

DOI: 10.24850/j-tyca-14-03-05

Artículos

Propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad en acuíferos: caso de estudio, México

Methodological proposal for the evaluation of sustainability in aquifers: Case study, Mexico

Rosario Iturbe-Argüelles¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4846-8123>

Alejandrina Castro-Rodríguez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-3044>

José Antonio Mendoza-Millán³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2283-5581>

Rosa María Flores-Serrano⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1599-3992>

Guillermina Pérez-Casimiro⁵, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7155-8788>

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, ria@pumas.ii.unam.mx

²Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, aacr@pumas.ii.unam.mx

³Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, jammgeologo@gmail.com

⁴Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, rfs@pumas.ii.unam.mx



⁵Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México,
gpc@pumas.ii.unam.mx

Autora para correspondencia: Alejandrina Castro-Rodríguez,
aacr@pumas.ii.unam.mx

Resumen

Se propone una metodología de indicadores de sostenibilidad en acuíferos que describen cuantitativa y cualitativa cambios en el sistema. No existe en la bibliografía consultada otra metodología propuesta para evaluar la sostenibilidad de los acuíferos con todos los indicadores que aquí se proponen y con esta ponderación por escenarios, lo cual es la principal aportación de este trabajo, donde se muestra la evaluación de sostenibilidad para cualquier acuífero en el país. Los indicadores propuestos son los siguientes: 1) contribución del agua subterránea al flujo base de las corrientes superficiales; 2) suministro de agua; 3) descarga/recarga; 4) riesgo de contaminación del agua subterránea; 5) dependencia del agua subterránea; 6) calidad del agua subterránea; 7) crecimiento de ciudades; 8) vulnerabilidad acuífera; 9) intrusión salina y salinización, y 10) inversión en materia de agua.

Es factible evaluar la sostenibilidad acuífera con una metodología empírica, sistemática y simple de indicadores con valores asignados a las variables involucradas. Los pesos fueron definidos por los autores al indicador de acuerdo con la relevancia sobre la sostenibilidad acuífera. Se proponen escenarios con valor numérico para cada indicador que muestren la condición del acuífero.

La puntuación final del índice de sostenibilidad relaciona todos los indicadores. Este índice se clasificó en cuatro categorías: sostenible, moderadamente sostenible, baja sostenibilidad e insostenible. La evaluación se realizó a nivel nacional (653 acuíferos); los resultados muestran siete acuíferos sostenibles, 623 moderadamente sostenibles, 23 baja sostenibilidad y ninguno insostenible. Se debe poner mayor énfasis en sitios con índice de sostenibilidad menor, analizando los indicadores que le confieren tal categoría para mejorar su condición.

Palabras clave: sostenibilidad, indicador, acuífero, flujo base, vulnerabilidad acuífera, intrusión salina, sistema de información geográfica.

Abstract

A methodology of sustainability indicators in aquifers is proposed, which describes quantitative and qualitative changes in the system. There is no other methodology proposed in the consulted bibliography to evaluate the sustainability of aquifers with all the indicators proposed here and with this weighting by scenarios, the main contribution of this work, which shows the sustainability evaluation for any aquifer in the country. The proposed indicators are 1) groundwater contribution to the base flow of surface streams; 2) water supply; 3) discharge/recharge; 4) groundwater contamination risk; 5) groundwater dependence; 6) groundwater quality; 7) cities growth; 8) aquifer vulnerability; 9) saline intrusion and salinization, and 10) investment in water infrastructure.

It is feasible to evaluate aquifer sustainability with an empirical, systematical, and simple indicator methodology in which values are assigned to the variables involved. Weights were assigned by authors to

the indicator, according to its relevance to aquifer sustainability. Scenarios with numerical value are proposed for each indicator, which show the condition of the aquifer.

