

Evaluación de la vulnerabilidad futura de los acuíferos de México ante el cambio climático

Assessment of the Future Vulnerability of Mexico's Aquifers to Climate Change

Celso Rico Firo¹, José Luis Expósito Castillo^{1*}, Miguel Ángel Gómez Albores¹, María Vicenta Esteller Alberich¹ y Juan Manuel Esquivel Martínez²

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. rificel@gmail.com, jlexpositoc@uaemex.mx, magomeza@uaemex.mx, mvesteller@uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0007-4532-4948>, <https://orcid.org/0000-0002-5026-9302>, <https://orcid.org/0000-0002-6313-9187>, <https://orcid.org/0000-0002-5832-8741>

²Secihti - Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. jmesquivel@secihti.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1864-4501>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 18/09/2025. Aceptado: 24/11/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Rico Firo, C., Expósito Castillo, J. L., Gómez Albores, M. A., Esteller Alberich, M. V. y Esquivel Martínez, J. M. (2026). Evaluación de la vulnerabilidad futura de los acuíferos de México ante el cambio climático. *Geografía Aplicada*, 2(1), 231-253.

Resumen

La vulnerabilidad climática de los acuíferos de México se encuentra estrechamente vinculada a las variaciones en los patrones de precipitación y temperatura proyectadas bajo escenarios futuros de cambio climático. Dichas modificaciones pueden alterar la recarga natural de los acuíferos, reducir su disponibilidad y acentuar los procesos de sobreexplotación en regiones donde la demanda ya supera la oferta hídrica. En este marco se planteó como objetivo evaluar la vulnerabilidad futura de los 653 acuíferos de México ante el cambio climático, lo que permitirá proponer estrategias que ayuden a prevenir, mitigar o disminuir sus impactos. La metodología permitió proyectar la vulnerabilidad de los acuíferos mediante el análisis de series mensuales de precipitación y temperatura media a las cuales se aplicó la prueba no paramétrica Mann Kendall (MK). Este procedimiento se llevó a cabo considerando dos escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para cuatro Modelos de Circulación General (MCG). Los resultados obtenidos muestran que el número de acuíferos vulnerables es mayor con el escenario SSP5-8.5 (137 acuíferos) en comparación con el escenario SSP2-4.5 (91 acuíferos).

Palabras clave: vulnerabilidad, cambio climático, escenarios.

Abstract

The climate vulnerability of Mexico's aquifers is closely linked to variations in precipitation and temperature patterns projected under future climate change scenarios. These changes can alter the natural recharge of aquifers, reduce their availability, and accentuate overexploitation processes in regions where demand already exceeds water supply. Within this framework, the objective aimed to assess the future vulnerability of Mexico's 653 aquifers to climate change, which will allow for the proposal of strategies to help prevent, mitigate, or reduce its impacts. The methodology made it possible to project the vulnerability of aquifers by analysing monthly precipitation and average temperature series to which the non-parametric Mann Kendall (MK) test was applied. This procedure was

carried out considering two climate change scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, for four General Circulation Models (GCMs). The results obtained show that the number of vulnerable aquifers is higher in the SSP5-8.5 scenario (137 aquifers) compared to the SSP2-4.5 scenario (91 aquifers).

Keywords: vulnerability, climate change, scenarios.

1. Introducción

La vulnerabilidad de los acuíferos ante los efectos cambio climático constituye un tema de creciente interés en la gestión de los recursos hídricos subterráneos a nivel mundial (Cao et al., 2024). Particularmente en aquellas regiones donde los acuíferos ya enfrentan una situación crítica a causa de la sobreexplotación y a las consecuencias del cambio climático. (IPCC, 2022). No obstante, la creciente presión antropogénica y los cambios en los patrones de precipitación y temperatura, constituye una amenaza para la disponibilidad, cantidad y calidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población, amenazando los derechos al agua y al saneamiento de miles de millones de personas (Bordbar et al., 2023; UNESCO, 2022; Al-Najjar et al., 2022;). Las aguas subterráneas representan un componente fundamental del ciclo hidrológico y un recurso natural estratégico, debido a su papel clave como fuente de abastecimiento para el consumo de la población, la producción agrícola, la industria y el sostenimiento de los ecosistemas a nivel mundial (UNESCO, 2022). El cambio climático está transformando la distribución de las lluvias, lo que incrementa la presión sobre el agua subterránea, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Williams et al., 2025).

La vulnerabilidad de los acuíferos depende de factores, hidrogeológicos (características geológicas e hidrogeológicas), ambientales (relacionados con la calidad de los cuerpos de aguas superficiales) y socioeconómicos (cambios de uso de suelo, crecimiento poblacional). En este sentido, la adaptación requiere enfoques integrales que combinen la gestión

sostenible del agua subterránea, el fortalecimiento de la gobernanza y la aplicación de escenarios de cambio climático (IPCC, 2022; UNESCO, 2022).

Los escenarios de cambio climático constituyen herramientas que permiten representar de manera simplificada las posibles condiciones climáticas futuras, basados en un conjunto de variables como la precipitación y temperatura. Los cambios en dichas variables radican fundamentalmente en la creciente acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) que se concentran en la atmósfera (Irani et al., 2023; IPCC, 2022).

Los Modelos de Circulación General (MCG) son herramientas computacionales de alta complejidad que permiten representar y analizar el comportamiento del sistema climático, considerando distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (Iranmanesh et al., 2021). Estos modelos representan la atmósfera mediante una discretización espacial y temporal que permite resolver numéricamente los procesos físicos fundamentales incluyendo los flujos de masa, energía y cantidad de movimiento a través de sistemas de ecuaciones diferenciales. Cada MCG opera mediante una malla tridimensional en la cual se integran, en intervalos de tiempo definidos, ecuaciones de conservación que requieren capacidades de cómputo de alto rendimiento para su adecuada resolución (IPCC, 2021).

