concluye que la protección de estas zonas identificadas es prioritaria para garantizar el abastecimiento futuro de agua subterránea en el municipio de Las Choapas, proporcionando una base técnica inédita para la toma de decisiones locales.

**Palabras clave:** Recarga acuífera, SIG, Cuenca del río Tonalá, Infiltración, Seguridad hídrica

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [a-villarreal@choapas.tecnm.mx](mailto:a-villarreal@choapas.tecnm.mx)

# **Spatial zoning of aquifer recharge areas in the middle basin of the Tonalá River: a GIS-based approach**

## **ABSTRACT**

Water security in the southern region of Veracruz faces growing challenges due to urban and agricultural expansion, demanding precise tools for land-use planning. The objective of this research was to identify and map potential aquifer recharge zones in the middle basin of the Tonalá River, using a multi-criteria approach supported by Geographic Information Systems (GIS). The methodology integrated the spatial analysis of key biophysical variables, including lithology, edaphology, land use, and slope, applying map algebra to determine infiltration capacity. The results allowed for the generation of zoning that highlights critical recharge areas, such as the Poza Crispín and Tancochapa sub-basins. It is concluded that the protection of these identified zones is a priority to guarantee the future supply of groundwater in the municipality of Las Choapas, providing an unprecedented technical basis for local decision-making.

**Keywords:** Aquifer recharge, GIS, Tonalá River basin, Infiltration, Water security

*Artículo recibido 10 diciembre 2025*

*Aceptado para publicación: 10 enero 2026*



## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea representa una de las fuentes más críticas para el abastecimiento humano y las actividades productivas, sustancialmente en regiones tropicales donde la variabilidad climática y la presión antropogénica amenazan la disponibilidad del recurso (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2018). En el contexto del sureste mexicano, la gestión de cuencas hidrográficas ha cobrado relevancia ante la necesidad de garantizar la seguridad hídrica a largo plazo. No obstante, la falta de información espacial detallada sobre los procesos hidrológicos locales a menudo impide la implementación de políticas de conservación efectivas. (Ríos-Sánchez *et al.*, 2024)

En el municipio de Las Choapas, Veracruz, la problemática del abastecimiento de agua se ha ido acrecentado debido al crecimiento demográfico desordenado y al cambio de uso de suelo, que ha transformado áreas forestales en zonas agrícolas y urbanas, cubriendo superficies clave para la infiltración natural. A pesar de la riqueza hídrica aparente de la región, la falta de identificación precisa de las zonas de recarga del acuífero deja a las fuentes de abastecimiento, como la batería de pozos Bachoco y los pozos urbanos, vulnerables a la sobreexplotación y la contaminación.

Actualmente, no existen instrumentos de gestión territorial que delimiten espacialmente estas áreas críticas, lo que resulta en una planificación urbana ciega ante el ciclo hidrológico local.

La identificación de zonas de recarga se justifica no solo como una medida de conservación ambiental, sino como una estrategia de supervivencia económica y social para la región. Proteger las áreas donde el agua de lluvia se infiltra al subsuelo es la forma más eficiente de asegurar el caudal base de los ríos y el nivel freático de los pozos que abastecen a la población. (Fuentes *et al.*, 2017)

Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar variables complejas como el tipo de suelo, la geología y la topografía para modelar estos procesos con bajo costo y alta precisión espacial, sirviendo de fundamento para normativas como la NOM-011-CONAGUA-2015. (“NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales,” 2010)

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo fue determinar la distribución espacial de las zonas de recarga acuífera en la cuenca media del río Tonalá. Para ello, se caracterizaron las variables biofísicas determinantes de la infiltración y se aplicó un modelo de análisis espacial multicriterio, con el fin de



proporcionar un mapa de zonificación que sirva como instrumento técnico para el ordenamiento ecológico y la protección de las fuentes de agua en Las Choapas.

## METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en la cuenca media del río Tonalá, abarcando una superficie aproximada de 271,884.204382 hectáreas. La zona se ubica geográficamente en el Municipio de Las Choapas, Veracruz; Región Hidrológica 29 Coatzacoalcos, limitando al **Norte: Golfo de México, Sur y Este: Cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta, Oeste: Cuenca del río Coatzacoalcos.**, **Coordenadas extremas:** Latitud Norte 18°15' a 17°14' y Longitud Oeste 93°26' a 94°23'. Fisiográficamente, la región presenta un relieve caracterizado por **Bajos, Sup-aplanamiento, Colinas medianas valles y Relieve escarpado montañoso**, con un clima predominante de tipo cálido húmedo y precipitaciones medias anuales que oscilan entre los **2019 mm y 2800 mm**. (Roy *et al.*, 2021)

**Tabla 1.** Variable topoformas, porcentajes y superficies en hectáreas, presentes en el área de estudio

Zonas de Topo Formas	Superficie	%
Bajos, Sup aplanamiento	40,601.80 has.	14.93%
Colinas medianas valles	113,890.16 has.	41.89%
Relieve escarpado montañoso	117,392.24 has.	43.18%
Total	271,884.20 has.	100.00%

Nota. Elaboración propia

Para la caracterización espacial se utilizaron datos vectoriales y raster oficiales escala 1:50,000 y 1:250,000 provenientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las variables analizadas incluyeron: (Lerback *et al.*, 2024) (Ouma & Tateishi, 2014)

- **Topografía:** Modelo Digital de Elevación (MDE) para la derivación de pendientes.
- **Edafología:** Tipos de suelo y sus propiedades hidrológicas.
- **Uso de Suelo y Vegetación:** Series correspondientes al año **Imágenes de Satelite Sentinel S2B\_MSIL2A (13/02/2025 y 04/04/2025)**.



- **Hidroclimatología:** Datos de estaciones meteorológicas regionales para el cálculo de precipitación media.

El procesamiento de datos se realizó mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el software **ArcGIS** (Burrough y McDonnell, 2015). La metodología se basó en un enfoque multicriterio de superposición ponderada (álgebra de mapas). (Gautam *et al.*, 2025)

El procedimiento constó de tres fases:

1. **Interpolación climática:** Se aplicó el método de Polígonos de Thiessen, para distribuir espacialmente la precipitación media anual a partir de los registros puntuales de las estaciones meteorológicas circundantes, generando isoyetas representativas para el área de estudio. (Aragón Hernández *et al.*, 2019)
2. **Reclasificación de variables:** Se generaron mapas temáticos estandarizados para cada variable (pendiente, litología, tipo de suelo y cobertura vegetal). A cada categoría se le asignó un valor de aptitud para la infiltración (Alta, Media, Baja) basado en la permeabilidad teórica del material y la retención de agua.
3. **Integración cartográfica:** Las capas reclasificadas se integraron mediante operaciones booleanas y de intersección geométrica para obtener la zonificación final de recarga, discriminando aquellas áreas donde la pendiente excesiva o la impermeabilización del suelo (zona urbana) limitan la infiltración vertical efectiva. (Letz *et al.*, 2021) (Lerback *et al.*, 2024)
4. **El análisis multicriterio (AMC)** se fundamenta en el concepto de escalas de relación de conducción de la comparación pareada, tiene una precisión superior en el mapeo del potencial de aguas subterráneas, AMC es prometedor y reconoce de manera eficiente las regiones adecuadas para la recarga de agua subterránea sobre otras técnicas convencionales. (Kadam *et al.*, 2020)

En este trabajo, se utiliza un AMC basado en SIG para integrar capas temáticas de variables que influyen en el almacenamiento natural y el movimiento de agua, dado que la comparación pareada es vital en la aplicación del AMC, la asociación de criterios se pondera de acuerdo con su contribución a la presencia de agua subterránea.(Saaty, n.d.)



## RESULTADOS

El análisis topográfico reveló que el 27.18% del área de estudio presenta pendientes **suaves y el 36.10% pendientes pronunciadas**, lo cual favorece los tiempos de concentración del agua para su infiltración. Geológicamente, se identificó un predominio de materiales **Lutita-Areniscas, Arenisca-Lutita y Arenisca-Conglomerado poligénico**, cuya porosidad primaria permite la percolación profunda. (Ghimire *et al.*, 2021)

Estos materiales se ubican en su mayoría en las zonas sur, donde se encontró una zona de alta y muy alta permeabilidad.

