



Selección de indicadores para evaluar la seguridad hídrica

Selection of indicators to assess water security

Ximena Pacheco Guerrero¹ ✉, Xitlali Virginia Delgado Galván² , José de Jesús Mora Rodríguez² , Alejandro Fidel Flamenco Sandoval², Jesús Alejandro Prieto Amparán³

¹ División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.

² Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México.

³ Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Resumen

La cuenca del río Turbio tiene fuerte actividad industrial y agrícola, ambas actividades demandan grandes cantidades de agua. La gestión del agua debe considerar las necesidades de la población, actividades económicas y del ambiente. El objetivo es la selección y ponderación de indicadores para evaluar la seguridad hídrica de la cuenca. Se realiza una revisión bibliográfica para obtener un conjunto de indicadores agrupados en las dimensiones: socioeconómico, ambiente, fenómenos hidrometeorológicos y calidad del agua y la ponderación mediante Analytic Hierarchy Process (AHP). Los valores obtenidos indican que la dimensión socioeconómica es la más relevante con 0.34, siguiendo ambiente con 0.33, después calidad con 0.17 y los fenómenos hidrometeorológicos con un valor de 0.16.

Palabras clave: seguridad hídrica, indicadores, cuenca, AHP.

Abstract

The Turbio river basin has strong industrial and agricultural activity, both of which require large amounts of water. Water management must consider the needs of the population, economic activities, and the environment. The objective is to select and weight indicators to assess the basin's water security. A literature review is conducted to obtain a set of indicators grouped into the following dimensions: socioeconomic, environment, hydrometeorological phenomena, and water quality, and weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The values obtained indicate that the socioeconomic dimension is the most relevant with 0.34, followed by the environment with 0.33, then quality with 0.17, and phenomena with a value of 0.16.

Keywords: Water security, indicators, basin, AHP.

Introducción

El concepto de seguridad hídrica surge en el año 2000, y con ello surge la primera definición: “cada persona tenga acceso a suficiente agua potable a un costo asequible para llevar una vida limpia, sana y productiva, garantizando al mismo tiempo que el medio natural se proteja y mejore” (Global Water Partnership, 2000). Por su parte, la UNESCO menciona que la seguridad hídrica consiste en “mantener un equilibrio entre la disponibilidad y la demanda de agua. Para protegerse contra las inundaciones y sequías extremas reduciendo los riesgos hídricos y ampliando el acceso a servicios de agua seguros y fiables” (UNESCO-IHE, 2009), por último existe una definición que se ha utilizado por varios autores para la construcción de índices: “la disponibilidad de una cantidad y calidad aceptables de agua para la salud, para el desarrollo de la vida humana, los ecosistemas y la producción junto con un

nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua para las personas, el medio ambiente y la economía” (Grey y Sadoff, 2007).

La definición es esencial para realizar una valoración, ya que para el proceso de valorización es necesario establecer el objeto de medición, después se debe delimitar el espacio donde se va a medir y finalmente se establece el

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

Ximena Pacheco Guerrero

x.pachecoguerrero@ugto.mx

Como citar

Pacheco Guerrero X, Delgado Galván XV, Mora Rodríguez JJ, Flamenco Sandoval AF, Prieto Amparán JA (2026). Selección de indicadores para evaluar la seguridad hídrica. *Ciencia Nicolaita* 97:51-61. DOI:[10.35830/cn.vi97.926](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.926)

conjunto de herramientas e información disponible para la medición (Salvatore-Olivares *et al.*, 2019).

En una cuenca se encuentran condiciones particulares de relieve, clima y tipo de suelo y vegetación que influyen en los procesos hidrológicos que determinan la cantidad y calidad del agua, así como la distribución espacial y temporal (Burgos *et al.*, 2015), por lo que resulta un espacio ideal para medir la seguridad hídrica.

Como herramienta de medición se hace uso de indicadores ya que estos cuantifican la información usando datos diferentes y variados, esta información se sintetiza con el objetivo de explicar fenómenos (Gabrielsen y Bosch, 2003). Los indicadores deben mostrar claridad en la información que proporcionan, deben contar con los datos necesarios de acuerdo con lo que se debe medir, se debe disponer con los medios para monitorear la información y por último deben aportar una cantidad suficiente de información que permita evaluar el proyecto en general (CONEVAL, 2014). Por otro lado, los indicadores tienen limitaciones ya que trabajan con datos agrupados puede ocurrir que los detalles se omitan por lo que puede resultar en una pérdida información significativa (Salvatore-Olivares *et al.*, 2019).

La escasez hídrica se presenta a nivel mundial y se incrementa a causa del cambio climático, el crecimiento demográfico, los patrones de consumo, el desarrollo socioeconómico y la contaminación del agua dulce (UNESCO, 2023). El monitoreo de los recursos hídricos ayuda a los países a evaluar, predecir y controlar problemas además permite plantear un uso sostenible (Kamboj *et al.*, 2020).

En México, los principales factores que afectan a la seguridad hídrica son la urbanización y el crecimiento demográfico, los procesos industriales, la producción de energía, los efectos del cambio climático, la contaminación del agua y una gestión del agua deficiente (Martínez Austria *et al.*, 2018).

La cuenca del río Turbio está ubicada principalmente en Guanajuato y en menor medida en Jalisco, ambos estados presentan actividad industrial y agrícola. Guanajuato, es el sexto estado más poblado a nivel nacional.

