

Evaluación de la influencia del uso de indicadores hídricos, ambientales, económicos y sociales en la estimación de la vulnerabilidad de un sistema hidrológico ante el cambio climático

Assessment of the influence of hydrological, environmental, economic, and social indicators on the estimation of a hydrological system's vulnerability to climate change

Felipe de Jesús Ruiz Chávez¹, Adrián Martínez Bárcenas², Joanna Alicia Gutiérrez Pérez³, Ismael Orozco Medina^{3*}

¹ Maestría en Ciencias del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.

² Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, División de Ingenierías, Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Campus México.

³ Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, 36000, Guanajuato, México.

i.orocho@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Vulnerabilidad;
indicadores
ambientales;
indicadores
económicos;
indicadores sociales;
indicadores hídricos.

La evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos es fundamental para diseñar estrategias de mitigación frente al cambio climático; sin embargo, su cuantificación es compleja por la gran cantidad de variables involucradas. Para facilitar su cálculo se han empleado indicadores ambientales, económicos, sociales e hídricos. Dado su amplio uso, en este estudio se ha realizado un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de 17 indicadores en la cuantificación de la vulnerabilidad. Lo anterior se llevó a cabo utilizando el modelo MPDV1.0, que permite cuantificar la vulnerabilidad ambiental, económica, social e hídrica ante el cambio climático. Los resultados obtenidos han demostrado que seis indicadores tienen una influencia directa sobre la variabilidad de la vulnerabilidad, destacando el grado de explotación de las cuencas y el grado de explotación de los acuíferos.

Abstract

Keywords:

Vulnerability;
environmental
indicators; economic
indicators; social
indicators; water
indicators.

Evaluating the vulnerability of hydrological systems is essential for designing mitigation strategies against climate change; however, its quantification is complex due to the many variables involved. Environmental, economic, social, and water-related indicators are used to assist in its calculation. Due to its widespread use, a sensitivity analysis has been conducted in this study to assess the influence of 17 indicators on the quantification of vulnerability. To do this, the MPDV1.0 model was used, which allows for calculating environmental, economic, social, and water vulnerability to climate change. Results indicate that six indicators directly influence the variability of vulnerability, underlining the degree of watershed exploitation and aquifer exploitation.

Recibido: 15 de noviembre de 2024

Aceptado: 19 de junio de 2025

Publicado: 10 de diciembre de 2025

Cómo citar: Ruiz, F. de J., Martínez, A., Gutiérrez, J. A., & Orozco, I. (2025). Evaluación de la influencia del uso de indicadores hídricos, ambientales, económicos y sociales en la estimación de la vulnerabilidad de un sistema hidrológico ante el cambio climático. *Acta Universitaria*, 35, e4424. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2025.4424>

Introducción

El cambio climático y su impacto en los recursos hídricos genera una serie de problemas por afrontar. Temas como la escasez y la contaminación del agua, sequías e inundaciones ocurren con mayor frecuencia, afectando la seguridad hídrica (Pacheco-Treviño & Manzano-Camarillo, 2024; Rhoades et al., 2021). Los recursos hídricos guardan una relación con importantes actividades humanas, como la producción agrícola y el desarrollo industrial y económico de una región (Gleeson et al., 2012; Rossi & Peres, 2023). Esto ha impulsado a la comunidad científica a evaluar la vulnerabilidad de los recursos hídricos y promover el desarrollo de estrategias para una gestión sostenible del agua.

El concepto de vulnerabilidad se originó a partir del estudio de las amenazas naturales, se introdujo gradualmente en el campo de los impactos del cambio climático en los sistemas hidrológicos y es considerado como un concepto central en la investigación sobre cambio climático y ambiental (Janssen et al., 2006; Zhai & Lee, 2024; Gabric, 2023; Parry et al., 2007) -sobre todo en el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a fenómenos naturales- y se considera como el potencial de daño o pérdida (Balica et al., 2023; Mitchell et al., 1989).

La vulnerabilidad se encuentra en función del carácter, la dimensión y el índice de variación climática al que está expuesto un sistema, así como en su sensibilidad y capacidad de adaptación. Vista desde el estudio de cambio global, se ha definido como el grado en que un humano o sistema ambiental es propenso a experimentar daño debido a una perturbación o estrés (Birkmann et al., 2022; Luers et al., 2003). Smit & Wandel (2006) plantean que la vulnerabilidad es una función de la exposición y sensibilidad de un sistema ante condiciones de daño, así como de la habilidad, capacidad o resiliencia del sistema para enfrentar, adaptarse o recuperarse de los efectos de esas condiciones. Fuchs et al. (2007) la definen como el grado en que un individuo, familia, comunidad o región está en riesgo de sufrir una desgracia repentina y grave después de un evento natural extremo. De acuerdo con Parry et al. (2007), la vulnerabilidad es el grado en que los sistemas son capaces o incapaces de afrontar los impactos negativos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los fenómenos extremos.