**Tabla 2.** Litología. Superficies en el área de estudio

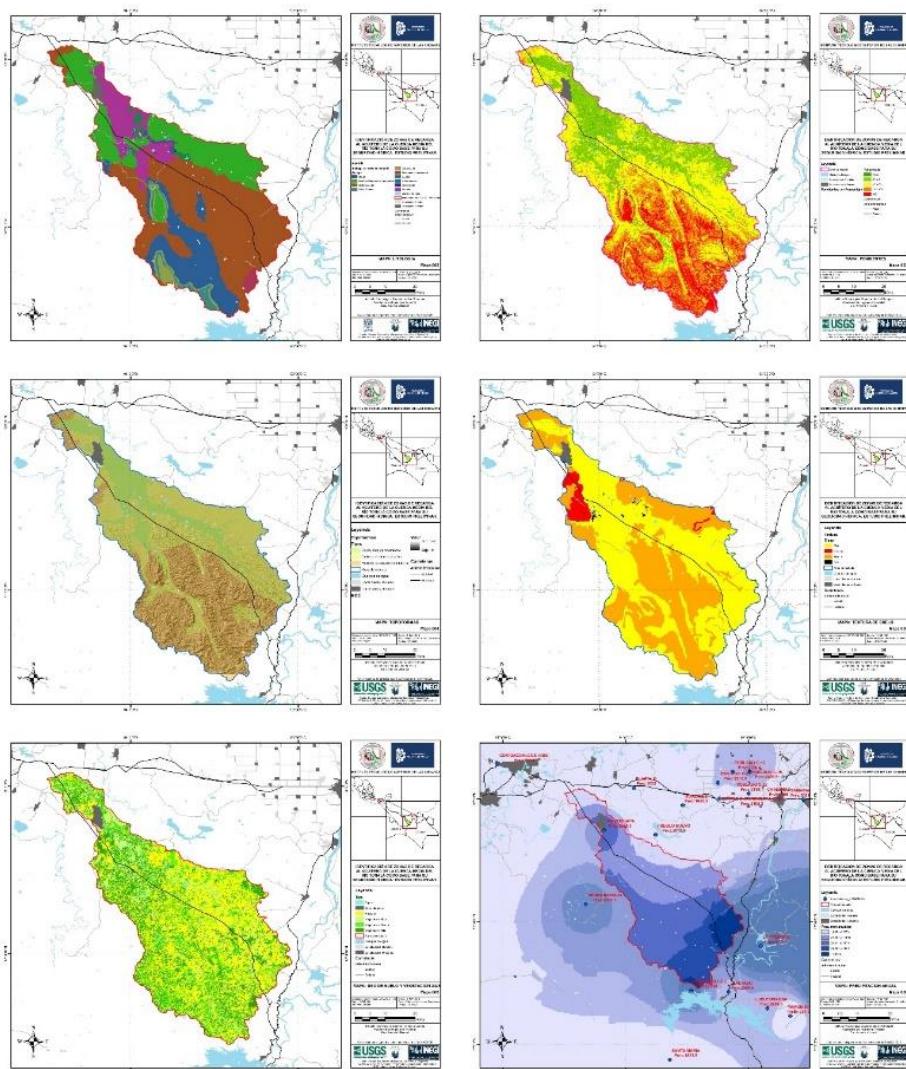
Tipo de Litología	Superficie	%
Aluvial	1,523.70 has.	0.6%
Arenisca-Conglomerado poligénico	62,861.67 has.	23.1%
Arenisca-Lutita	118,840.13 has.	43.7%
Caliza-Dolomía	5,425.87 has.	2.0%
Caliza-Lutita	7,306.00 has.	2.7%
Conglomerado poligénico	2,553.28 has.	0.9%
Lagunar	3,316.98 has.	1.2%
Lutita-Arenisca	42,218.41 has.	15.5%
Palustre	27,838.16 has.	10.2%
Total	271,884.20 has.	100.00%

Nota. Elaboración propia

La distribución de la precipitación mostró un gradiente que favorece a las zonas **Sur**, del área de estudio donde se concentran los mayores volúmenes de entrada al sistema. Sin embargo, el análisis de uso de suelo evidenció una presión antropogénica significativa, con una reducción de la cobertura forestal original en favor de pastizales y zonas agrícolas en un **41 %** del territorio. (INEGI, n.d.)



**Figura 1.** Mapas de insumos: Litología, Pendiente, Topoformas, Textura de suelo Uso de Suelo y Precipitación



**Tabla 3.** Uso de suelo calculado para la Cuenca del Río Tancochapa, subcuenca río Poza Crispín, Río Tancochapa Alto y Río Tancochapa Bajo.