La situación de la seguridad hídrica se ha estudiado anteriormente usando índices y se observó una tendencia a utilizar indicadores agrupados en distintas dimensiones clave, donde cada una de estas dimensiones debe tener el objetivo de describir un componente de la seguridad hídrica en la zona de estudio. Los elementos de cada índice fueron comparados y las dimensiones clave que más se repiten son: socioeconómico, ambiente, fenómenos hidrometeorológicos y calidad del agua (PRI, 2007; ADB, 2013; van Beek y Lincklaen Arriens, 2016).

Los indicadores seleccionados responden a una com-

paración de los indicadores usados en los índices ya existentes (Cervera Gómez, 2007; González *et al.*, 2007; Lautze y Manthrilake, 2012; van Beek y Lincklaen Arriens, 2016), la información disponible en la zona de estudio y los criterios de calidad para indicadores (CONEVAL, 2014).

Con el propósito de evaluar la seguridad hídrica, los indicadores deben ser ponderados, esto se logra aplicando Analytic Hierarchy Process (AHP), que es un método de decisión multicriterio que permite convertir la opinión en un valor numérico (Saaty, 1977). Es un proceso sencillo y de rápida aplicación que se utiliza con variados objetivos como procesos de planificación, para la selección de la mejor alternativa, la asignación de recursos, entre otras (Omkarprasad y Sushil, 2006). Por lo que el objetivo de este trabajo es determinar la ponderación o asignar un valor numérico a cada una de las dimensiones clave y de los indicadores utilizando AHP.

Materiales y métodos

Descripción de área de estudio

La cuenca del río Turbio se localiza al suroeste del estado de Guanajuato (60%) y noreste del estado de Jalisco (40%), en total tiene un área de 2913 km², (**Figura 1**). Aproximadamente en la cuenca del río Turbio hay 1,902,876 habitantes, esta cantidad se obtiene de la “delimitación de colonias y otros asentamientos humanos del 2024” proporcionada por (INEGI, 2024).

El estado de Guanajuato contribuye con 4.3 al PIB nacional, en comparación con los demás estados, se encuentra en el sexto lugar de mayor aportación. Las actividades terciarias principalmente el comercio aportan el 57.6% del PIB, le sigue las actividades secundarias con el 38.7% y finalmente las actividades primarias aportan el 3.7% del PIB estatal (INEGI, 2020), sin embargo, la serie VII de uso de suelo y vegetación indica que la agricultura se practica en el 54% de la cuenca del río Turbio (INEGI, 2018).

Guanajuato se caracteriza por la actividad industrial porque el estado de Guanajuato ofrece una ubicación estratégica, costos accesibles y mano de obra calificada además de disponibilidad de agua subterránea (Sandoval Cabrera *et al.*, 2024), aunque se ha demostrado que los acuíferos en la cuenca del río Turbio (río Turbio, San Diego de Alejandría, San José de las Pilas y Valle de León) presentan un déficit de la disponibilidad media anual de agua subterránea (CONAGUA, 2023).

Metodología

Se realiza una revisión de la bibliografía de índices enfo-

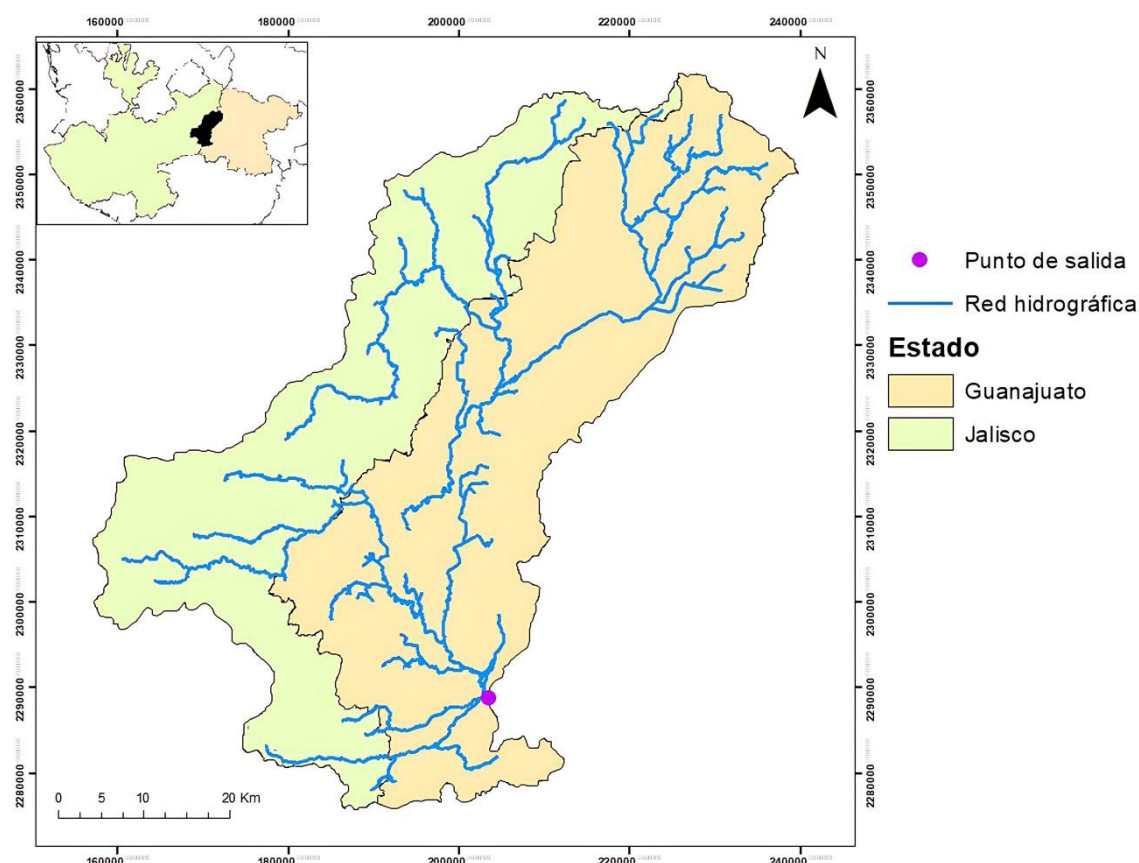


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Turbio.

cados a evaluar la seguridad hídrica a diferentes escalas: mundial, país, estado, municipio y cuencas. También se consideran otros índices enfocados a la sustentabilidad de cuencas principalmente para conocer los aspectos que se debe evaluar a escala cuenca.