La vulnerabilidad se conforma por dos elementos, uno externo y el otro interno. Un componente externo es la exposición y el riesgo a un determinado fenómeno o perturbación, relacionándose con el nivel de estrés climático de una unidad particular del análisis o del sistema (Birkmann et al., 2022; O'Brien et al., 2004). Por otra parte, el componente interno se relaciona con la capacidad para responder, anticiparse, resistir o recuperarse ante el impacto o daño del estresor externo, es decir, la sensibilidad y la capacidad adaptativa del sistema, sin olvidar que las actividades de este componente pueden llegar a ser determinantes para la vulnerabilidad, por ejemplo: factores sociales, políticos, ambientales, entre otros (Birkmann et al., 2022; Smit & Wandel, 2006).

La evaluación de la vulnerabilidad es una poderosa herramienta analítica para describir los estados de susceptibilidad al daño y es importante para guiar el análisis normativo de las acciones para mejorar el bienestar mediante la reducción del riesgo (Adger, 2006; Armaş & Albulescu, 2025). Para considerar a un sistema vulnerable se parte de la escala del análisis y el contexto de evaluación (O'Brien et al., 2004). En el caso del cambio climático, resulta útil analizar su evaluación para identificar los grados de adaptación para abordarlo (Dong et al., 2015). Sin embargo, su evaluación es compleja, ya que no es posible cuantificarla de manera directa, por lo que se hace uso de indicadores ambientales, económicos, sociales e hídricos que permiten cuantificar la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de un sistema ante una amenaza.

El uso de indicadores para evaluar la vulnerabilidad climática de manera cuantitativa es un método que toma gran relevancia, debido a que la vulnerabilidad es un fenómeno teórico que no puede medirse como un fenómeno observable (Gumel, 2022; Hinkel, 2011). Implica definir cuestiones como el objeto de estudio, considerar un marco conceptual, seleccionar los indicadores y su ponderación, así como recopilar información para construir cada indicador y presentar sus resultados (Becker *et al.*, 2015). El análisis de la vulnerabilidad por medio de indicadores presenta críticas debido a las dificultades que presenta el enfoque y a la generación de un marco que abarque las dimensiones y las distintas variables que involucran a la vulnerabilidad (Neset *et al.*, 2019). Los retos de esta forma de evaluar la vulnerabilidad incluyen la selección de los indicadores (Truong *et al.*, 2023; Vincent, 2007), la generación de un marco con un enfoque que contemple las implicaciones de la escala (Birkmann *et al.*, 2022; Eriksen & Kelly, 2006), la accesibilidad y calidad de la información (Becker *et al.*, 2015) y el tratamiento de los indicadores para ser sujetos a comparación y medición (agregación, ponderación y normalización). Sin embargo, también tiene la ventaja de que puede aplicarse a cualquier escala espacial (país, municipio, región, hogar), teniendo como limitante la incapacidad de capturar la complejidad temporal y social de los sistemas evaluados (Monterroso *et al.*, 2014). Además, la selección de indicadores, la asignación de ponderación y peso, la disponibilidad y calidad de la información que conforman los indicadores y la dificultad de probar o validar los resultados recaen en la subjetividad (Ajtai *et al.*, 2023; Luers *et al.*, 2003). El método tiene relevancia por su capacidad de monitorear tendencias en los resultados, identificar la variación de la respuesta del sistema y explorar marcos conceptuales (Figura 1).

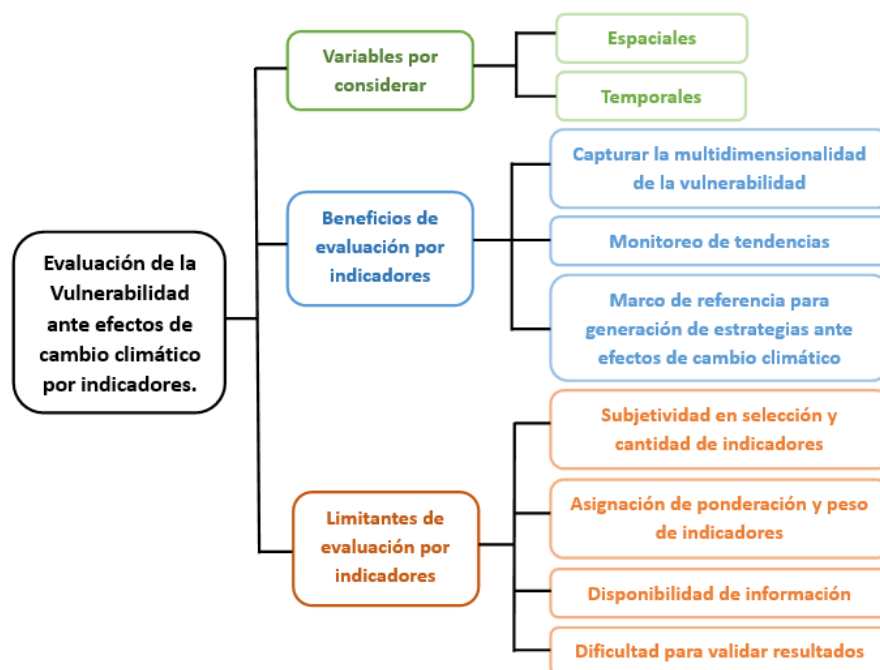


Figura 1. Variables por considerar, beneficios y limitantes al evaluar la vulnerabilidad al cambio climático a través de indicadores.