Zonas de Uso de Suelo	Superficie	%
Agua	4,151.12 has.	1.5%
Infraestructura	5,575.95 has.	2.1%
Pastizal	111,497.05 has.	41.0%
Vegetación alta	70,030.26 has.	25.8%
Vegetación Baja	32,770.65 has.	12.1%
Vegetación Media	47,859.17 has.	17.6%
Total	271,884.20 has.	100.00%

Nota. Elaboración propia

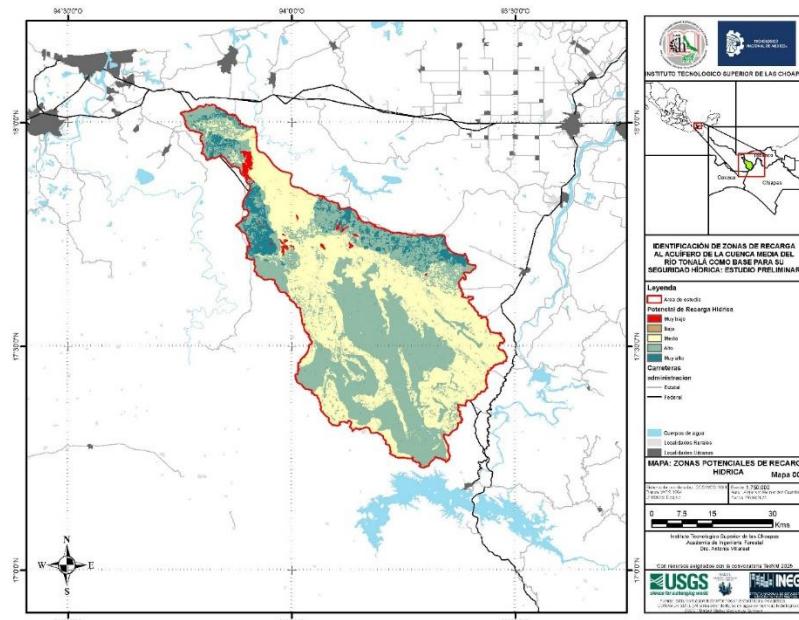


La integración de las variables mediante el análisis multicriterio permitió delimitar las zonas de recarga acuífera prioritarias (Figura 3). Se identificaron tres categorías de aptitud: (Riley *et al.*, 2019)

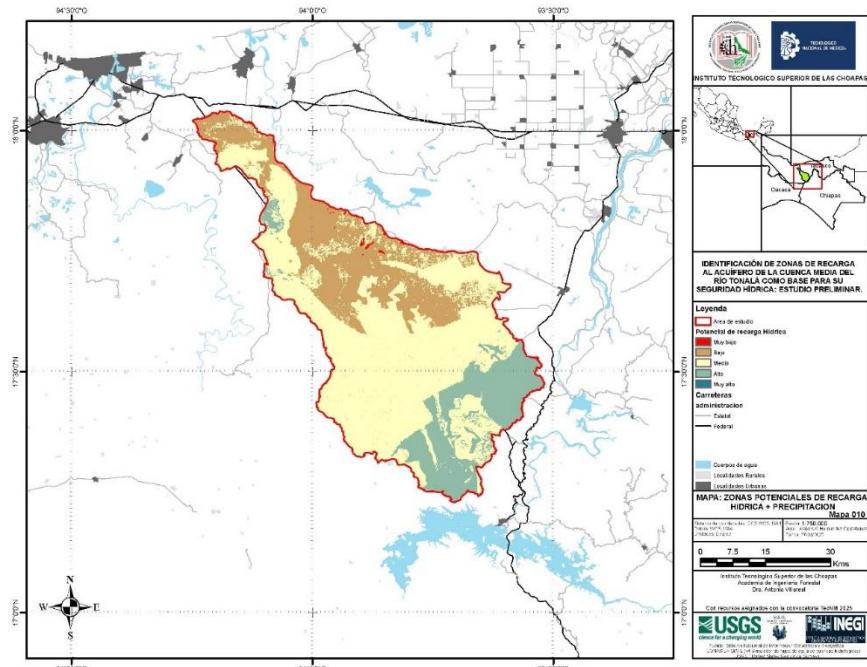
- **Zona de Alta Recarga:** Abarca una superficie de **455.95 has.**, representando el **0.17%** del área total. Estas zonas coinciden espacialmente con áreas de vegetación densa y pendientes menores al **30%**, permitiendo una infiltración máxima.
- **Zona de Recarga Media:** Comprende **158,083.17 has.** (58.14%), funcionando como zonas de transición y amortiguamiento.
- **Zona de Baja Recarga:** Correspondiente a **67645.81 has.** ha (25%), asociada principalmente a suelos arcillosos compactados, zonas urbanas de Las Choapas y pendientes abruptas que favorecen la escorrentía superficial sobre la infiltración.