A final score of the sustainability index relates all the indicators. This index was classified into four categories: sustainable, moderately sustainable, lowly sustainability, and unsustainable. The evaluation was carried out at the national level (653 aquifers); the results show seven sustainable aquifers, 623 moderately sustainable, 23 of lowly sustainability and non unsustainable. Greater emphasis should be placed on sites with an unsustainable index, analyzing the indicators that confer this category to improve their condition.

Keywords: Sustainability, indicator, aquifer, base flow, aquifer of vulnerability, saline intrusion, geographic information system

Recibido: 03/12/2019

Aceptado: 22/12/2021

Introducción

En el año de 1987, la Comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo obtuvo un acuerdo entre científicos y políticos de los principales desafíos en materia ambiental; se enfatizó en el documento "Nuestro Futuro Común" el término de desarrollo sostenible



definido como: “aquel que satisface las necesidades esenciales de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades esenciales de las generaciones futuras” (ONU, 1987). Es a través de esto que se busca la preservación de los recursos naturales sin dejar de lado el bienestar humano, y el desarrollo económico y social. A partir de dicha publicación se sucedieron una serie de cumbres internacionales sobre el mismo tema.

En 1992 se llevó a cabo en Río de Janeiro la Cumbre de la Tierra, donde se acordó que debe haber un equilibrio entre tres ejes primordiales: la protección del ambiente, el desarrollo social y el desarrollo económico para alcanzar el desarrollo sostenible (ONU, 1992). Aunque si bien México asumió un compromiso de adoptar medidas nacionales y globales en materia de sostenibilidad a partir de ese año, no fue sino hasta 1997 cuando inició un arduo trabajo en la definición de indicadores de sostenibilidad que permitieran evaluar la problemática sobre el desarrollo sostenible en el país, así como el diseño de estrategias y políticas en la materia.

Los organismos que principalmente han trabajado sobre el tema son el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), realizando hasta la fecha 109 indicadores; sin embargo, solo 25 de estos indicadores son evaluados en materia de agua, contemplando dos grandes rubros: disponibilidad y calidad del agua. Aunque la información que se presenta en cada uno de estos rubros es muy valiosa para evaluar la sostenibilidad, la información es anual a nivel global y nacional, y no es una información georreferenciada ni tiene una cuantificación que permita emitir un valor

comparable en los diferentes marcos geográficos del país que zonifique su sostenibilidad, y que, por lo tanto, muestre zonas prioritarias. Esto es esencialmente la contribución del trabajo presente, pues el uso del sistema de información geográfica permite la interrelación de la información a otros niveles, en este caso, a nivel acuífero. Además, aunque si bien no se puede dejar de lado el agua superficial porque su uso también incide en el agua subterránea, básicamente este estudio evalúa el agua subterránea. El único trabajo que se ha llevado a cabo en México con respecto a sostenibilidad en acuíferos es el de Herrera-Carbajal, Villalba-Atondo y Molinar-Tabares (2007). En ese trabajo, los autores realizaron la modelación del acuífero con base en medidas de flujo y nivel de agua, y observaron una reducción de las reservas anuales, lo que en un futuro podría implicar una insostenibilidad del sistema; sin embargo, no se utilizaron indicadores.

Con respecto a indicadores sociales y económicos, solo se tiene en el país el trabajo de Cervera-Gómez (2007), quien evalúa el uso sostenible del agua en general con base en cuatro indicadores sociales: acceso a agua segura, acceso a instalaciones sanitarias adecuadas, conexiones domiciliarias y consumo de agua; un indicador económico: precio del agua; y uno ambiental: aguas residuales tratadas. Su evaluación la realizó en Ciudad Juárez, Chihuahua. Los tres primeros indicadores sociales y el ambiental tuvieron una estimación que refleja que más del 87 % de su población cuenta con estos servicios; el consumo de agua es de 278.27 litros/hab/día, y el precio del agua es de 8.5 pesos/m³. Sus indicadores fueron elaborados sobre todo con base en el XII Censo General de Población y Vivienda de INEGI del año 2000 (INEGI, 2000). Dentro de sus comentarios finales, el autor indica que se cuenta

con buenos indicadores de sostenibilidad, pero son indicadores que se manejan dentro del sistema municipal de agua potable y saneamiento y, si bien es muy importante que a la población le llegue el recurso hídrico, también es esencial la calidad del mismo y su procedencia. En ese caso, el autor menciona que el 100 % del agua que abastece a la ciudad proviene del acuífero de Bolsón del Hueco, cuya tasa de extracción supera por mucho la de la recarga, lo que de entrada ya le confiere una sostenibilidad baja al recurso.