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de la vulnerabilidad a través de indicadores proporciona información de la heterogeneidad espacial y temporal de la zona evaluada. Según Hinkel (2011), se ha dado la discusión sobre su implementación, la cantidad, la variedad y la generación de nuevos y mejores indicadores. Sin embargo, es fundamental seguir promoviendo el desarrollo de metodologías basadas en indicadores, ya que estos permiten una mejor representación de la complejidad y la interacción entre sistemas socioambientales, sociohídricos y socioeconómicos. Además, es crucial considerar tanto los agentes internos como externos que influyen en la vulnerabilidad de la unidad de estudio (Turner *et al.*, 2003). Según Dong *et al.* (2015), en el desarrollo de un método para la evaluación de la vulnerabilidad es fundamental considerar un conjunto de indicadores hídricos, ambientales, económicos y sociales que representen la heterogeneidad de la zona de estudio y que sean lo suficientemente sensibles a los impactos externos como el cambio climático.

Diversos estudios han demostrado que, al comparar el desempeño de los índices compuestos para la evaluación de la vulnerabilidad en una misma región geográfica, los resultados pueden variar debido a la selección de indicadores y su ponderación (Wehbe & Baroud, 2024; Wiréhn *et al.*, 2015).

Por todo lo anterior, en este trabajo se realiza un análisis de los indicadores implementados en la evaluación de la vulnerabilidad ante los potenciales efectos del cambio climático, a partir de los resultados obtenidos en la investigación realizada por Orozco *et al.* (2020). Se plantea un marco conceptual de indicadores distribuidos de los aspectos ambiental, económico, social e hídrico, considerando los componentes de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, analizando la importancia de cada indicador en la estimación de la vulnerabilidad y su influencia en los resultados finales de la evaluación global. El análisis realizado ha permitido abordar la problemática del cambio climático con indicadores que representan los componentes hídrico, ambiental, económico y social del sistema hidrológico, considerando, además, que la escala influye dentro del análisis, teniendo diferencias originadas por las condiciones de cada región. Debido a ello, se vuelve esencial plantear la evaluación de la vulnerabilidad dependiente de la escala y el contexto del análisis (Fekete *et al.*, 2010; O'Brien *et al.*, 2004; Orozco *et al.*, 2020).

Materiales y métodos

El estudio se basa en la metodología desarrollada por Martínez *et al.* (2023) para evaluar la influencia de los indicadores ambientales, hídricos, económicos y sociales en el cálculo de la vulnerabilidad. La vulnerabilidad se ha estimado usando el modelo predictivo de vulnerabilidad (MPDV1.0) desarrollado por Orozco *et al.* (2020) y Martínez *et al.* (2023). Esta metodología emplea el modelo hidrológico distribuido TETIS (Francés *et al.*, 2007) e incorpora proyecciones climáticas de los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) del proyecto Intercomparación de Modelos Acoplados, Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Estas proyecciones se han basado en los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 del IPCC y fueron regionalizadas mediante el *downscaling* de las precipitaciones con redes neuronales artificiales (Martínez *et al.*, 2023). Para evaluar el efecto de los indicadores en la estimación de la vulnerabilidad, se utilizó un análisis de sensibilidad basado en los resultados del modelo MPDV1.0, esto con la finalidad de comprender cómo influye cada indicador en los resultados (Figura 2).