Se realizaron dos mapas finales, uno en el que no se toma en cuenta la variable precipitación (Figura 2) y otro en el que si se toma en cuenta la precipitación (Figura 3). Para realizar las conclusiones se utilizó el mapa generado tomando en cuenta la precipitación.

**Figura 2.** Mapa de zonas potenciales de recarga hídrica sin considerar la variable precipitación



**Figura 3.** Mapas de zonas potenciales de recarga hídrica considerando la variable precipitación



El análisis detallado a nivel de subcuenca destaca a **Poza Crispín** y **Tancochapa** como las unidades hidrológicas de mayor importancia estratégica. Específicamente, para el caso del cálculo de las zonas potenciales de recarga hídrica alto y muy alto potencial de infiltración, en las subcuenca antes mencionadas se concentra la mayor densidad de zonas de alta recarga, actuando como el principal punto de entrada de agua al acuífero regional. En contraste, las zonas cercanas a la mancha urbana mostraron una pérdida significativa de capacidad de infiltración debido al cambio de uso de suelo, lo que incrementa la vulnerabilidad hídrica de los pozos de abastecimiento localizados en la periferia.

**Tabla 4.** Superficie en hectáreas y porcentaje de zonas potenciales de recarga hídrica considerando la variable precipitación

Potencial de Recarga Hídrica + Precipitación	Superficie	%
Muy Bajo	884.90 has.	0.33%
Bajo	66,760.90 has.	24.55%
Medio	158,083.17 has.	58.14%
Alto	45,699.28 has.	16.81%
Muy Alto	455.95 has.	0.17%
Total	271,884.20 has.	100.00%

Nota. Elaboración propia



## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la capacidad de infiltración en la cuenca media del río Tonalá no es homogénea, sino que está fuertemente controlada por la interacción entre la litología, la pendiente y la precipitación. A diferencia de lo que comúnmente se asume en la región, la abundancia de precipitación no garantiza por sí sola una recarga efectiva del acuífero si las condiciones del suelo no son favorables. La identificación de las zonas de **Poza Crispín** y **Tancochapa** como áreas de alta recarga confirma la importancia de las formaciones geológicas permeables ubicadas en las partes altas y medias de la cuenca, las cuales actúan como las principales "zonas de cosecha" de agua pluvial.

Un hallazgo crítico de este estudio es la superposición espacial entre zonas de alta recarga y áreas de expansión agropecuaria. Al contrastar el mapa de potencial de infiltración con el uso de suelo actual, se evidencia que una porción significativa de las áreas clave para la recarga ha perdido su cobertura vegetal original. La conversión de bosques a pastizales o zonas urbanas compacta el suelo y reduce drásticamente la tasa de infiltración, incrementando la escorrentía superficial. Esto plantea un riesgo directo para la seguridad hídrica de Las Choapas: si estas zonas se impermeabilizan, la batería de pozos (como Bachoco) podría experimentar descensos en sus niveles piezométricos a mediano plazo, independientemente de cuánto llueva.

La metodología SIG empleada demostró ser una herramienta costo-efectiva para suplir la falta de monitoreo piezométrico directo en la región. Si bien este estudio tiene un carácter preliminar y se basa en modelos estáticos, la validación cruzada con la ubicación de los pozos productivos existentes sugiere una alta correlación entre las zonas de recarga modeladas y la disponibilidad real de agua subterránea. No obstante, para refinar este modelo en futuras investigaciones, se recomienda incorporar pruebas de infiltración *in situ* y análisis isotópicos que permitan cuantificar con mayor precisión los volúmenes de recarga vertical.



## CONCLUSIONES

El análisis espacial multicriterio permitió identificar y delimitar con éxito las zonas de recarga acuífera en la cuenca media del río Tonalá, cumpliendo con el objetivo de generar una base cartográfica inédita para la gestión hídrica local. Se concluye que las subcuenca de **Poza Crispín y Tancochapa** constituyen los puntos neurálgicos para el sostenimiento del sistema acuífero regional, debido a su combinación óptima de suelos permeables y pendientes moderadas.