Para la selección de dimensiones clave e indicadores, se compara el contenido de los índices y así determinar las dimensiones clave más utilizadas. El proceso para seleccionar los indicadores es similar, así se obtiene una primera propuesta de elementos para el índice de seguridad hídrica para la zona de estudio.

Este primer grupo de dimensiones clave e indicadores se debe comparar con las bases de datos disponibles, por ejemplo: el Sistema Nacional de Información del agua (SINA), el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Secretaría de Agua y Medio Ambiente (SAMA). Estas fuentes de información son seleccionadas porque proporcionan una base de datos adecuada y con coincidencia en la temporalidad.

Por último, los indicadores seleccionados deben cumplir con los criterios propuestos por (CONEVAL, 2014):

Relevante: Debe proveer información importante y con sentido práctico del objetivo que se quiere medir.

Adecuado: El indicador aporta una base suficiente de información para emitir un juicio respecto a lo que se desea medir.

Monitoreable: Claridad en el medio de cálculo del indicador e información que se requiere para hacerlo, así como la frecuencia de la información.

Claro: La definición de las variables es clara y los términos técnicos se explican

La **Tabla 1** muestra un resumen de los índices consultados y los indicadores que los compone. Las dimensiones clave se encuentran con frecuencia en los índices y hacen referencia a características sociales, económicas, administración del agua, calidad fisicoquímica del agua y respuesta ante inundaciones y sequías. Cada una de las dimensiones se compone de indicadores, los que aparecen con mayor frecuencia se relacionan a la disponibilidad del agua, accesibilidad al recurso en la vivienda, presión por actividades

Tabla 1. Resumen de los componentes principales de índices de seguridad hídrica consultados

Índice/Dimensiones clave	Socioeconómico						Ambiente		Fenómenos hidrometeorológicos				Calidad del agua y salud	
Indicadores	Servicios sanitarios	Toma domiciliaria	Educación	Tasa ocupación	Marginación	Presión por actividades económicas	Salud ecosistema	Situación acuiferos	Resiliencia inundaciones	Resiliencia a ciclones	Resiliencia a sequía	Aguas residuales tratadas	Calidad agua	Mortalidad infantil
Índice Canadiense de Sostenibilidad del Agua (PRI, 2007)	x	x	x	x			x	x						x
Indicadores para evaluar la seguridad hídrica (Cervera Gómez, 2007)	x	x										x		
Índice de Desarrollo Sostenible (González, Espinoza, y Escalante, 2007)	x	x	x	x	x			x					x	x
Indicadores de Sustentabilidad Hídrica (Aparicio-Mijares <i>et al</i> , 2011)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	
SH nivel nacional (Lautze y Manthritlake, 2012)	x	x				x	x	x	x	x	x			
Índice Nacional de Seguridad Hídrica (ADB, 2013)	x	x				x	x	x	x	x	x			
Índice de seguridad hídrica con enfoque a cuencas (van Beek y Lincklaen Arriens, 2016)	x	x							x	x	x			
Evaluación de la seguridad hídrica para comunidades rurales, remotas y marginadas (Dickson, Schuster-Wallace, y Newton, 2016)	x	x					x	x	x	x	x		x	x
Índice Global de Seguridad Hídrica (Gain, Giupponi, y Yoshihide, 2016)	x	x			x	x	x	x	x	x	x		x	
Indicadores de seguridad hídrica urbana: Desarrollo y prueba piloto (Jensen y Wu, 2018)	x	x				x	x	x	x	x	x		x	x
Valoración de la SH con enfoque a cuenca hidrográfica (Salvatore-Olivares <i>et al</i> , 2019)	x	x				x	x	x	x	x	x			
Índices de seguridad hídrica a nivel municipal en México (Arreguin Cortes <i>et al</i> , 2019)	x	x							x	x	x	x		

económicas, protección al ambiente, la calidad del agua y la capacidad de respuesta a inundaciones y la sequía.

Posterior al resumen de los indicadores que se presentan con mayor frecuencia en los índices de seguridad hídrica consultados se realizó un árbol de decisiones que resume los indicadores seleccionados para evaluar la seguridad hídrica en la cuenca del río Turbio que se compone de cuatro dimensiones clave y 13 indicadores (**Figura 2**).