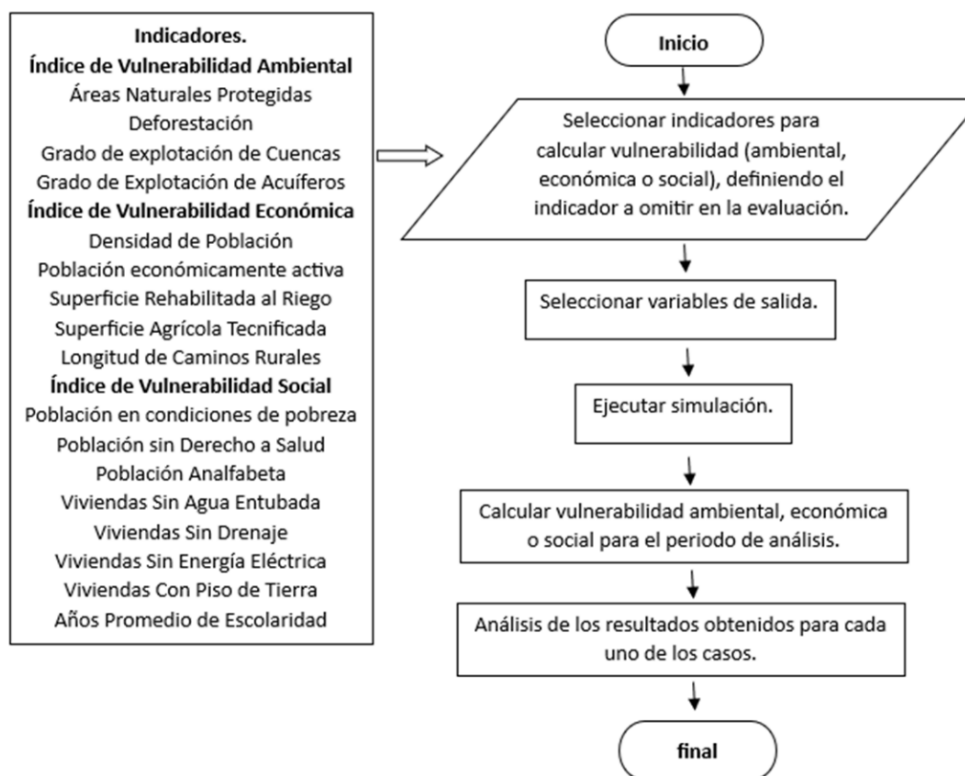


Figura 2. Proceso de análisis de indicadores con el modelo MPDV1.0.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo MPDV1.0 calcula la vulnerabilidad al cambio climático a partir de los elementos que la componen (ecuación 1). La exposición a fenómenos y la sensibilidad del sistema ante dichos fenómenos asociados al cambio climático. Además de la capacidad de adaptación del sistema, es decir, las herramientas y los elementos que ayudan a mitigar los eventos adversos, fortaleciendo a la región y a sus agentes. Permitiendo cuantificar la vulnerabilidad en función de la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Martínez *et al.*, 2023).

$$V = f(E + S - CA) \quad (1)$$

donde V es la vulnerabilidad, E es la exposición, S es la sensibilidad y CA es la capacidad de adaptación. El uso de indicadores para calcular la vulnerabilidad permite esquematizar su variación temporal y espacial en la zona de estudio. Para hacer comparables los datos, se aplicó un proceso de normalización utilizando las ecuaciones 2 y 3 (Martínez *et al.*, 2023). Esta normalización facilita el análisis y proporciona una visión más clara y estructurada de la evolución de la vulnerabilidad.

$$Xi = \frac{x_{\text{máx}} - xi}{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}} \quad (2)$$

$$Xi = \frac{xi - x_{\text{mín}}}{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}} \quad (3)$$

donde X_i es el valor normalizado de la variable x_i , mientras que x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimos y máximos. La ecuación 2 se utiliza para los indicadores que ayudan a disminuir la vulnerabilidad (los que generan capacidad de adaptación), y la ecuación 3 se utiliza cuando los indicadores involucrados fomentan el incremento de la vulnerabilidad, es decir, los que generan exposición y sensibilidad en la zona de estudio.

En la ponderación de los indicadores se implementó el método estadístico por varianza inversa, en donde se considera las desviaciones estándar de cada mapa, asignando prioridad a los mapas con las desviaciones estándar más grandes, esto se calcula de acuerdo con la ecuación 4 (Martínez *et al.*, 2023):

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\sigma_i^2}} \quad (4)$$

donde ω_i es el peso del indicador normalizado, $\sqrt{\sigma_i^2}$ es la desviación estándar del conjunto de valores del indicador i y m es el número de indicadores seleccionados.

El modelo MPDV1.0 calcula la vulnerabilidad obteniendo la media aritmética ponderada de los indicadores involucrados para evaluar los aspectos ambientales, económicos, sociales e hídricos, como se muestra en la ecuación 5 (Martínez *et al.*, 2023):

$$IVA, IVE, IVS, IVH = \sum_{i=1}^n X_i \omega_i \quad (5)$$

donde IVA es el índice de vulnerabilidad ambiental, IVE es el índice de vulnerabilidad económica, IVS se refiere al índice de vulnerabilidad social, IVH se refiere al índice de vulnerabilidad hídrica, X_i son los valores normalizados del indicador i , ω_i es el peso del indicador normalizado i y n es el número de indicadores correspondientes a cada aspecto por evaluar.

El modelo MPDV1.0 (Martínez *et al.*, 2023; Orozco *et al.*, 2020) considera 17 indicadores que representan los aspectos ambientales, económicos, sociales e hídricos (Tabla 1). Cada uno de estos aspectos se dividen en los componentes de exposición ante los agentes externos causados por el cambio climático, sensibilidad y capacidad de adaptación del componente interno del sistema hidrológico.

Tabla 1. Indicadores que usa el modelo MPDV1.0 para cuantificar los índices de vulnerabilidad ante los potenciales efectos de cambio climático.