Existen diversos MCG desarrollados por distintos países, entre los más destacados se encuentran el MPI-ESM-LR (Alemania), el HADGEM2-ES (Reino Unido), el GFDL-CM3 (Estados Unidos), y el CNRM-CM5 (Francia), entre otros. Estos modelos desempeñan un papel fundamental en la simulación del clima presente y pasado, así como en la proyección de escenarios (IPCC, 2021). En México no se cuenta con un modelo propio para simular proyecciones futuras del cambio climático; no obstante, esta limitación no ha impedido el avance de investigaciones en el campo de la modelación climática. El uso integrado de diversos modelos ha hecho posible la elaboración de proyecciones para diferentes horizontes temporales, como las reportadas en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático (Arreguín et al., 2015).

Algunos estudios en México como los de (Andrade-Velázquez et al., 2023; Andrade-Velázquez et al., 2021; Arreguín et al., 2015) donde se utilizaron los niveles forzamiento radiativo, denominados Representative Concentration Pathways, (RCP por sus siglas en inglés), propuestos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014), indican que la precipitación proyectada para el periodo 2015-2039 podría disminuir ligeramente en todo el país, hasta un 6% bajo el escenario RCP4.5. En el escenario RCP6.0, se espera que las disminuciones más significativas se presenten en Sonora, Chihuahua y Coahuila, con reducciones de hasta un 15%. Para el periodo 2075-2099, durante la temporada primavera-verano, el escenario RCP6.0 proyecta que la disminución de precipitación sería menor en la mayor parte de México en comparación con el periodo 2015-2039; no obstante, en la Península de Baja California y en Sonora se estiman reducciones de hasta el 18%. Por su parte, el escenario RCP8.5 proyecta que la precipitación en primavera-verano podría disminuir hasta un 21% en Sonora y un 18% en la Península de Yucatán, mientras que en el resto del país los cambios se ubicarían en un intervalo aproximado de -3% a -12%.

El más reciente informe del IPCC, basado en el marco CMIP6 (IPCC, 2022), establece cinco escenarios de emisiones conocidos como trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés: shared socioeconomic Pathways), en los cuales los niveles de forzamiento radioactivo (RCP) se combinan con las proyecciones de cambio social esperado, proporcionando un marco más completo para evaluar los impactos futuros del cambio climático. Estudios recientes (Khardekar et al., 2025; Patel et al., 2025; Song et al., 2022) han mostrado que los modelos del CMIP6 presentan menor incertidumbre, lo que incrementa la confiabilidad en la simulación de los patrones de precipitación y temperatura en comparación con los modelos del CMIP5.

México es un país vulnerable a los efectos del cambio climático, debido a la influencia de factores naturales como su ubicación geográfica y su compleja orografía junto con procesos de deterioro ambiental, prácticas inadecuadas en el manejo de los recursos naturales, políticas públicas insuficientes y los altos niveles de vulnerabilidad social. En conjunto, estos

factores intensifican los riesgos y debilitan la capacidad de adaptación frente a los eventos extremos asociados al cambio climático (CEFP, 2024).

Ante este escenario, el objetivo del estudio fue evaluar la vulnerabilidad futura de los 653 acuíferos de México frente a los efectos del cambio climático, con el fin de proponer estrategias orientadas a la prevención, mitigación y disminución de sus impactos por el cambio climático. Para ello, se analizaron los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 derivado de cuatro MCG del CMIP6, y se aplicó la prueba no paramétrica Mann-Kendall (MK) dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos constituyen información útil para los tomadores de decisiones, facilitando la planificación e implementación de estrategias orientadas a la gestión sostenible de los acuíferos que presentan niveles altos y muy altos de vulnerabilidad.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio

México se encuentra entre los paralelos 32° 43' 06" y 14° 32' 27" de latitud norte y sur respectivamente y los meridianos 86° 42' 36" y 118° 22' 00" de longitud Oeste. Su superficie total es de 1964 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales 1959 millones corresponden a la zona continental, y el resto a las zonas insulares (CONAGUA 2023b). Debido a su ubicación geográfica, el territorio mexicano presenta una gran diversidad de climas. La zona centro y noroeste del país, clasificadas como zona árida y semiárida, abarcan aproximadamente dos terceras partes del territorio y registra precipitaciones anuales inferiores a 500 milímetros. En contraste, el sureste del país presenta un clima húmedo con precipitaciones que superan los 2000 milímetros anuales (CONAGUA 2023a).

La relevancia del agua subterránea en México se refleja en el volumen que consumen los principales usuarios. Al año 2020, el 39.4% del volumen total concesionado para usos consuntivos equivalente a 35 315 hm³ proviene de fuentes subterráneas. Para fines de gestión y administración, el territorio nacional está dividido en 653 acuíferos (Figura 1), cuya

denominación oficial fue establecida y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 2001 (CONAGUA 2023b).