Por otro lado, la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (UNESCO, 2007) junto con la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) y la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH, por sus siglas en inglés) hicieron un trabajo en conjunto en la que intervinieron diferentes especialistas de varios países para proponer indicadores que permitieran medir el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas. Dicho trabajo sirvió como base para la integración y creación de indicadores que puedan medirse para definir la sostenibilidad de los acuíferos. Algunos de los indicadores que propusieron se evalúan en la metodología del presente trabajo, como la "relación descarga/recarga", vulnerabilidad acuífera y calidad del agua; sin embargo, a diferencia del trabajo antes citado, el presente artículo proporciona como producto final la categoría de sostenibilidad resultante después de aplicar los indicadores, además de que la forma en que se aborda el problema es más acorde con la información existente en el país. Por otro lado, también la metodología que se usa en el presente trabajo difiere de la empleada por Cervera-Gómez (2007) en que estos indicadores se relacionan principalmente con el agua subterránea.

En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), iniciativa adoptada por los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas, se reconoce que el desarrollo social y económico depende de la gestión sostenible de los recursos naturales. El desarrollo de la presente metodología busca apoyar en la gestión sostenible del recurso agua subterránea, a fin de que México consiga la implementación del objetivo seis de dicha Agenda: “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”.

Dicho lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para desarrollar un índice de sostenibilidad de acuíferos que permita describir cuantitativa y cualitativamente los cambios en el sistema, que permita observar áreas críticas a las cuales poner más atención y, por otro lado, no descuidar las que presenten una mejor sostenibilidad. La hipótesis de este trabajo es que la sostenibilidad de un acuífero es dinámica y puede ser determinada con base en indicadores ambientales. Los indicadores para evaluar la sostenibilidad de acuíferos pueden ser numerosos; sin embargo, se han definido diez que se consideran importantes para la evaluación; para la mayoría de ellos se cuenta con información de un buen porcentaje de los acuíferos del país y otros se han seleccionado a pesar de contar con poca información debido tanto a la importancia que representan para la sostenibilidad como por la aspiración de que las autoridades en materia de agua vean el valor que representan en general en la gestión del agua, y pueda lograrse un mayor compromiso y apoyo para su determinación. Los autores de la presente metodología consideran que la información generada en este trabajo puede ser utilizada como guía en las actuales políticas de gestión del agua, y también como apoyo en la toma de decisiones en materia de agua

en los diferentes niveles de gobierno; el uso de estos indicadores son perfectamente replicables en cada uno de los acuíferos del país, y este trabajo permite ver que, si bien hay falta de información en la mayoría de los acuíferos, también advierte cuál es el tipo de información que falta. Por otro lado, consideramos que es una buena metodología que permite hacer un seguimiento del comportamiento de los acuíferos en el tiempo, ya que los indicadores son dinámicos. Se pretende que esta metodología sea utilizada como una herramienta de evaluación general, que apoye una evaluación de sostenibilidad con un mayor número de parámetros en un área específica por especialistas en el tema.

El índice de sostenibilidad está integrado por diez indicadores seleccionados mediante revisión bibliográfica. En esta metodología cada indicador se analiza por medio de un sistema de información geográfica (ArcGis), que permite generar un mapa de valores de escenario para cada indicador de la zona geográfica de interés. A los indicadores se les asigna un peso entre 1 y 5 de acuerdo con la importancia que los autores consideran tiene en la sostenibilidad del acuífero. Cada indicador puede presentar varios escenarios; a cada escenario se le asignó un valor entre 1 y 10 con base en la importancia que puede tener sobre la sostenibilidad del indicador, lo que significa el grado de afectación sobre el recurso hídrico, donde el mayor valor del escenario representa un mayor grado de afectación. Finalmente, el peso del indicador se multiplica por el valor de su escenario y cada producto se suma. El valor resultante zonifica el área de estudio en cuatro clases: sostenible, moderadamente sostenible, baja sostenibilidad e insostenible.