Componente	Índice de Vulnerabilidad Ambiental (IVA)	Índice de Vulnerabilidad Económica (IVE)	Índice de Vulnerabilidad Social (IVS)	Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH)
Exposición		Densidad de Población (DP)	Población en Condiciones de Pobreza (PCP)	Grado de Explotación de Cuencas (GEC)
	Grado de Explotación de Cuencas (GEC)	Población Económicamente Activa Desocupada (PEAD)	Población sin Derechohabencia a Servicios de Salud (PSD)	
	Grado de Explotación de Acuíferos (GEA)	Grado de Explotación de Cuencas (GEC) Grado de Explotación de Acuíferos (GEA)	Grado de Explotación de Cuencas (GEC) Grado de Explotación de Acuíferos (GEA)	Grado de Explotación de Acuíferos (GEA)
Sensibilidad	Deforestación (DEF)		Viviendas sin Agua Entubada (VSA)	
			Viviendas sin Drenaje ni excusado (VSD)	
			Viviendas sin Electricidad (VSE)	
			Viviendas con Piso de Tierra (VPT)	
Capacidad de Adaptación	Áreas Naturales Protegidas (ANP)	Superficie Rehabilitada al Riego (SRR)	Años Promedio de Escolaridad (APE)	
		Superficie Agrícola Tecnificada (SAT)		
		Longitud de Caminos Rurales (LCR)		

Los indicadores propuestos para la estimación de las vulnerabilidades económica, social, ambiental e hídrica, presentados en la Tabla 1, se han calculado a partir de información proveniente de censos, mapas geográficos, imágenes satelitales, observaciones de campo y encuestas. Esta información se ha obtenido de diferentes fuentes oficiales como, por ejemplo: la Comisión Nacional del Agua (Conagua), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) y la Secretaría del Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato (SMAOT). Los indicadores se incorporan al modelo MPDV1.0 como mapas en formato ráster, generados en QGIS, con una resolución de celda de 90 m x 90 m (Figura 3).



Figura 3. Ejemplo de mapa ráster correspondiente al indicador de Áreas Naturales Protegidas (adimensional).
Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio

El área de estudio está ubicada en México, abarcando parte de los estados de Guanajuato y Jalisco. Se trata de una subcuenca del Río Turbio delimitada por la estación hidrométrica "Las Adjuntas" (Figura 4). El área de la subcuenca es de 2983 km², abarcando de manera parcial o total cinco acuíferos que son: Valle de León, Río Turbio, La Muralla, San Diego de Alejandría y San José de las Pilas.

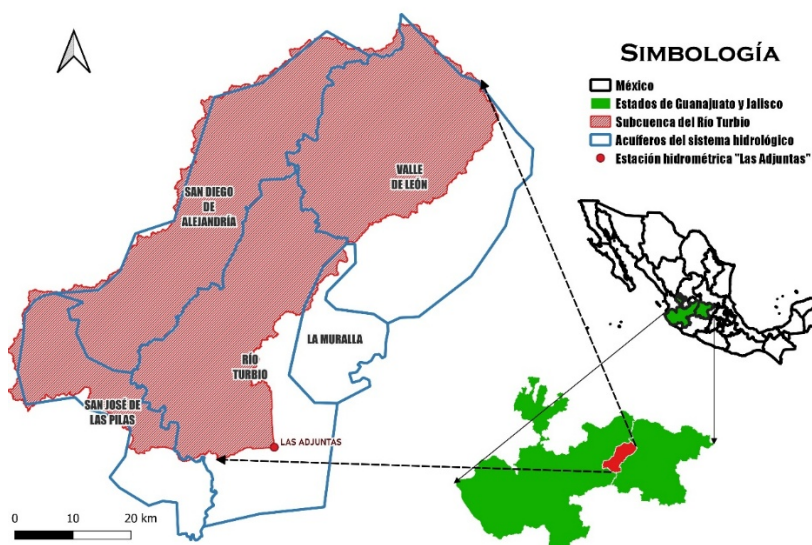


Figura 4. Ubicación de la subcuenca del Río Turbio y los acuíferos que comprende el sistema hidrológico estudiado.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

La influencia de los indicadores en el cálculo de la vulnerabilidad se ha calculado mediante un análisis de sensibilidad que ha consistido en excluir indicadores de cada aspecto y cuantificar la vulnerabilidad mediante el modelo MPDV1.0. En la interpretación y clasificación obtenida con el MPDV1.0 se ha usado la clasificación propuesta por Orozco et al. (2020) (Tabla 2). En el análisis de sensibilidad se evaluaron todos los aspectos, excepto el hídrico, ya que este se consideró en el cálculo de las vulnerabilidades ambiental, económica y social. Para garantizar condiciones equitativas en la evaluación de los indicadores, se asignó un peso de 0.5 a cada uno. El análisis se ha realizado considerando los años 2015, 2021 y 2031, los cuales, según los resultados obtenidos por Orozco et al. (2020), presentan la mayor vulnerabilidad y proyectan un aumento al futuro cercano del periodo analizado (de 2015 al 2035).

Tabla 2. Clasificación de la vulnerabilidad.

Vulnerabilidad	Rango
Baja	$0 \leq \text{índices} \leq 0.35$
Media	$0.35 < \text{índices} \leq 0.65$
Alta	$0.65 < \text{índices} \leq 1$

Fuente: Orozco et al. (2020).

Los resultados obtenidos al evaluar el índice de vulnerabilidad ambiental (IVA) muestran una marcada variación cuando se excluye uno de los indicadores en comparación con los resultados obtenidos al considerar la totalidad de los indicadores que conforman el IVA (Figura 5).