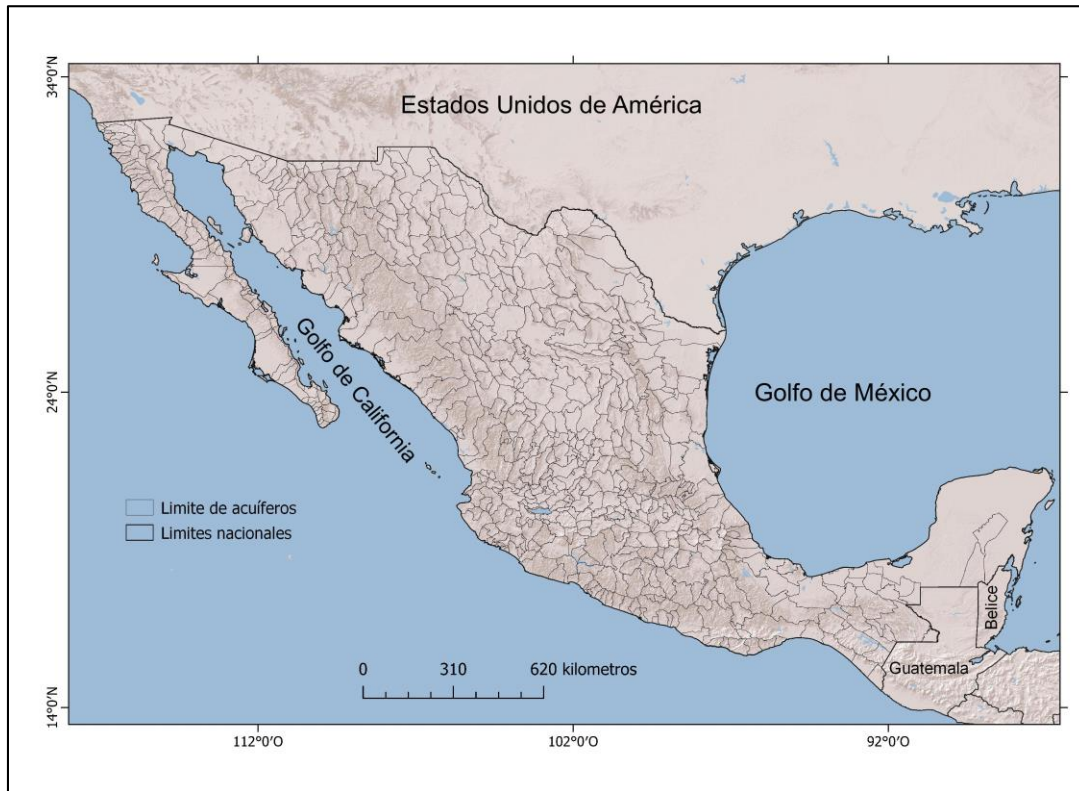


Figura 1. Zona de estudio y límite de los acuíferos.

Fuente: elaboración propia con base en los límites de los acuíferos proporcionados por el SINA, año 2020.

2.2. Materiales

La presente investigación, se enmarca en la integración del análisis de cuatro Modelos de Circulación General (MCG), considerando dos escenarios del cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. El primero caracterizado como un escenario “optimista” dado que representa una estrategia de mitigación moderada frente a los niveles de GEI, por su parte el segundo representa un escenario “pesimista”, al considerar que las políticas públicas, en general no serían efectivas para mitigar las emisiones antropogénicas de los GEI. Los datos utilizados para las variables de precipitación y temperatura están integrados por imágenes mensuales

en formato ráster con una resolución de 30" arcos de segundo(1km) aproximadamente. La temporalidad de las variables se estructuró formando series de tiempo para el periodo de tiempo (1910-2080) de dos escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de cada MCG. Estas series fueron analizadas mediante la prueba no paramétrica Mann Kendall (Mk), que permitió evaluar las tendencias de la precipitación y temperatura media, este proceso se efectuó mediante módulos automatizados dentro del software Idrisi TerrSet (Eastman, 2024).

2.3. Proceso metodológico

El proceso metodológico se desarrolló en tres etapas principales conforme al esquema de la figura 2.

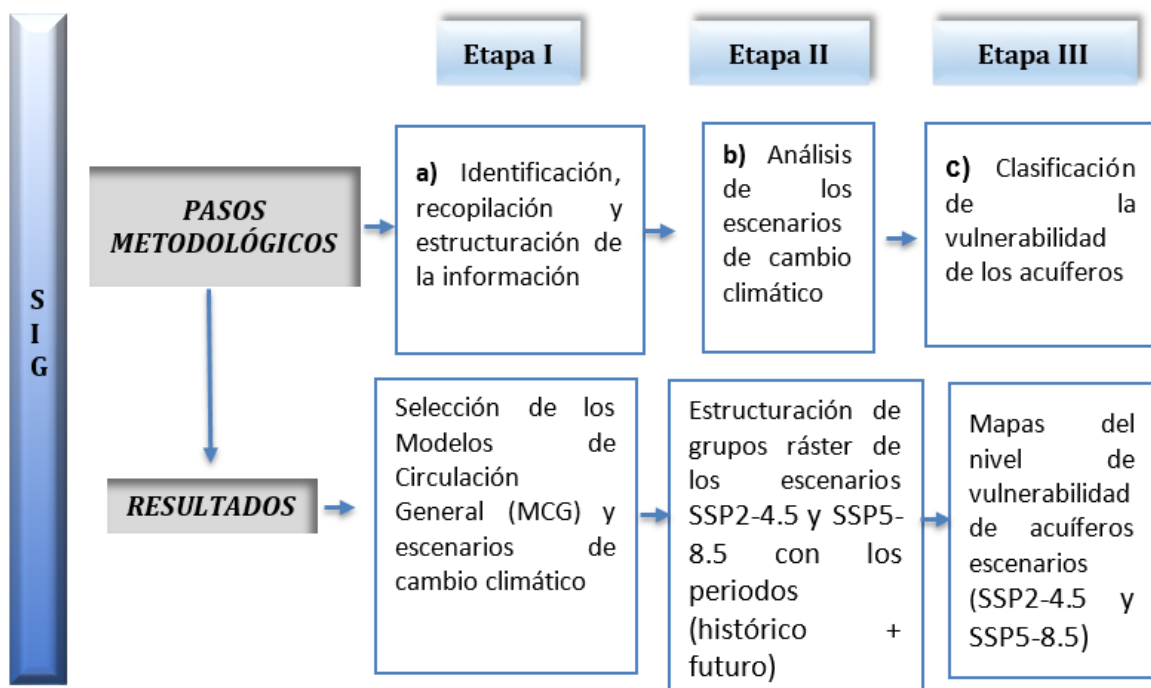


Figura 2. Esquema para el proceso metodológico.