Ponderación

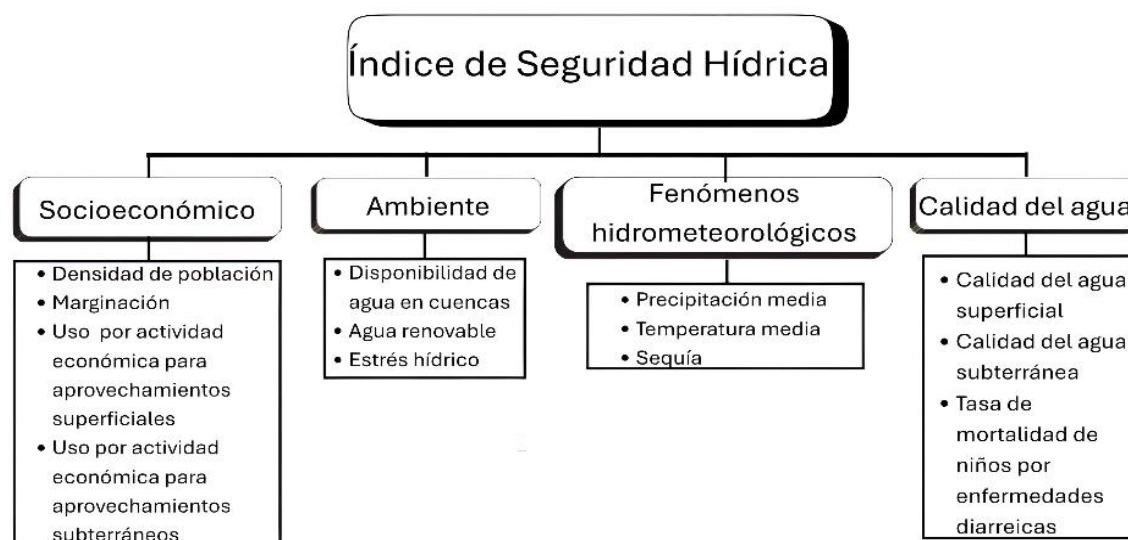
Los indicadores antes mencionados se presentaron durante las “entrevistas a expertos”. En esta herramienta se le solicita a cada experto una estimación directa de su criterio

(Mendoza *et al.*, 2019) para esto es necesario establecer contacto con personas que su formación profesional o laboral los mantenga familiarizados con el tema de seguridad hídrica.

El perfil deseable de un experto para participar en las entrevistas puede incluir a profesionales que se enfoquen en sustentabilidad, gestión de recursos hídricos, saneamiento y tratamiento del agua, economía ecológica y asociaciones ciudadanas.

A los entrevistados se les proporciono un documento en EXCEL, con las matrices previamente establecidas por lo que se aplicaron cinco matrices, una es destinada a obtener el valor de las dimensiones clave y una matriz

Figura 2. Componentes de índice de seguridad hídrica



para asignar los valores de cada uno de los indicadores que forman parte de las dimensiones.

El método AHP

El proceso comienza con el conjunto de criterios, $C = \{C_j | j = 1, 2, \dots, n\}$. La comparación entre pares de los criterios forma una matriz de evaluación $A(n \times n)$ en la que cada elemento $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ es el cociente de pesos de los criterios, como se muestra a continuación, en la ecuación 1.

$$A = [a_{11} a_{12} a_{1n} a_{21} a_{22} a_{2n} a_{n1} a_{n2} a_{nn}]^T$$

$$a_{ii} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0 \quad (1)$$

Cada matriz es normalizada y se determinan los pesos relativos. Los pesos relativos (ecuación 2) son dados por el eigenvector derecho (w) correspondiente al mayor eigenvalor (λ_{max}):

$$A_w = \lambda_{max} w \quad (2)$$

Si la comparación entre pares es consistente, entonces, a matriz A tiene rango de 1 y $\lambda_{max} = 1$. En este caso, los pesos pueden ser obtenidos al normalizar cualquiera de las filas o columnas de A . Para obtener buenos resultados, los juicios de la comparación entre pares deben ser de calidad.

La escala numérica para la comparación entre pares va de 1 a 9, si se asigna el 1, entonces se considera que los criterios tienen el mismo valor, si se utiliza el número

2, se está favoreciendo levemente a un criterio sobre otro. La preferencia es más fuerte entre más cercano se esté al número 9, el cual indica que la importancia del criterio es extrema con respecto al otro. Cuando se termina la comparación entre pares, se procede a revisar la consistencia de las respuestas.

La consistencia se define por la relación entre las entradas de A : $a_{ij} \times a_{jk}$. El índice de consistencia (IC) se calcula como se muestra en la ecuación 3:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

El coeficiente de consistencia final (CC) se usa para concluir si las evaluaciones son suficientemente consistentes. El CC se calcula como el cociente entre el IC y el índice aleatorio (IA), como se muestra en la ecuación 4:

$$CC = \frac{IC}{IA} \quad (4)$$

El límite superior aceptado es el 0.1 para el CC . Si se supera este valor, se debe repetir el procedimiento de evaluación hasta mejorar la coherencia. En el caso de las entrevistas, si se supera el valor de 0.1, entonces, no se consideraría apta para calcular la ponderación.

Resultados

La selección de indicadores para evaluar la seguridad

hídrica se basó en la frecuencia que estos aparecían en los índices consultados además de una comparación con las bases de datos disponibles, por ejemplo, CONAGUA, INEGI, SMN e información disponible en sitios oficiales del gobierno a nivel estado y municipio. A continuación, se presentan las dimensiones clave y sus objetivos además de los indicadores que las componen:

La **dimensión socioeconómica** tiene el propósito de estudiar las características de la población, especialmente aquellas que puedan manifestar condiciones desiguales en el acceso al agua, por ejemplo, la marginación, incluye el porcentaje de viviendas que cuentan con drenaje y toma de agua domiciliaria. Se incluye el volumen de agua superficial y subterráneo que se destina a las actividades

productivas como las actividades agrícolas, el servicio de agua potable, el uso ecológico, el uso industrial y las termoeléctricas. Es común que los índices agrupen los indicadores en dimensiones clave con la finalidad de explicar detalladamente las características que componen el fenómeno estudiado, en este caso, la seguridad hídrica tiene componentes socioeconómicos, ambientales, fenómenos hidrometeorológicos y de calidad del agua (**Tabla 2**).