Materiales y métodos

Propuesta de indicadores

La selección final de indicadores se hizo considerando principalmente datos que por su relevancia para la evaluación de los acuíferos es más factible que estén disponibles en fuentes de información de organismos gubernamentales o instituciones de investigación. La información que se consultó fue de organismos como la Comisión Nacional del Agua (Conagua), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sagarpa), tesis, artículos y manuales relacionados con indicadores de sostenibilidad en acuíferos. De acuerdo con la información que se tuvo disponible se seleccionaron diez indicadores.

La metodología seguida se centra principalmente en el aspecto ambiental, porque si bien dentro de los acuerdos de sostenibilidad se muestra la importancia de los tres ejes: ambiental, social y económico, es poca la información que se tiene para los ejes social y económico, por lo que solo se evaluó un indicador para cada uno de estos últimos.

En la Tabla 1 se presentan los diez indicadores evaluados para el análisis de la sostenibilidad, así como los pesos que se proponen de acuerdo con la importancia que tienen en la sostenibilidad de un acuífero.

Tabla 1. Indicadores de sostenibilidad en acuíferos y sus respectivos pesos.

Núm.	Nombre del indicador	Nivel de Evaluación	Peso
1	Contribución del agua subterránea al flujo base de las corrientes superficiales (ICASFB)	Acuífero	5
2	Suministro de agua por habitante (ISUMA)	Municipio	2
3	Relación descarga/recarga (IDR)	Acuífero	5
4	Riesgo de contaminación del agua subterránea (IRCAS)	Múltiple	3
5	Dependencia al agua subterránea (IDAS)	Municipio	3
6	Calidad del agua subterránea para consumo humano (ICAL)	Pozo	5
7	Crecimiento de las ciudades (ICC)	Municipio	2
8	Vulnerabilidad de acuíferos (IVA)	Múltiple	3
9	Intrusión salina y salinización de agua subterránea (IISS)	Pozo	4
10	Inversión en materia de agua (IIMA)	Municipio	4

Nota. Múltiple se refiere a que, en el mismo indicador, si se analiza más de una variable podría presentar distintos tipos de nivel de evaluación acorde con cada variable (nivel acuífero, municipio, puntual y/o zonificado).

El mayor peso (5) se otorgó a los indicadores de “Contribución del agua subterránea al flujo base de las corrientes superficiales” (ICASFB), “Relación descarga/recarga” (IDR) y “Calidad del agua subterránea para consumo humano” (ICAL), pues representan un mayor riesgo de afectación al balance del acuífero en sí y a la salud humana. El peso siguiente (4) se adjudicó a los indicadores “Intrusión salina y salinización de agua subterránea”, e “Inversión en materia de agua”; al primero, porque en caso de presentarse puede llegar a inhabilitar al acuífero impactado; en el caso de la inversión en materia de agua, su peso es resultado de que los autores consideran que el tratamiento de las aguas residuales, si son reutilizadas, reduce el volumen de extracción del acuífero y de los cuerpos de agua superficiales.

El peso 3 se asigna a los indicadores de “Riesgo de contaminación del agua subterránea”, “Dependencia al agua subterránea” y “Vulnerabilidad de acuíferos”. El indicador “Riesgo de contaminación del agua subterránea” estima el riesgo de contaminación del acuífero, entendido como la posibilidad de contaminación debido a la presencia de sustancias contenidas en los residuos peligrosos; se le dio este peso pues aunque también puede ser inhabilitado el acuífero si se da la contaminación, ésta se verá afectada a su vez por cinco variables (masa de residuos peligrosos, superficie de la entidad, conductividad hidráulica predominante de los estratos superiores, profundidad del nivel freático y precipitación promedio anual) que pueden hacer que dicho riesgo se reduzca.

