

Conexiones entre Agua Subterránea y Ecosistemas en el Centro de México

Josué Reyes-Amaya y Elisabet V. Wehncke

Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC), Universidad Nacional Autónoma de México

Contacto

josue.reyes@uaem.edu.mx

El agua subterránea es crucial para la sostenibilidad ambiental y el desarrollo humano, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Foster & Chilton, 2003). Sin embargo, las actividades humanas como la industrialización y la agricultura, han incrementado la presión sobre los acuíferos, resultando en contaminación y explotación preocupantes (Somura et al., 2012). La dinámica del agua subterránea es esencial para comprender las interacciones entre ecosistemas. La falta de una comprensión integral de estos sistemas amenaza tanto la cantidad como la calidad del agua disponible, afectando directamente la salud de los ecosistemas y las comunidades humanas (Gleeson et al., 2010).

Para abordar estos desafíos, es fundamental entender el funcionamiento tridimensional del agua subterránea y su papel en el ciclo del agua (Carrillo-Rivera et al., 2008). La teoría de los sistemas de flujo subterráneo (Flujos de Tóth) proporciona un marco interdisciplinario para caracterizar estos sistemas complejos (Tóth, 2016). Esta teoría identifica tres tipos de sistemas de flujo subterráneo: local, intermedio y regional, cada uno con características físicas y químicas distintivas que influyen en la disponibilidad y calidad del agua (Tóth, 2016).

La región central de México presenta estas problemáticas debido a su alta diversidad geológica, altitudinal, edafológica, ecosistémica y climática, lo que crea una compleja dinámica de flujos subterráneos (Carrillo-Rivera et al., 2008). La falta de datos detallados

sobre la geometría, extensión y profundidad de los acuíferos, así como sobre las zonas de recarga y descarga, dificulta una gestión adecuada (Morales-Casique et al., 2016). La interacción entre los ecosistemas y el agua subterránea puede ser temporal o continua, y está caracterizada por una alta biodiversidad y propiedades ecológicas únicas (Boulton & Hancock, 2006).

Este estudio se centró en varios enfoques metodológicos para superar estos obstáculos. Se utilizó la teoría de los sistemas de flujo subterráneo para modelar y caracterizar los flujos locales, intermedios y regionales, proporcionando una comprensión detallada de la dinámica del agua subterránea (Tóth, 2016). Se implementaron tecnologías de información geográfica (GIS) y modelos deterministas para evaluar y mapear los niveles freáticos en el centro de México (Eamus et al., 2015). Se desarrolló un índice basado en características geoespaciales para identificar áreas de recarga, descarga y tránsito del agua subterránea, e identificar zonas para la conservación del agua subterránea y los ecosistemas asociados (Gomez et al., 2007). El objetivo principal fue investigar las conexiones entre ecosistemas y agua subterránea en el centro de México, contribuyendo significativamente al conocimiento científico en hidrogeología y ecología.

Se realizó una revisión exhaustiva de estudios previos y se seleccionaron muestras de agua subterránea basadas en su relevancia y similitud en metodologías de recolección y análisis. Esto se complementó con datos hidrogeológicos y geoquímicos de diversas fuentes, creando una base de datos robusta.

Para interpretar datos hidrogeoquímicos complejos, se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA), que permitió reducir la dimensionalidad de los datos e identificar componentes principales significativas. Además, se aplicó el algoritmo de agrupamiento k-means para dividir las muestras en grupos basados en sus propiedades fisicoquímicas, identificando patrones hidroquímicos coherentes.

Se implementaron diagramas de Piper-Hill y Stiff para clasificar e interpretar datos hidroquímicos, visualizando la composición química del agua y los procesos geoquímicos dominantes. Estos diagramas facilitaron la comparación visual de la calidad del agua entre diferentes muestras.

Se utilizaron modelos geoestadísticos para interpolar datos de niveles freáticos y generar mapas continuos, mejorando la precisión de las estimaciones hidrogeológicas. El modelo

GSGW (Ground Surface-Groundwater) de Ács & Simonffy, (2013) se implementó para evaluar la dinámica del nivel freático, utilizando modelos digitales de elevación (DEM) y características edáficas para estimar variaciones del nivel freático. Los cálculos se realizaron en Python, aplicando métodos de interpolación como IDW y filtros Gaussianos.

QGIS se utilizó para elaborar un mapa de zonificación y perfiles estratigráficos, identificando áreas de recarga, descarga y tránsito del agua subterránea, y proporcionando visualizaciones detalladas de las capas geológicas.

Estas metodologías y herramientas proporcionaron una comprensión integral de la dinámica del agua subterránea en el centro de México, identificando áreas de recarga y descarga, y ofreciendo una base sólida para la gestión sostenible del agua subterránea y la conservación de los ecosistemas asociados. Este estudio mostró la importancia de un enfoque interdisciplinario para abordar la compleja relación entre los ecosistemas y el agua subterránea en el centro de México. La teoría de los sistemas de flujo subterráneo, combinada con herramientas de modelación y análisis geoespacial, proporcionó un marco robusto para comprender y gestionar estos sistemas.

En resumen, la investigación subraya la necesidad de integrar conocimientos y metodologías de diversas disciplinas para abordar los desafíos ambientales contemporáneos. La gestión sostenible del agua subterránea y la conservación de los ecosistemas requieren de un enfoque holístico y colaborativo, que considere la complejidad de los sistemas naturales y las interacciones entre sus componentes.

Ács, T., & Simonffy, Z. (2013). A new deterministic method for groundwater mapping using a digital elevation model. *Water Supply*, 13(4), 1146–1153. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.106>

Aldous, A. R., & Bach, L. B. (2014). Hydro-ecology of groundwater-dependent ecosystems: Applying basic science to groundwater management. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3–4), 530–544. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.889296>

Boulton, A. J., & Hancock, P. J. (2006). Rivers as groundwater-dependent ecosystems: A review of degrees of dependency, riverine processes and management implications. *Australian Journal of Botany*, 54(2), 133. <https://doi.org/10.1071/BT05074>

- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Huizar-Alvarez, R., & Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 55(2), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1005-2>
- Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J., & Huete, A. (2015). Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4229–4256. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015>
- Foster, S. S. D., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1440), 1957–1972. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>
- Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M. A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M., & Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3(6), 378–379. <https://doi.org/10.1038/ngeo881>
- Gomez, L., Haesevoets, S., Kuijpers, B., & Vaisman, A. (2007). *Spatial Aggregation: Data Model and Implementation* (arXiv:0707.4304). arXiv. <http://arxiv.org/abs/0707.4304>
- Morales-Casique, E., Guinzberg-Belmont, J., & Ortega-Guerrero, A. (2016). Regional groundwater flow and geochemical evolution in the Amacuzac River Basin, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 24(7), 1873–1890. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1423-x>
- Somura, H., Takeda, I., Arnold, J. G., Mori, Y., Jeong, J., Kannan, N., & Hoffman, D. (2012). Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan. *Journal of Hydrology*, 450–451, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.032>
- Tóth, J. (2016). The Evolutionary Concepts and Practical Utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow. *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, 1(111). <https://doi.org/10.15344/ijees/2016/111>