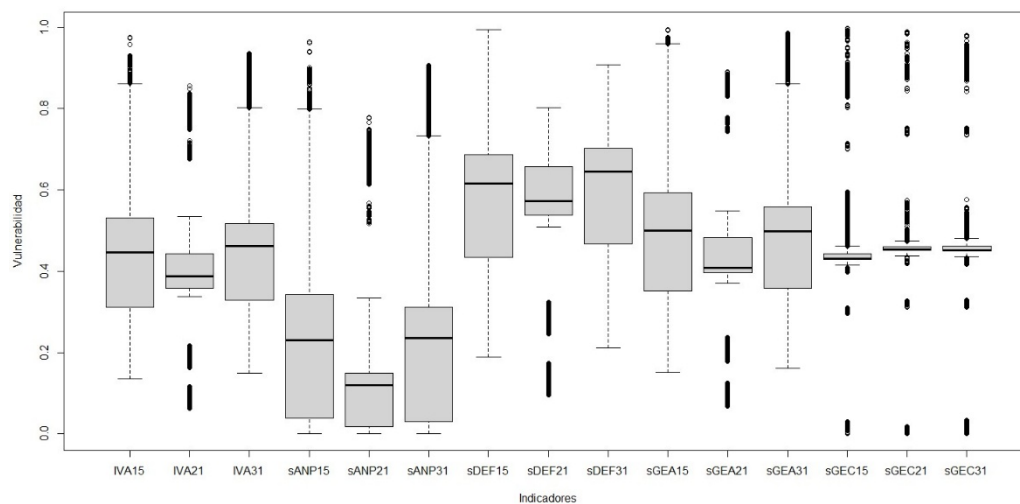


Figura 5. Variabilidad de los IVA obtenidos en el análisis de sensibilidad para los años 2015, 2021 y 2031 (a: vulnerabilidad calculada considerando todos los indicadores y b: excluyendo un indicador).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que, al excluir ciertos indicadores, como áreas naturales protegidas (ANP) en los años 2015 y 2031, y deforestación (DEF) en 2015, el rango intercuartílico se amplía, lo que sugiere una mayor variabilidad del IVA. Por otro lado, indicadores como el grado de explotación de cuencas (GEC) en 2021 y el grado de explotación de acuíferos (GEA) en 2031 presentan un rango intercuartílico más estrecho, lo que indica una menor variabilidad del IVA. También se observan valores atípicos (*outliers*) representados por puntos fuera de los bigotes. Estos valores son más frecuentes cuando se excluyen ciertos indicadores, como el ANP en 2015 y 2031; el GEA en 2021 y 2031; y el GEC en 2015, 2021 y 2031. Lo anterior indica que, aunque la mayoría de los datos están concentrados en un rango específico, existen valores que se alejan significativamente de la tendencia general para estos indicadores, lo cual denota una mayor incertidumbre en el IVA cuando se excluyen esos indicadores.

En el caso del índice de vulnerabilidad económica (IVE), se observa que, al excluir el indicador de población económicamente activa desocupada (PEAD) en los años 2021 y 2031, la caja se amplía y la dispersión de los valores del IVE aumenta (Figura 6), lo que indica una alta variabilidad al excluir este indicador. Esto sugiere que el indicador PEAD tiene un impacto significativo en la estabilidad de la estimación de vulnerabilidad y que su ausencia causa una mayor dispersión en los resultados.

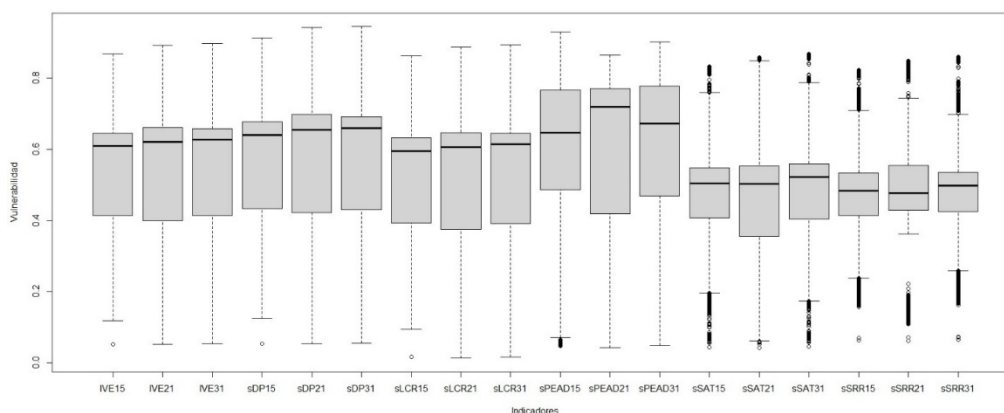


Figura 6. Variabilidad de los IVE obtenidos en el análisis de sensibilidad para los años 2015, 2021 y 2031 (a: vulnerabilidad calculada considerando todos los indicadores y b: excluyendo un indicador).

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el indicador de superficie agrícola tecnificada (SAT) muestra un impacto menor en la variabilidad de la vulnerabilidad en los tres años analizados; en otras palabras, indica que podría ser menos determinante en la estimación de vulnerabilidad en comparación con los demás indicadores. Sin embargo, cuando se excluye este indicador, se presenta el mayor número de *outliers*. Nuevamente, esto indica que el IVE calculado es significativamente distinto, dicho de otro modo, existen valores que se alejan significativamente de la tendencia general de la vulnerabilidad.