La **dimensión clave ambiente** se enfoca en describir el volumen y la disponibilidad de agua en la cuenca de forma natural y en la factibilidad de ser explotada con enfoque a la sustentabilidad para atender las necesidades de todos los usuarios (**Tabla 3**).

La **dimensión clave fenómenos hidrometeorológicos**

Tabla 2. Dimensión clave socioeconómico.

Indicadores	Concepto	Información y/o fórmula
Densidad de población	Medida de distribución de población. Para evaluar el grado de ocupación del territorio. Es indicador de la presión demográfica sobre el suelo.	DP = población / superficie DP = Hab/ (INEGI, 2020).
Marginación	Población que presenta carencia de oportunidades sociales y la ausencia de capacidades para adquirirlas, así como la inaccesibilidad a bienes y servicios	Índice de marginación por entidad federativa y municipio. A escala municipio. (CONAPO, 2021).
Uso agrupado por actividad económica para aprovechamientos superficiales	Descripción del agua utilizada por las actividades productivas. Información anual por municipio (hm ³). Agrícola, agua potable, ecológico, hidroeléctricas, industrial y termoeléctricas.	Base de datos de inscritos títulos y permisos de aguas nacionales (CONAGUA, 2024).
Uso agrupado por actividad económica para aprovechamientos subterráneo	Descripción del agua extraída y utilizada por las actividades productivas. Información anual por municipio (hm ³). Agrícola, agua potable, ecológico, hidroeléctricas, industrial y termoeléctricas.	

Tabla 3. Dimensión clave ambiente

Indicadores	Concepto	Información y/o fórmula
Disponibilidad de agua en cuencas	Volumen (hm ³) de agua disponible por cuenca.	(CONAGUA, 2023) Escala: Con disponibilidad Sin disponibilidad
Agua renovable	Cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y el agua proveniente de otras regiones. Se calcula como el escurrimiento natural medio superficial interno anual, más la recarga total anual de os acuíferos más los flujos de entrada, menos los flujos de salida de agua a otras regiones	Información por año y estado. Agua renovable per cápita
Estrés hídrico	Es la fracción de la esorrentía anual total disponible para uso humano, se basa en el agua renovable per cápita	Mayor a 1700 m3 per cápita: No estrés. 1,000-1,700 Estrés 500-1000: Escases Menor a 500 Absoluta escases. (Brown y Matlock, 2011).

Tabla 4. Dimensión clave fenómenos hidrometeorológicos

Indicadores	Concepto	Información y/o fórmula
Precipitación media anual	Promedio de la precipitación media	(SMN, 2024) Resúmenes Mensuales de Lluvia y Temperatura Escala: Alta, media y baja
Temperatura media anual	Promedio de la temperatura media	(SMN, 2024) Menor a 16° (baja) De 16° a 20°(media) Mayor de 20° (alta)
Sequía	Descripción de la sequía en el país Los meses se dividen en categorías: sin sequía, solo días secos, sequía moderada se multiplica por 0, 1 y 2 respectivamente. Los valores mensuales se suman para cada municipio.	(SMN, 2024) Anormalmente Seco (D0) Sequía Moderada (D1) Sequía Severa (D2) Sequía Extrema (D3) Sequía Excepcional (D4)

Tabla 5. Dimensión clave calidad del agua

Indicadores	Concepto	Información y/o fórmula
Calidad del agua superficial	Índice de calidad del agua superficial	(CONAGUA, 2023) Verde. Cumple con fluoruros, coliformes fecales, metales, alcalinidad, conductividad y dureza. Amarillo. Incumple con alcalinidad, conductividad, dureza. Rojo. Incumple con Fluoruros, coliformes fecales y metales.
Calidad del agua subterránea	Índice de calidad del agua subterránea	(CONAGUA, 2023) Verde. Cumple con 8 parámetros demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y/o <i>E. coli</i> y oxígeno disuelto, valor de toxicidad, Daphnia magna, 48 horas y valor de toxicidad, Vibrio Fisheri, 15 minutos. Rojo. Incumple con alguno de los siguientes parámetros demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, toxicidad, Daphnia magna, 48 horas y valor de toxicidad, Vibrio Fisheri, 15 minutos. Amarillo. Incumple con alguno de los siguientes parámetros: sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y/o <i>E. coli</i> y oxígeno disuelto
Tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas	Información disponible por año y estado. Tasa de mortalidad menores de 5 años por cada 100,00 habitantes.	Óptimo Bueno Regular Deficiente

cos tiene el objetivo de describir las características de la precipitación, los rangos de temperatura y la presencia de sequía para así detectar periodos anormales que puedan provocar alteraciones en la disponibilidad, calidad y distribución de agua (Tabla 4).

Por último, la **dimensión clave calidad del agua**, se basa en los índices de calidad que evalúan características físicas y químicas del agua que son establecidos y monitoreados por CONAGUA (Tabla 5). Los puntos de muestreo del agua superficial están distribuidos a lo largo del río

Turbio, mientras que las muestras de agua subterránea se obtienen de pozos.

Los resultados que a continuación se presentan corresponden a la aplicación de AHP:

Se realizaron 12 entrevistas a expertos con el propósito de evaluar los criterios, las dimensiones y los indicadores. Los resultados de la ponderación de los criterios se muestran en la **Tabla 6**.