Fuente: elaboración propia.

a) Identificación, recopilación y estructuración de la información: Se exploraron la base de datos de diferentes plataformas disponibles:

1. <https://worldclim.org/data/index.html>,
2. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>,
3. <http://www.ccafs-climate.org/>,
4. <http://chelsa-climate.org/>,

Estas plataformas registran datos del comportamiento para las variables climáticas de los periodos históricos como de periodos futuros que son la base para estructurar series de tiempo.

Posteriormente, se elaboró un inventario de los MCG utilizados en la base de datos del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados correspondientes al Sexto informe CMIP6 del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC). Para el fin del presente estudio, se consideraron datos disponibles de precipitación y temperatura media de cuatro MCG (Tabla 1), para dos escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se considero que los modelos seleccionados ya fueron previamente aplicados en México en el proyecto nacional más reciente sobre escenarios de cambio climático, titulado Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica (Cavazos et al., 2014). Adicionalmente, estos modelos han sido utilizados y evaluados en otros estudios (Manzanilla-Quiñones et al., 2021; CEPAL, 2020), los cuales evidencian que son representativos de las condiciones climáticas del país, por lo que resultan adecuados para el análisis desarrollado en este estudio.

El siguiente paso consistió en la descarga de las imágenes de los datos mensuales de precipitación y temperatura media para los periodos históricos de los años 1940 (1910-1949), 1970 (1950-1979), y 2000 (1980-2009). Estos datos se obtuvieron de la plataforma

de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Cuervo-Robayo, 2020), que ofrece la posibilidad de consultar, visualizar, y descargar cartografía temática en distintas escalas. En ella se encuentran datos climáticos de todo el país con una resolución espacial cercana a 1 km² (30 segundos de arco), disponibles en el sistema de coordenadas WGS 84.

Tabla 1. Modelos de Circulación General (MCG) seleccionados.

Modelos	Institución	Frecuencia (datos)	País
CNRM_CM6_1_HR	Centre National the Recherches Meteorologiques (CNRM-CERFACS)	Mensual	Francia
GISS_E2_1_G	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Mensual	Estados Unidos
MPI_ESM1_2_HR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Mensual	Alemania
MRI_ESM2_0	Meteorological Research Institute (MRI)	Mensual	Japón

Fuente: elaboración propia.

Los datos para los periodos futuros 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2060) y 2070 (2061-2080), correspondientes a los escenarios climáticos SSP2- 4.5 y SSP5-8.5 se consiguieron de <https://worldclim.org/data/index.html> (WORLD CLIM, 2024), portal de acceso abierto que permite acceder al conjunto de datos climáticos futuros a nivel mundial de alta resolución (1 km² con sistema de referencia WGS 84), información clave para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

b) **Análisis de los escenarios de cambio climático:** En el primer paso de esta etapa, se estructuraron los grupos ráster correspondiente a los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, considerando tanto los datos históricos como futuros. Este procedimiento se aplicó para los cuatro Modelos de Circulación General (MCG) seleccionados y para las dos variables climáticas analizadas precipitación y temperatura media. Posteriormente una vez clasificadas las imágenes en grupos ráster, de acuerdo con la estructura presentada en la tabla 2, se calcularon el acumulado anual de la precipitación y el promedio anual de

temperatura. Como resultado obtuvieron imágenes que contienen la información climática correspondiente a cada periodo individual para cada MCG.

El segundo paso consistió en generar nuevas series de tiempo a partir de las imágenes correspondientes a los datos acumulados de precipitación y a los promedios de temperatura para cada escenario climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) incorporando además los periodos históricos conforme a la estructura mostrada en la tabla 3. Cada serie se construyó con tres imágenes del periodo histórico y tres imágenes de los periodos futuros de cada SSP, respectivamente. A estas series se les aplicó la prueba no paramétrica Mann Kendall, ampliamente utilizada para identificar tendencias de los datos a lo largo plazo (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987).

Tabla 2. Estructura de los valores de cada variable para cada MCG.

MCG	Histórico			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	1940	1970	2000	2030	2050	2070	2030	2050	2070
Cnrm_cm6_1_hr	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Giss_e2_1_g	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mpi_esm1_2hr	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mri_esm2_0	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Estructura de las series de tiempo para cada MCG

MCG	Acumulado Precipitación	Promedios temperatura media
Cnrm_cm6_1_hr	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Giss_e2_1_g	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Mpi_esm1_2hr	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Mri_esm2_0	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5

Fuente: elaboración propia

Esta prueba facilita el análisis de las tendencias en series temporales climatológicas, ya que, a diferencia de las pruebas paramétricas, resulta menos sensible a la presencia de valores atípicos. Esto se debe a que se fundamenta en los rangos de los datos y no en su distribución, lo que le otorga mayor robustez estadística. Su objetivo es determinar si existe una tendencia monótona significativa ya sea creciente o decreciente de la variable en el

tiempo. El estadístico de la prueba varía entre -1 y 1 : un valor positivo indica una tendencia creciente, mientras que un valor negativo señala una tendencia decreciente (Abeyasinghe et al., 2025). Los pasos específicos de la prueba son:

1. Se enlistan los valores de las distintas variables (por ejemplo: precipitación), de forma ordenada temporalmente ($X_1, X_2, \dots, X_n$)
2. Se determina si la diferencia entre cada par de valores es positiva o negativa al comparar su magnitud ($X_j - X_k$) con ($j > k$) de acuerdo con:

$$\text{signo}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (X_j - X_k) < 0 \end{cases}$$

3. Se calcula el estadístico S , mediante la ecuación 2.1.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(X_j - X_k) \quad (2.1)$$

4. En caso de que los valores se repitan se desarrolla la ecuación 2.2.

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{8} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (2.2)$$

Donde:

n = Total de valores

t_p = Número de valores iguales

g = Grupos de empates $k-1$

Cuando el valor de S es positivo, significa que la tendencia va en aumento; si S es negativo, la tendencia disminuye. Por último, se calcula el tau (T) usando la ecuación 2.3, que es una medida de correlación entre dos variables, lo que permite determinar si la relación es creciente o decreciente, dentro de un rango que va de 1 a -1 .

$$T = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (2.3)$$

Esta prueba permitió evaluar píxel por píxel el comportamiento de la variable, permitiendo identificar la tendencia positiva o negativa de los datos para las series temporales de cada variable. Dicho proceso se realizó utilizando la herramienta Earth Trends Modeler (ETM), conjunto de herramientas de Idrisi TerrSet (Eastman, 2024), que permite evaluar las tendencias climáticas a largo plazo, examinar los comportamientos estacionales y descomponer series temporales de imágenes con el fin de identificar patrones recurrentes en el espacio y el tiempo.