La “Dependencia al agua subterránea” recibe este peso dada su importancia de alertar sobre el aumento del uso del recurso hídrico subterráneo sobre las fuentes superficiales. Hay regiones en el país cuyo

principal recurso es el agua subterránea, pero donde no lo sea, el indicador propicia poner atención en el desarrollo de tal relación. La vulnerabilidad de acuíferos representa una protección al acuífero, no una presión (amenaza), es por ello que su peso no es elevado sino medio. El menor peso lo reciben los indicadores de suministro de agua por habitante y crecimiento de las ciudades. El peso del primero es en vista de que el suministro para cada habitante se hace tanto con agua superficial como subterránea, por lo que el estrés que provoca en el acuífero no necesariamente es alto, pero sí se debe velar por mantener un suministro de agua suficiente en las personas.

Por último, la designación de un peso de 2 para el indicador “Crecimiento de las ciudades” se debe a que si bien una mayor demanda representa un mayor estrés en el recurso hídrico, tal crecimiento no es inmediato; sin embargo, no se puede dejar de lado pues se requieren contemplar las generaciones futuras.

Clasificación de cada indicador

Para lograr la zonificación del área de estudio se utilizó el sistema de conteo de puntos, que consiste en asignar un peso a cada indicador para que refleje rápidamente la relación entre los mismos indicadores y su importancia en la evaluación de la sostenibilidad. Los pesos se asignaron entre 1 y 5, siendo el valor más alto (5) para el indicador que tiene mayor impacto sobre la sostenibilidad y el valor menor (1) a la inversa.

Posteriormente se hizo una clasificación de los diferentes escenarios que se pueden presentar para cada indicador, asignándole un valor que se llamará valor de escenario (VE). Estos valores pueden estar entre 1 y 10, siendo el valor 1 la calificación más favorable (mejor escenario) y 10 la menos favorable (peor escenario).

A continuación se describen los indicadores y sus valores de escenario.

Indicador “Contribución del agua subterránea al flujo base de las corrientes superficiales” (ICASFB)

El flujo base es el caudal que se observa en un curso de agua superficial al final de un periodo de estiaje, y está constituido por el aporte de las aguas subterráneas. Se le asignó un peso alto (5) debido a que el caudal base debe permanecer inalterado en el mejor de los casos y a que el aumento de volumen superficial concesionado provocaría que el acuífero aportara más volumen para mantener el flujo base a las corrientes superficiales.

La clasificación de este indicador se enfoca en el porcentaje de agua superficial concesionado respecto al caudal base. Para la evaluación del indicador se contó únicamente con valores de caudal base de 131 acuíferos (Conagua, 2019). Aun cuando solo se tiene información del 20 % de los acuíferos del país, es importante tomar en cuenta este indicador, porque al realizar la evaluación de sostenibilidad más a detalle en un

acuífero, es esencial que se contemple su obtención y se hagan los estudios pertinentes. La clasificación se representa en la Tabla 2, en la que se asignan valores de escenario de acuerdo con el porcentaje de dicha relación.

Tabla 2. Escenarios y valores de escenario del indicador IDNC.

Volumen de agua superficial concesionada respecto al volumen de descarga natural comprometida (DNC) (%)	VE
0-25	2
25-50	5
50-75	7
> 75	10

Indicador “Suministro de agua por habitante” (ISUMA)

Este indicador evalúa el volumen de agua concesionado necesario para satisfacer las necesidades esenciales de las personas.

Para hacer la clasificación de este indicador se utilizó información de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003), que considera que la cantidad adecuada de agua para consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) es de 50 a 100 l/hab-día (de 18.25 a 36.5 m³/hab/año). Este es el valor que se utilizó como referencia para clasificar los posibles escenarios; los municipios que proporcionen a sus habitantes menos de la cantidad indicada por la OMS tendrán el valor más

alto (menor sostenibilidad), al igual que los municipios que usen un volumen de agua por habitante demasiado alto (ver Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación por suministro de agua/hab/año.