El resultado de la entrevista a expertos señala que el peso que tiene el criterio relevante es de 0.37, le sigue

Tabla 6. Resultados aplicación AHP para criterios de evaluación de indicadores.

Criterios	Resultados de entrevistas												Peso
Relevante	0.30	0.26	0.14	0.23	0.40	0.53	0.53	0.49	0.07	0.38	0.39	0.67	0.37
Adecuado	0.22	0.56	0.16	0.52	0.12	0.13	0.08	0.28	0.61	0.22	0.39	0.18	0.29
Monitoreable	0.41	0.06	0.26	0.13	0.34	0.28	0.33	0.18	0.14	0.32	0.15	0.11	0.23
Claro	0.06	0.12	0.45	0.12	0.14	0.06	0.07	0.05	0.18	0.08	0.07	0.05	0.12

adecuado con 0.29, después monitoreable con un peso de 0.23 y claro con un valor de 0.12.

El resultado de la ponderación de las dimensiones mostró que, desde la perspectiva de los expertos, la dimensión socioeconómica tiene mayor relevancia con un valor numérico de 0.34, siguiendo de cerca la dimensión ambiente con 0.33, después se encuentran la dimensión calidad del agua con 0.17 y en último lugar se encuentran los fenómenos hidrometeorológicos con un valor de 0.16. Los resultados de la ponderación para dimensiones se muestran en la **Tabla 7**.

El proceso de asignación de pesos para los cuatro indicadores correspondientes a la dimensión socioeconómica posiciono a la densidad de población y a la marginación con un mismo peso de 0.30, esto indica que, para los en-

trevistados, estos dos indicadores tienen la misma importancia, le siguen los indicadores: usos del agua superficial y usos del agua subterránea que resultaron en 0.25 y 0.15 respectivamente (**Tabla 8**).

Para el caso de la dimensión ambiente, se observó que el indicador al que se le asigno mayor peso es la disponibilidad de agua en cuenca, el cual obtuvo un valor de 0.47, por su parte el agua renovable tiene un peso de 0.33 y al final, el estrés hídrico resulto ser el menos relevante con un peso de 0.20 (**Tabla 9**).

La asignación de pesos para los indicadores de la dimensión clave fenómenos hidrometeorológicos dio como resultado que la precipitación tiene el mayor peso alcanzando un valor de 0.54, lo que sugiere que se considera más importante que la sequía con 0.24 y la temperatura

Tabla 7. Resultados aplicación AHP para dimensiones clave

Dimensiones	Resultados de entrevistas												Peso
Socioeconómica	0.42	0.34	0.74	0.55	0.37	0.40	0.04	0.58	0.06	0.43	0.12	0.09	0.34
Ambiente	0.22	0.24	0.14	0.17	0.30	0.17	0.47	0.28	0.46	0.43	0.80	0.31	0.33
FHM	0.25	0.17	0.07	0.16	0.21	0.20	0.31	0.08	0.34	0.08	0.05	0.04	0.16
Calidad	0.11	0.24	0.05	0.12	0.12	0.24	0.17	0.06	0.14	0.07	0.03	0.56	0.17

Tabla 8. Resultados aplicación AHP para indicadores de dimensión clave socioeconómica.

Indicadores SE	Resultados de entrevistas												Peso
Densidad de población	0.33	0.42	0.43	0.40	0.40	0.49	0.23	0.04	0.04	0.24	0.43	0.10	0.30
Marginación	0.36	0.27	0.45	0.38	0.40	0.23	0.59	0.09	0.11	0.41	0.25	0.04	0.30
Uso agrupado por actividad económica para aprovechamientos superficiales	0.15	0.14	0.08	0.17	0.10	0.14	0.09	0.65	0.59	0.18	0.09	0.63	0.25
Uso agrupado por actividad económica para aprovechamientos subterráneo	0.16	0.16	0.04	0.05	0.11	0.14	0.09	0.23	0.26	0.18	0.23	0.23	0.15

Tabla 9. Resultados aplicación AHP para indicadores de dimensión clave ambiente.

Indicadores Ambiente	Resultados de entrevistas												Peso
Disponibilidad	0.44	0.39	0.64	0.39	0.61	0.64	0.51	0.71	0.31	0.46	0.42	0.07	0.47
Agua Renovable	0.39	0.44	0.29	0.44	0.17	0.26	0.39	0.24	0.08	0.32	0.20	0.79	0.33
Estrés	0.17	0.17	0.07	0.17	0.22	0.10	0.10	0.05	0.62	0.22	0.38	0.15	0.20

Tabla 10. Resultados aplicación AHP para indicadores de dimensión clave fenómenos hidrometeorológicos.

Indicadores FHM	Resultados de entrevistas												Peso
Precipitación	0.56	0.71	0.72	0.55	0.44	0.73	0.48	0.74	0.50	0.46	0.36	0.27	0.54
Temperatura	0.35	0.14	0.12	0.24	0.39	0.19	0.41	0.17	0.14	0.22	0.20	0.06	0.22
Sequía	0.09	0.15	0.15	0.21	0.17	0.08	0.11	0.09	0.37	0.32	0.44	0.67	0.24

Tabla 11. Resultados aplicación AHP para indicadores de dimensión clave calidad del agua.

Indicadores Calidad	Resultados de entrevistas												Peso
Calidad Superficial	0.56	0.61	0.73	0.61	0.42	0.33	0.05	0.70	0.24	0.48	0.23	0.28	0.44
Calidad Sub	0.35	0.27	0.19	0.27	0.46	0.53	0.47	0.20	0.14	0.41	0.36	0.07	0.31
Mortalidad en niños	0.09	0.12	0.08	0.12	0.13	0.14	0.47	0.10	0.63	0.11	0.41	0.65	0.25

(0.22), como se muestra en la **Tabla 10**.