El tercer y último paso de la etapa metodológica consistió en el análisis del conjunto de imágenes ráster generadas en el paso anterior, con el propósito de identificar las regiones que presentan decrementos en la precipitación y aumentos en la temperatura media de acuerdo con cada modelo y escenario utilizado. Una vez identificadas las áreas de influencia de cada variable, se procedió a realizar el ensamble de las imágenes obtenidas a partir de los cuatro MCG, considerando simultáneamente ambas variables. Este proceso permitió generar imágenes integradas que identifican las regiones con diferentes niveles de influencia de las variables analizadas, correspondientes a los escenarios seleccionados.

c) Clasificación de la vulnerabilidad de los acuíferos: Considerando que las áreas de influencia de las variables no tenían los límites definidos, se procedió a realizar la extracción de los datos a nivel de acuífero utilizando la herramienta EXTRACT del software Idrisi TerrSet (Eastman, 2024), para este proceso se utilizó la capa vectorial de los límites por acuífero disponible en la plataforma <http://sina.conagua.gob.mx> (SINA, 2024). Posteriormente, con el propósito de representar la vulnerabilidad de los acuíferos, los resultados fueron clasificados en cinco niveles jerárquicos: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo, con base en los valores obtenidos a partir de la escala de Mann-Kendall.

3. Resultados

Los resultados de evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos ante el cambio climático se presentan en la tabla 4. Esta clasificación se fundamenta en las proyecciones de la reducción

de la precipitación y el incremento de la temperatura, estas condiciones se traducen en una menor recarga de los acuíferos y, por ende, en una mayor susceptibilidad a los impactos asociados al cambio climático.

Tabla 4. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos al cambio climático con base en los valores de la escala Mann Kendall.

Nivel de vulnerabilidad	Valores Mann Kendall	No. de acuíferos con Escenario SSP2-4.5	No. de acuíferos con Escenario SSP5-8.5
Muy alto	0.81 - 1	91	137
Alto	0.61 – 0.81	113	117
Medio	0.41 – 0.61	125	142
Bajo	0.21 – 0.41	113	130
Muy bajo	0 – 0.21	211	127

Fuente: elaboración propia

La clasificación de vulnerabilidad de los acuíferos evidencia diferencias significativas de manera espacial de acuerdo con el grado de afectación asociado al fenómeno del cambio climático (Figura 3 y 4), donde se observa que los acuíferos de la región norte del país serán más vulnerables en comparación con los del centro y sur del país, de acuerdo con las variaciones proyectadas en los patrones de precipitación y temperatura.

Así mismo el análisis comparativo entre los dos escenarios utilizados manifiestan que la magnitud de la vulnerabilidad se incrementa conforme a la severidad de las proyecciones. Bajo el escenario SSP5-8.5 (Figura 4), caracterizado por ser el escenario pesimista de altos niveles de GEI donde los efectos adversos sobre los acuíferos son mayores en relación con lo observado en el escenario SSP2-4.5 (Figura 3), escenario optimista con un nivel intermedio de GEI. De tal manera que el número de acuíferos clasificados con el nivel de muy alta vulnerabilidad muestra un crecimiento sustancial pasando de un 14% (equivalente a 91 acuíferos) con el escenario SSP2-4.5 a un 21% (equivalente a 137 acuíferos) con el escenario SSP5-8.5. Este resultado evidencia que, a medida que se intensifican las condiciones climáticas extremas, también se incrementa la cantidad de acuíferos en riesgo, lo que implica mayores desafíos para la gestión sostenible del recurso hídrico en el país.