Al evaluar el índice de vulnerabilidad social (IVS) se observa que omitir uno de los indicadores con los que se construye no presenta variabilidad significativa respecto a la evaluación considerando todos los indicadores (Figura 7). Solo para el caso del indicador viviendas con piso de tierra (VPT) se observa una ligera disminución del IVS al omitir su presencia en el análisis.

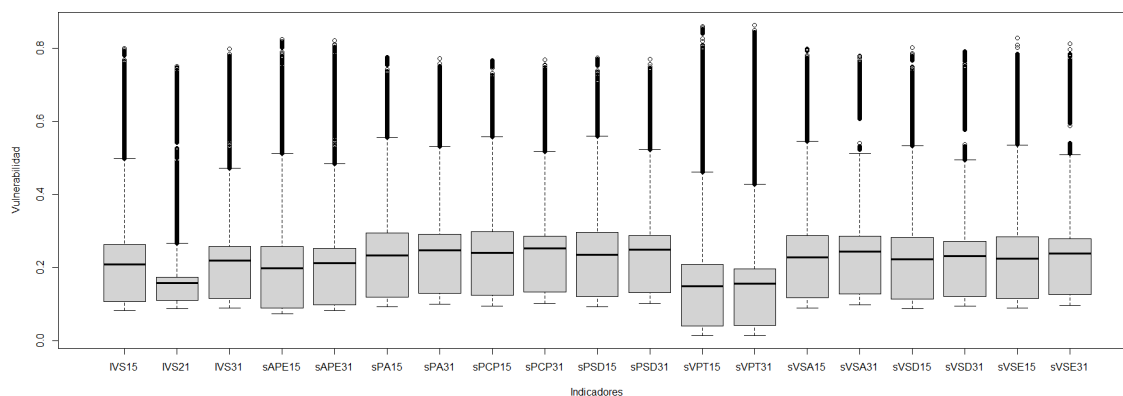


Figura 7. Variabilidad de los IVS obtenidos en el análisis de sensibilidad para los años 2015 y 2031 (a: vulnerabilidad calculada considerando todos los indicadores y b: excluyendo un indicador).

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El análisis de sensibilidad ha revelado la relación entre la cantidad de indicadores y su impacto en los resultados de vulnerabilidad. A medida que se incrementa el número de indicadores, el efecto individual de cada uno se reduce, de modo que su exclusión en la evaluación no genera variaciones significativas en los resultados.

El análisis de sensibilidad del índice de vulnerabilidad ambiental muestra que la exclusión de ciertos indicadores, como ANP y Deforestación, provoca una mayor variabilidad en los resultados de vulnerabilidad, especialmente en los años 2015 y 2031. Esto se refleja en un rango intercuartílico más amplio y en la aparición de *outliers*, es decir, valores extremos que podrían indicar casos inusuales o variabilidad significativa de la vulnerabilidad, lo cual sugiere que estos indicadores son críticos para mantener la estabilidad en la estimación de la vulnerabilidad ambiental.

En el índice de vulnerabilidad económica, la exclusión del indicador de Población económicamente activa desocupada en los años 2021 y 2031 genera una alta dispersión en los valores de vulnerabilidad, indicando que este indicador tiene un impacto significativo en la estabilidad de la vulnerabilidad. La variabilidad observada al omitir este indicador sugiere que es determinante en la cuantificación precisa de la vulnerabilidad económica.

En el caso del índice de vulnerabilidad social, la exclusión de cualquier indicador en general no afecta significativamente los resultados de vulnerabilidad, excepto en el caso del indicador Viviendas con piso de tierra, cuya omisión produce una leve disminución en los valores de vulnerabilidad. Esto indica que la estructura del índice de vulnerabilidad social es más robusta frente a la falta de algunos indicadores, aunque la presencia de cada uno contribuye a una evaluación más completa y precisa.