Los resultados para la dimensión calidad del agua señalan que el indicador con mayor peso es la calidad del agua superficial con un valor de 0.44, mientras que la calidad de agua subterránea resulta tener un valor numérico de 0.31 y la tasa de mortalidad en niños tiene un valor de 0.25 (**Tabla 11**).

El siguiente paso es el cálculo del índice por ejemplo el método propuesto por (Haider, Sadiq, y Tesfamariam, 2015) que comienza al otorgar un valor normalizado dentro de la escala de 1 a 10 (siendo 1 el peor escenario y 10 el mejor). Para esto se pueden utilizar valores de referencia obtenidos por bibliografía u opinión de expertos.

El valor final del índice se obtiene mediante la sumatoria de la multiplicación del valor normalizado por el peso obtenido mediante la aplicación de AHP. A modo de ejemplo se calculó el índice de seguridad hídrica para el año 2022 (**Tabla 12**) y resultó en 20.8, esto indicaría una baja seguridad hídrica para la cuenca durante ese año. Con este resultado se puede observar que es necesario la atención de todos los indicadores, pero algunos requieren atención prioritaria, por ejemplo, la disponibilidad de agua en cuenca, la sequía y la calidad del agua subterránea.

Discusión y conclusiones

La mayoría de los índices, resaltan la importancia de satisfacer las necesidades de la población, el medio ambiente y las actividades económicas, lo cual se apega a la definición de seguridad hídrica, entonces, considerar estos aspectos es fundamental y se debe complementar con indicadores referentes a otras características propias de la zona de estudio, de la población, actividades económicas, características del territorio, etc.

Se puede observar que los índices que son aplicados a escala país usan pocos indicadores y aportan información

general y al disminuir la escala de aplicación, los indicadores aumentan y se vuelven tan específicos como la información a la que se tiene acceso. Por lo que es posible tomar como base los indicadores generales y modificarlos para que se adapten a la base de datos disponible que puede ser proporcionada por instituciones a nivel municipal o estatal.

La información que se obtiene a nivel estatal y municipal puede proporcionar datos más específicos por lo que sería ideal priorizar el uso de esta información sin

Tabla 12. Ejemplo de valores usados para el cálculo del índice para el año 2022.

	Densidad de población	Marginación	Volumen por aprovechamientos superficiales	Volumen por aprovechamientos subterráneo	Disponibilidad de agua en cuencas	Agua renovable	Estrés hídrico
Pesos (AHP)	0.3	0.3	0.25	0.15	0.47	0.33	0.2
Valor normalizado	7	10	7	8	1	1	1
	Precipitación	Temperatura	Sequía	Calidad del agua superficial	Calidad del agua subterránea	Tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas	
Pesos (AHP)	0.54	0.22	0.24	0.44	0.31	0.25	
Valor normalizado	5	10	8	5	1	10	

embargo es importante resaltar que cualquier información tanto a nivel nacional, estatal o municipal puede dejar de monitorearse y a consecuencia de esto, el indicador dejaría de ser útil. En estos casos, sería recomendable vigilar cualquier cambio y modificar los indicadores pues todos deben mantenerse actualizados para ser funcionales.

Debido a que la calidad de la seguridad hídrica, está ligada a todas las características antes mencionadas se puede concluir que un índice (y los correspondientes indicadores) puede ser diseñado con tanto detalle como información se tenga disponible, pues es fundamental contar con una base de datos que permita emitir un juicio que contemple las características del años pasados y además que se pueda garantizar que la base de datos seguirá creciendo con el paso de los años, para así continuar valorando la seguridad hídrica.

La cuenca del río Turbio es seleccionada como zona de estudio porque las actividades económicas que se desempeñan requieren altos volúmenes de agua lo que sugiere que es importante contar con las medidas de gestión que fomente la satisfacción de las demandas de agua por la agricultura, la población y la conservación de los ecosistemas presentes en la cuenca.

La entrevista a expertos permite conocer las opiniones de quienes se ven involucrados en por lo menos algún aspecto que influye en la seguridad hídrica de la cuenca por lo que se considera que la valoración de los indicadores se justifica y también muestra las áreas que deberían atenderse con prioridad para alcanzar la seguridad hídrica en la cuenca del río Turbio. Otro beneficio de las entrevistas a expertos es la oportunidad de conocer las diferentes prioridades desde variados puntos de vista y criterios con base en sus conocimientos prácticos.

El método AHP resulta adecuado en este caso pues se necesitaba consultar a varios expertos para determinar el valor de cada indicador. Es una herramienta que se aplica fácilmente y cuyos resultados son concisos, proporcionando la información necesaria.

Los valores obtenidos para cada elemento evaluado son satisfactorios, sin embargo, es posible que se utilicen otras metodologías de toma de decisiones como Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE), para establecer las relaciones de jerarquía. De esta manera se pueden evaluar los resultados obtenidos usando AHP.

Con el desarrollo de un índice de seguridad hídrica se busca describir o evaluar la condición de la seguridad hídrica y así contribuir a consolidar procesos de toma de decisiones que impacten positivamente en la gestión del agua de la cuenca del río Turbio.

Agradecimientos

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.

División de Ingenierías, campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

Referencias

ADB (2013). Asian Water Development Outlook 2013: Measuring water security in Asia and the Pacific: Filipinas. *Asian Development Bank*. ISBN: 978-92-9092-989-5.

Aparicio-Mijares FJ, Guitron-De los Reyes A, Preciado-Jiménez ME (2011). Indicadores de sustentabilidad hídrica. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, p. 137.