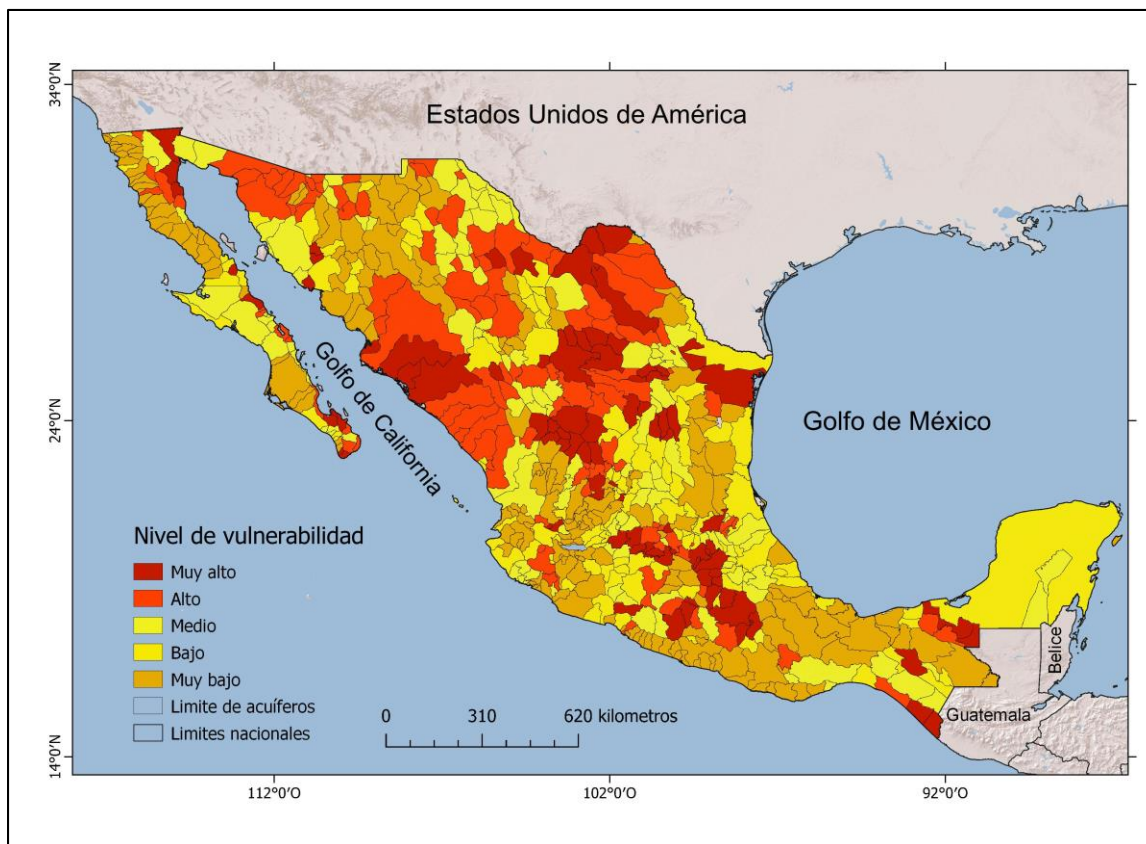


Figura 3. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos bajo el escenario SSP2-4.5.

Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, WORLD CLIM, y SINA.

Los estados que concentran a los acuíferos con el nivel de vulnerabilidad muy alto correspondiente con los dos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se presentan en la tabla 5. Mientras que, en la tabla 6, se registran a los acuíferos clasificados con un nivel muy alto de vulnerabilidad solo con el escenario SSP5-8.5.

Tabla 5. Acuíferos de México con nivel de vulnerabilidad muy alto en ambos escenarios (*acuífero sobreexplotado, ¹ acuífero con intrusión marina, ² acuífero afectado por procesos de salinización de suelos).

Estado	Clave de Acuífero	Estado	Clave de Acuífero
Chihuahua	841, 847*.	Coahuila	502 ² , 503, 506* ² , 507, 509* ² , 510*, 511*, 515, 523* ² , 524* ² , 525, 526, 527.
Sonora	2621*, 2622, 2636* ¹ .	Zacatecas	3201, 3202, 3213, 3214*, 3215, 3216, 3217, 3219, 3220 ² , 3223* ² , 3225*, 3226.

Nuevo León	1905, 1907*, 1913, 1917*, 1922, 1923.	Baja California Sur	316, 317*, 323* ² , 324*, 325*, 328.
Durango	1004*, 1011, 1026* ² .	San Luis Potosí	2407.
Sinaloa	2502, 2503, 2504, 2514.	Guanajuato	1117, 1118*, 1119, 1120*, 1121, 1122*.
Jalisco	1412, 1435, 1436*.	México	1506*, 1507*, 1508*.
Querétaro	2202*, 2209.	Hidalgo	1302, 1310, 1311, 1313, 1316.
Baja California	210* ² , 222, 237, 243.	Aguas Calientes	101*.
Chiapas	703, 709, 710.	Guerrero	1204, 1205, 1207, 1211.
Morelos	1702.	Michoacán	1601.
Ciudad de México	901*.	Oaxaca	2014, 2023.
Puebla	2103, 2106.	Tamaulipas	2802.
Tabasco	2707, 2708.	-	-

Fuente: elaboración propia.