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento asignado al Proyecto 210/2024 dentro de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2024.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Ajtai, I., Stefanie, H., Maloş, C., Botezan, C., Radovici, A., Bizau-Carstea, M., & Baci, C. (2023). Mapping social vulnerability to floods. A comprehensive framework using a vulnerability index approach and PCA analysis. *Ecological Indicators*, 154, 110838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110838>
- Armaş, I., & Albulescu, A. (2025). From static to dynamic: conceptual and operational developments of vulnerability. *iScience*, 28(3). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112070>
- Balica, S. F., Dinh, Q., & Popescu, I. (2023). Chapter 4 - Vulnerability and exposure in developed and developing countries: large-scale assessments. En J. F. Shroder, P. Paron & G. Di Baldassarre (eds.), *Hazards and Disasters Series* (pp. 103-143). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819101-9.00013-3>
- Becker, D., Schneiderbauer, S., Forrester, J. M., & Pedoth, L. (2015). *Guidelines for development of indicators, indicator systems and provide challenges*. White Rose Research Online. https://eprints.whiterose.ac.uk/103026/1/24_06_2015_emBRACE_Del_3_5_final.pdf
- Birkmann, J., Jamshed, A., McMillan, J. M., Feldmeyer, D., Totin, E., Solecki, W., Ibrahim, Z. Z., Roberts, D., Kerr, R. B., Poertner, H., Pelling, M., Djalante, R., Garschagen, M., Leal, W., Guha-Sapir, D., & Alegría, A. (2022). Understanding human vulnerability to climate change: a global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of the Total Environment*, 803, 150065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150065>
- Dong, Z., Pan, Z., An, P., Wang, L., Zhang, J., He, D., Han, H., & Pan, X. (2015). A novel method for quantitatively evaluating agricultural vulnerability to climate change. *Ecological Indicators*, 48, 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.032>
- Eriksen, S. H., & Kelly, P. M. (2006). Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), 495-524. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-3460-6>
- Fekete, A., Damm, M., & Birkmann, J. (2010). Scales as a challenge for vulnerability assessment. *Natural Hazards*, 55, 729-747. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9445-5>
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Fuchs, S., Heiss, K., & Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5), 495-506. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007>
- Gabric, A. J. (2023). The climate change crisis: a review of its causes and possible responses. *Atmosphere*, 14(7), 1081. <https://doi.org/10.3390/atmos14071081>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & Van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>

- Gumel, D. Y. (2022). Assessing climate change vulnerability: a conceptual and theoretical review. *Journal of Sustainability and Environmental Management*, 1(1), 22–31. <https://nepjol.info/index.php/josem/article/view/43527>
- Hinkel, J. (2011). "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002>
- Janssen, M. A., Schoon, M. L., Ke, W., & Börner, K. (2006). Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change. *Global Environmental Change*, 16(3), 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.001>
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00054-2)
- Martínez, A., Herrera, M., López, J., & Orozco, I. (2023). Coupled model for assessing the present and future watershed vulnerabilities to climate change impacts. *Water*, 15(4), 711. <https://doi.org/10.3390/w15040711>
- Mitchell, J. K., Devine, N., & Jagger, K. (1989). A contextual model of natural hazard. *Geographical Review*, 79(4), 391–409. <https://doi.org/10.2307/215114>
- Monterroso, A., Fernández, A., Trejo, R. I., Conde, A. C., Escandón, J., Villers, L., & Gay, C. (2014). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Universidad Autónoma de México. <https://atlasclimatico.unam.mx/VyA/#6>
- Neset, T., Wiréhn, L., Opach, T., Glaas, E., & Linnér, B. (2019). Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: the case of Swedish agriculture. *Ecological Indicators*, 105, 571–580. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042>
- O'Brien, K., Sygna, L., & Haugen, J. E. (2004). Vulnerable or resilient? A multi-scale assessment of climate impacts and vulnerability in Norway. *Climatic Change*, 64, 193–225. <https://doi.org/10.1023/b:clim.0000024668.70143.80>
- Orozco, I., Martínez, A., & Ortega, V. (2020). Assessment of the water, environmental, economic and social vulnerability of a watershed to the potential effects of climate change and land use change. *Water*, 12(6), 1682. <https://doi.org/10.3390/w12061682>
- Pacheco-Treviño, S., & Manzano-Camarillo, M. G. F. (2024). Review of water scarcity assessments: highlights of Mexico's water situation. *WIREs Water*, 11(4), e1721. <https://doi.org/10.1002/wat2.1721>
- Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J., van der Linden, P., & Hanson, C. (eds.) (2007). *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Rhoades, A. M., Risser, M. D., Stone, D. A., Wehner, M. F., & Jones, A. D. (2021). Implications of warming on western United States landfalling atmospheric rivers and their flood damages. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100326>
- Rossi, G., & Peres, D. J. (2023). Climatic and other global changes as current challenges in improving water systems management: lessons from the case of Italy. *Water Resources Manage*, 37, 2387–2402. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03424-0>
- Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>
- Truong, P. M., Le, N. H., Hoang, T. H. D., Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. D., Kieu, T. K., Nguyen, T. N., Izuru, S., Le, V. H. T., Raghavan, V., Nguyen, V. L., & Tran, T. A. (2023). Climate change vulnerability assessment using GIS and fuzzy AHP on an indicator-based approach. *International Journal of Geoinformatics*, 19(2), 39–53. <https://doi.org/10.52939/ijg.v19i2.2565>
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>

- Vincent, K. (2007). Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. *Global Environmental Change*, 17(1), 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.009>
- Wehbe, C., & Baroud, H. (2024). Limitations and considerations of using composite indicators to measure vulnerability to natural hazards. *Scientific Reports*, 14, 19333. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68060-z>
- Wiréhn, L., Danielsson, Å., & Neset, T. S. (2015). Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change. *Journal Of Environmental Management*, 156, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.020>
- Zhai, L., & Lee, J. (2024). Investigating vulnerability, adaptation, and resilience: a comprehensive review within the context of climate change. *Atmosphere*, 15(4), 474. <https://doi.org/10.3390/atmos15040474>