Arreguin-Cortes FI, Saavedra-Horita JR, Rodríguez-Varela JM, Tzatchkov VG, Cortez-Mejía PE, Llaguno-Guilberto OJ, . . . Navarro-Barrera S (2019). Municipal level water security indices in Mexico. *SN Appl. Sci.* 1194. doi:[10.1007/s42452-019-1180-2](https://doi.org/10.1007/s42452-019-1180-2).

Burgos AL, Bocco Verdinelli G, Sosa Ramírez J (2015). Dimensiones sociales en el manejo de Cuencas: Ciudad de México, CIGA-UNAM, p. 318. doi:[10.22201/ciga.9786070268830e.2015](https://doi.org/10.22201/ciga.9786070268830e.2015).

Cervera Gómez LE (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios fronterizos* 9-41.

CONAGUA. Indicadores de Calidad del Agua. <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua?idiom=es>

CONAGUA. Aguas Subterráneas. Guanajuato <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/guanajuato/guanajuato.html>. [consultado el 09 de noviembre de 2023].

CONAGUA. “REPDA”, <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx> [consultado el 30 de junio de 2023].

CONAPO. “Índices de marginación 2020”, <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372> [consultado el 04 de octubre de 2023].

CONEVAL. “¿Cómo revisar indicadores? Criterios mínimos de claridad, relevancia monitoreabilidad y adecuación”, <https://blog.coneval.org.mx/2014/06/02/como-revisar-indicadores-criterios-minimos-de-claridad-relevancia-monitoreabilidad-y-adecuacion/> [consultado 2 de junio de 2023].

Gabrielsen P, Bosch P (2003). Environmental Indicators: Typology and use in Reporting. *Copenhagen, Internal Working Paper*.

Global Water Partnership (2000). Towards Water Security: A Framework for Action: *Stockholm, GWP.*, p. 10. ISBN: 9163092026. [towards-water-security-a-framework-for-action-mobilising-political-will-to-act-gwp-2000.pdf](https://www.gwp.org/DocLibrary/2000%20Towards%20Water%20Security.pdf). [consultado 20 de junio de 2023].

González JA, Espinoza MJ, Escalante M (2004). Evaluación de la sus-

tentabilidad del agua en la cuenca del lago Pátzcuaro. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.

Grey D, Sadoff C (2007). ¿Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy* 545-551. doi:[10.2166/wp.2007.021](https://doi.org/10.2166/wp.2007.021).

Haider H, Sadiq R, Tesfamariam S (2015). Selecting performance indicators for small and medium sized water utilities: Multi-criteria analysis using ELECTRE method. *Urban Water Journal* 305-327. doi:[10.1080/1573062X.2014.900089](https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.900089).

INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. *Conjunto Nacional*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas> [consultado 10 de julio de 2023].

INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Obtenido de Censo de Población y Vivienda 2020, https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/territorio/div_municipal.aspx. [consultado 10 de julio de 2023].

INEGI (2024). Mapas. Obtenido de Delimitación de colonias y otros asentamientos humanos 2024, <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551132180> [consultado 10 de julio de 2023].

Kamboj V, Kamboj N, Bisht A (2020). An overview of water quality indices as promising tools for assessing the quality of water resources. *Advances in Environmental Pollution Management* 188-214. doi:[10.26832/aesa-2020-aepm-013](https://doi.org/10.26832/aesa-2020-aepm-013).

Lautze J, Manthrilake H (2012). Water security: Old concepts, new package, ¿what value? *Natural Resources Forum* 76-87. doi:[10.1111/j.1477-8947.2012.01448.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2012.01448.x).

Martínez Austria PF, Díaz Delgado C, Moeller Chávez G (2018). Seguridad Hídrica en México: *Ciudad de México, Academia de Ingeniería México*.

Mendoza A, Solano C, Palencia D, Garcia D (2019). Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 348-360. doi:[10.4067/S0718-33052019000300348](https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348).

Omkarprasad SV, Sushil KS (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research* 1-29. doi:[10.1016/j.ejor.2004.04.028](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028).

PRI (2007). Canadian Waster Sustainability Index (CWSI). *Policy Research Initiative*. p 30.

Saaty TL (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 234-281. doi:[10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).

Salvatore-Olivares O, Burgos AL, Sosa Ramírez J, Bocco G (2019). Valoración de la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrográfica: Aplicación en cuencas rurales del Centro Occidente de México. *Journal of Latin American Geography* 88-119. doi:[10.1353/lag.2019.0035](https://doi.org/10.1353/lag.2019.0035).

Sandoval Cabrera SV, Sánchez Gálvez MD, López Vergara AC (2024). El consumo de agua en la cadena de suministro de la industria automotriz: el caso de Guanajuato, México. *Intersticios Sociales* 179-207. doi:[10.55555/is.28.578](https://doi.org/10.55555/is.28.578).

SMN. "Precipitación". Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/precipitacion-form> [consultado el 10 de agosto de 2024].

UNESCO. Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua, resumen ejecutivo. Biblioteca Digital. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384657_spa [consultado el 20 de agosto de 2024].

UNESCO-IHE. "Water Security". Annual Report. https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p:usmarcdef_0000217844&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_3646bac5-ca81-4762-acf8-d7471c9c0ab6%3F_%3D217844eng.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/pf [consultado el 20 de agosto de 2023].

van Beek E, Lincklaen Arriens W (2016). Water Security: Putting the concept into practice: *Stockholm, Elanders*, p. 53. ISBN: 978-91-87823-07-7.