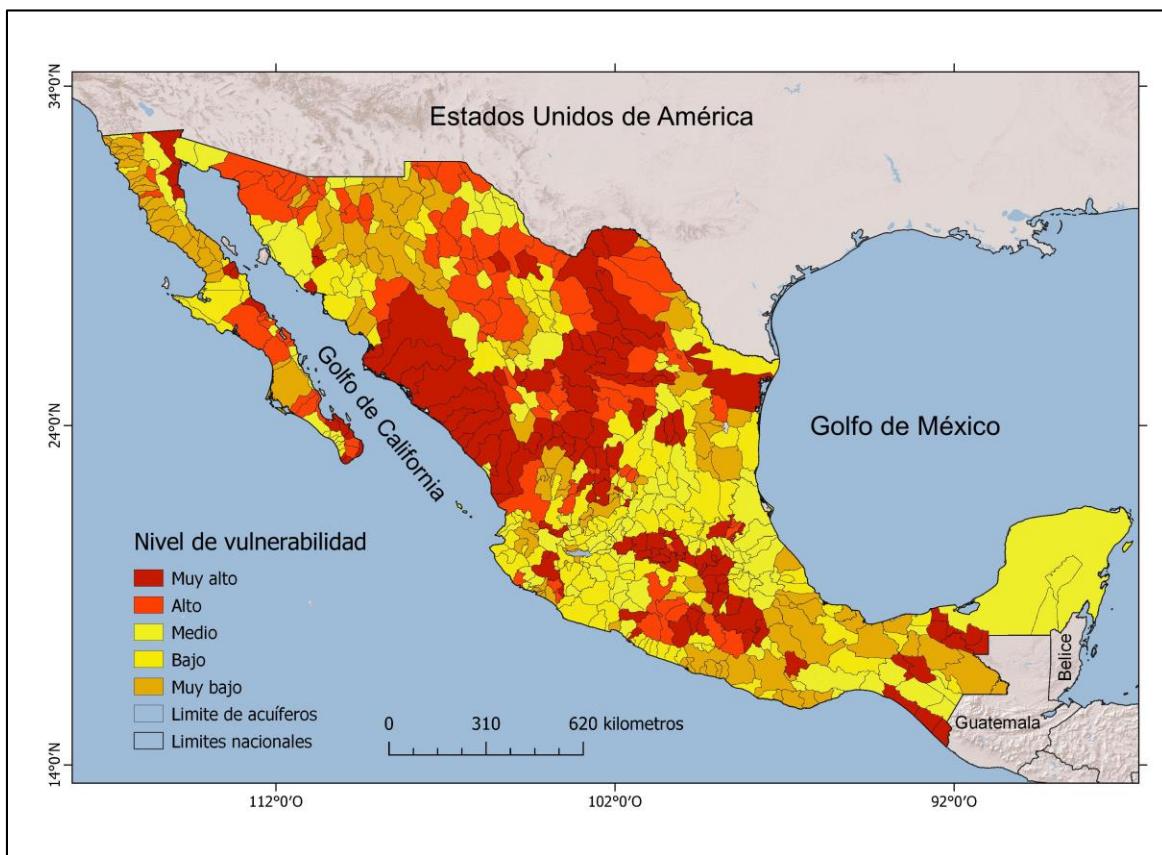


Figura 4. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos bajo el escenario SSP5-8.5.

Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, WORLD CLIM, y SINA.

Tabla 6. Acuíferos de México con nivel de vulnerabilidad muy alto bajo el escenario el escenario SSP5-8.5 (*acuífero sobreexplotado, ¹ acuífero con intrusión marina, ² acuífero afectado por procesos de salinización de suelos).

Estado	Clave de Acuífero	Estado	Clave de Acuífero
Sonora	2643.	Coahuila	504, 505, 519, 528.
Durango	1006, 1012, 1017, 1024, 1025.	Zacatecas	3211, 3212
Sinaloa	2501, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2513.	Baja California Sur	318, 321.
Jalisco	1417, 1419, 1437.	San Luis Potosí	2402.
Querétaro	2203, 2204.	Guanajuato	1107, 1115, 1116.
Baja California	242.	México	1503.
Chiapas	701, 704, 711.	Hidalgo	1306.
Morelos	1701.	Aguas Calientes	105.
Nayarit	1801, 1802.	Colima	615.
Tabasco	2706.	Guerrero	1203, 1215.
Oaxaca	2025.	-	-

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la vulnerabilidad de los acuíferos ante el cambio climático presenta una marcada variabilidad regional, lo cual refleja la influencia directa de las condiciones climáticas y fisiográficas propias de cada zona del país. Según los escenarios analizados, el norte de México es más vulnerable, debido principalmente a la reducción esperada de las lluvias y al aumento de las temperaturas. Estas condiciones favorecen una reducción en los procesos de recarga natural, lo que podría intensificar el estrés hídrico sobre los acuíferos en dichas regiones. En contraste, los acuíferos localizados en las regiones centro y sur del país muestran una vulnerabilidad relativamente menor, probablemente vinculada a una mayor disponibilidad de precipitación y, en algunos casos, a condiciones geomorfológicas más favorables para la infiltración. Este patrón espacial concuerda con lo reportado en el Informe Nacional sobre la Vulnerabilidad Hídrica ante el Cambio Climático (Arreguín et al., 2015), lo que respalda la consistencia de los resultados obtenidos y refuerza la necesidad de implementar estrategias de gestión diferenciadas que consideren las particularidades climáticas y ambientales de cada región.

Asimismo, el hecho de que más del 50 % de los acuíferos evaluados presenten niveles muy altos de vulnerabilidad y que, de manera coincidente, hayan sido clasificados como sobreexplotados en el más reciente informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023a) subraya la gravedad del escenario actual. Esta convergencia entre vulnerabilidad climática y sobreexplotación intensifica los riesgos asociados al deterioro cuantitativo y cualitativo del recurso, comprometiendo tanto la seguridad hídrica regional como la resiliencia de los sistemas socioambientales dependientes del agua subterránea. En este contexto, los resultados sugieren que, sin la adopción de medidas integrales de gestión que consideren los impactos climáticos presentes y futuros, la problemática tenderá a intensificarse rápidamente y mantenerse a lo largo del tiempo.

5. Conclusiones

El análisis de vulnerabilidad de los acuíferos mediante escenarios de cambio climático asociados a altos niveles de emisiones de GEI, como el SSP5-8.5, permite reconocer que el agua subterránea enfrenta presiones crecientes, principalmente por la disminución de la recarga natural y el aumento sostenido de las extracciones. Los resultados evidencian que las variaciones proyectadas en los patrones de precipitación y temperatura podrían intensificar la condición de sobreexplotación en un mayor número de acuíferos, especialmente en regiones áridas y semiáridas. En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer las estrategias de gestión y conservación del recurso hídrico ante un contexto climático cada vez más incierto.

Se identificó que los acuíferos del norte presentan una mayor sensibilidad ante al cambio climático en ambos escenarios, mientras que los del centro y sur muestran un grado de afectación relativamente menor. Esta heterogeneidad en la respuesta regional evidencia la necesidad de desarrollar estudios específicos y más detallados por región, a fin de complementar los resultados obtenidos.

En síntesis, la gestión sostenible del recurso hídrico requiere un enfoque integral que combine acciones de conservación, regulación y control orientadas a prevenir, mitigar o reducir los impactos del cambio climático. Por lo que resulta fundamental conservar y restaurar las zonas de recarga mediante prácticas adecuadas de manejo de suelos, reforestación y protección de áreas estratégicas para favorecer la infiltración. Del mismo modo, es indispensable regular la extracción ajustando los volúmenes concesionados a la disponibilidad real del acuífero, mejorar la eficiencia en los usos del agua y fortalecer los sistemas de monitoreo piezométrico para una supervisión continua del comportamiento del recurso. Asimismo, la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza para incrementar la infiltración y reducir la erosión. Finalmente, debe establecerse un marco estricto de restricciones para actividades de alto impacto incluida la minería dentro de las zonas de recarga, que garanticen la preservación en cantidad y calidad del agua a largo plazo.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI por el respaldo otorgado a través de una beca doctoral, que permitió la culminación de este trabajo.

7. Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés. Así mismo, los autores de este artículo nos responsabilizamos del contenido, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

8. Referencias

Abeyasinghe, U., Balkissoon S. and Aloysius, N. (2025). Assessment of hydroclimatic variability and aridity trends in the Mississippi River Basin using parametric and non-parametric techniques. *Front. Clim.* 7:1481926. [https://doi:10.3389/fclim.2025.1481926](https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1481926)

- Al-Najjar, H., Ceribasi, G., Dogan, E., Ceyhunlu, A. I., Abualtayef, M. and Qahman, K. (2022). GCMs simulation-based assessment for the response of the Mediterranean Gaza coastal aquifer to climate-induced changes. *Journal of Water and Climate Change*, 13(6), 2278-2297. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.339>
- Andrade-Velázquez, M. y Montero-Martínez, M.J. (2023). Tendencias históricas y proyectadas de la temperatura superficial media en Sur-Sureste de México utilizando ERA5 y CMIP6. *Clima2023*, 11, 111. <https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Andrade-Velázquez, M. y Medrano-Pérez, O. R. (2021). Patrones de precipitación históricos en la región Sur-Sureste de México y proyecciones futuras. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 69–84. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.87255>
- Arreguín Cortés, F. I., López Pérez, M., Rodríguez López, O. y Montero Martínez, M.J. (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015. 148 p.; 28 x 43 cm
- Bordbar, M., Rezaie, F., Bateni, S. M., Jun, C., Kim, D., Busico, G., Moghaddam, H. K., Paryani, S., Panahi, M., and Valipour, M. (2023). Global review of modification, optimization, and improvement models for aquifer vulnerability assessment in the era of climate change. *Current Climate Change Reports*, 9(4), 45-67. <https://doi.org/10.1007/s40641-023-00192-2>
- CCAFS Climate (2020). <http://www.ccafs-climate.org/>
- Cavazos T. y De Grau P. (2014). Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. Departamento de Oceanografía Física, CICESE.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe)/CAC-SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana)

- (2020). Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México.
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP) (2024). Las Políticas Públicas Federales para el cambio climático en México. Cámara de Diputados.
- CHELSA Datos climáticos gratuitos en alta resolución (2020). <http://chelsa-climate.org/>
- Clima mundial WorldClim (2024). <https://www.worldclim.org>
- Cao, C., and Ying, M. (2024). Assessing Water Resource Vulnerability in an Agricultural Basin for Climate Change Adaptation. *Water Resources Management*, 39(1). <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03966-x>
- CONAGUA (2023a). Estadísticas del agua en México. www.gob.mx/conagua. Pp. 312.
- CONAGUA (2023b). Atlas del agua en México. www.gob.mx/conagua. Pp. 158
- Cuervo-Robayo AP, Ureta C, Gómez- Albores MA, Meneses-Mosquera AK, Te´llez-Valde´s O, Martínez-Meyer E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE* 15(7): e0209808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- Eastman. (2024). IDRISI TerrSet. Geoespacial Monitoring and Modeling System. Massachusetts, United States: Clark Labs at Clark University.
- Gilbert, R. O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. New York: John Wiley and Sons.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Cooley, P. M. Zhai, et al., Eds. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Irani, M., Salimi, M., Talouki, F. G., and Roohi, M. (2024). Assessing the impacts of climate change on the vulnerability of coastal aquifers to the seawater intrusion. *Discover Civil Engineering*, 1, Article 109. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00117-4>
- Iranmanesh, R., Jalalkamali, N. y Tayari, O. (2021). Disponibilidad de recursos hídricos en diferentes escenarios de cambio climático en el sureste de Irán. 12 (8), 3976–3991. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.373>
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). London: Charles Griffin
- Khardekar, P.; Chaudhari, HS; Kumar, V.; Bhawar (2025). Proyección de la estructura vertical de las nubes y los efectos radiativos a lo largo de la región del sur de Asia en los modelos CMIP6. *Atmósfera* 2025,16, 746. <https://doi.org/>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Manzanilla-Quiñones U, Pozo-Montuy G, Delgado-Valerio P, Martínez-Sifuentes AR, Aguirre-Calderón O.A. (2021). Escenarios climáticos (CMIP-5) para la Reserva de la

- Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. I:e2588. DOI: 10.19136/era.a8n1.2588
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P. et al. (2020). Proyecciones CMIP5 de alta resolución y corregidas por sesgo para evaluaciones de impacto del cambio climático. Datos científicos 7, 7 (2020) <https://doi:10.1038/s41597-019-0343-8>
- Patel, G., Das, S. y Das, R. (2025). Un enfoque comparativo para comprender el rendimiento de los modelos CMIP6 para la temperatura máxima cerca del trópico de cáncer utilizando múltiples conjuntos de aprendizaje automático. Gestión de recursos hídricos 39, 3921–3936 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04137-2>
- Sistema Nacional de Información del Agua (2024). <https://sina.conagua.gob.mx>
- Song Y.H, Chung E.S, Shahid S. (2022). Diferencias en extremos e incertidumbres en simulaciones de escorrentía futura. Uso de SWAT y LSTM para escenarios de SSP. Sci Total Environ 838:156162
- UNESCO (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: AGUAS SUBTERRÁNEAS. Hacer visible el recurso invisible. Resumen ejecutivo.
- Williams, S.A.; Megdal, S.B.; Zuniga-Teran, A.A.; Quanrud, D.M.; Christopherson, G. (2025). Mapping Groundwater Vulnerability in Arid Regions: A Comparative Risk Assessment Using Modified DRASTIC Models, Land Use, and Climate Change Factors. Land 2025, 14, 58. <https://doi.org/10.3390/land14010058>