El análisis espacial multicriterio permitió delimitar zonas de recarga acuífera en la cuenca media del río Tonalá, generando una base cartográfica inédita útil para la planeación hídrica local. La validación cruzada con la ubicación de pozos productivos sugiere coherencia entre las zonas modeladas y la disponibilidad real de agua subterránea, por lo que la metodología resulta costo-efectiva ante la ausencia de monitoreo piezométrico. Se identificó a las subcuenca Poza Crispín y Tancochapa como áreas prioritarias para la sostenibilidad del acuífero regional; sin embargo, la ausencia de regulación del uso de suelo en dichas zonas representa la mayor amenaza para la seguridad hídrica en Las Choapas. Se recomienda incorporar pruebas de infiltración e isotopía ambiental para refinar la estimación de recarga vertical en estudios futuros.

La investigación evidencia que la seguridad hídrica del municipio de Las Choapas no depende únicamente de la extracción, sino de la protección de estas áreas de captación. Actualmente, la falta de regulación sobre el uso del suelo en estas zonas críticas representa la mayor amenaza para la sostenibilidad del recurso.

Por lo tanto, se recomienda urgentemente a las autoridades municipales y organismos operadores de agua integrar esta zonificación en los Planes de Ordenamiento Ecológico Territorial. Es imperativo establecer políticas de conservación, pago por servicios ambientales o restricción de urbanización en las áreas identificadas como de "Alta o Muy Alta Recarga", garantizando así el abastecimiento de agua potable para las generaciones futuras frente a la presión del desarrollo urbano y el cambio climático.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragón Hernández, J. L., Aguilar Martínez, G. A., Velázquez Ríos, U., Jiménez Magaña, M. R., & Maya Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1–15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Fuentes, O. E., Ojeda, C. G., & Cázares, E. Y. M. (2017). Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica. In *Gob.mx*.
- Gautam, A., Rai, S. C., & Jacob, N. (2025). Effect of land-use/cover change on sources of groundwater recharge using water isotopes in North-east Punjab, India. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06649-8>
- Ghimire, U., Shrestha, S., Neupane, S., Mohanasundaram, S., & Lorphensri, O. (2021). Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge: A case study of the Bangkok Area, Thailand. *Science of The Total Environment*, 792, 148370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148370>
- INEGI. (n.d.). Publicaciones y mapas. In *Org.mx*.
- Kadam, A. K., Umrikar, B. N., & Sankhua, R. N. (2020). Assessment of recharge potential zones for groundwater development and management using geospatial and MCDA technologies in semiarid region of Western India. *SN Applied Sciences*, 2(2), 312. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2079-7>
- Lerback, J., Bibby, R., Danielsen, J., Garguilo, M., Grande, E., Harm, A. J., Minn, K., Moran, J., Oerter, E., & Visser, A. (2024). How Rains and Floods Become Groundwater: Understanding Recharge Pathways With Stable and Cosmogenic Isotopes. *Hydrological Processes*, 38(12). <https://doi.org/10.1002/hyp.70020>
- Letz, O., Siebner, H., Avrahamov, N., Egozi, R., Eshel, G., & Dahan, O. (2021). The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area. *Journal of Hydrology*, 603, 127029. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127029>



NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. (2010). In *Agua.org.mx*.

Ouma, Y., & Tateishi, R. (2014). Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *Water*, 6(6), 1515–1545. <https://doi.org/10.3390/w6061515>

Riley, D., Mieno, T., Schoengold, K., & Brozović, N. (2019). The impact of land cover on groundwater recharge in the High Plains: An application to the Conservation Reserve Program. *Science of The Total Environment*, 696, 133871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133871>

Ríos-Sánchez, K. I., Chamizo-Checa, S., Galindo-Castillo, E., Acevedo-Sandoval, O. A., González-Ramírez, C. A., Hernández-Flores, M. de la L., & Otazo-Sánchez, E. M. (2024). The Groundwater Management in the Mexico Megacity Peri-Urban Interface. *Sustainability*, 16(11), 4801. <https://doi.org/10.3390/su16114801>

Roy, S., Bose, A., Singha, N., Basak, D., & Chowdhury, I. R. (2021). Urban waterlogging risk as an undervalued environmental challenge: An Integrated MCDA-GIS based modeling approach. *Environmental Challenges*, 4, 100194. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100194>

Saaty, T. L. (n.d.). The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 345–405). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5\\_9](https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_9)