Suministro de agua (m ³ /hab/año)	VE
< 5	10
≥ 5 - 10	8
≥ 10 - 15	6
≥ 15 - 19	4
≥ 19 - 30	2
≥ 30 - 40	4
≥ 40 - 50	6
≥ 50 - 60	8
≥ 60	10

Indicador “Relación descarga/recarga” (IDR)

Este indicador permite estimar de manera general el balance hídrico del acuífero. Para la recarga se debe considerar el volumen de agua que se aporta al sistema por concepto de recarga natural, por recarga inducida y por flujo horizontal. Por otro lado, para la descarga se toma en cuenta la descarga natural comprometida, el flujo subterráneo al mar (si es que presenta), el gasto ecológico y el volumen concesionado de agua subterránea.

La evaluación de este indicador será a nivel acuífero, por lo que el valor de escenario será representativo para toda el área del acuífero a evaluar. La clasificación de este indicador de acuerdo con la relación recarga/descarga se puede observar en la Tabla 4. Se tomó como referencia para la relación descarga/recarga el valor de 1, pues sería el escenario en que la recarga es igual a la descarga, y no se pone en riesgo el equilibrio del sistema (Ponce & Da-Silva, 2018); todos los escenarios donde la descarga sea mayor que la recarga (relación descarga/recarga > 1) serán no deseables, teniendo valores mayores de VE a mayor discrepancia en esta relación.

Tabla 4. Clasificación respecto a la relación de descarga y recarga de un acuífero.

Relación (descarga/recarga)	VE
< 1	2
$\geq 1 - 1.5$	4
$\geq 1.5 - 2$	6
$\geq 2 - 2.5$	8
≥ 2.5	10

Indicador “Riesgo de contaminación del agua subterránea” (IRCAS)

El indicador estima el riesgo de contaminación del acuífero, entendido como la posibilidad de contaminación debido a la presencia de sustancias contenidas en los residuos peligrosos. El indicador podría evaluar otras fuentes de contaminación (p. ej., gasolineras, rellenos sanitarios, etc.), pero la información más completa que se obtiene en México es la relacionada con la masa de residuos por municipios. Bajo este contexto, para evaluar el riesgo se requiere de variables o criterios que estén asociados con un peligro (en este caso, la presencia de sustancias tóxicas contenidas en los residuos peligrosos), y variables o criterios vinculados con las características del medio que afectan el movimiento de las sustancias hacia el cuerpo de agua subterránea.

El indicador IRCAS se compone de cinco criterios o variables: C1 = masa de residuos peligrosos (t/año); C2 = superficie de la entidad (km²); C3 = conductividad hidráulica predominante (m/d) de los estratos superiores; C4 = profundidad del nivel freático (m), y C5 = precipitación promedio anual (mm). Dichas variables se seleccionaron pues influyen en la presencia y migración de sustancias tóxicas en el medio poroso.

A cada variable se le asignó un valor de ponderación o peso (P) entre 1 y 5 (1 = menor efecto en el indicador; 5 = mayor efecto en el indicador). Cada variable se compone a su vez del producto de su peso y el valor de escenario correspondiente (con valores entre 0 y 10). Así, el valor final del indicador IRCAS resulta de la sumatoria de la multiplicación del peso y el valor de escenario de cada una de las variables que lo

componen; esto, dividido entre la sumatoria de los pesos de las variables (Ecuación (1)):

$$IRCAS = \frac{\sum_{i=1}^5 Ci * Pi}{\sum_{i=1}^5 Pi} \quad (1)$$

Donde:

IRCAS = valor de escenario final del indicador riesgo de contaminación al agua subterránea.

Ci = valor de escenario de la variable C1, C2, C3, C4 y C5.

Pi = peso de la variable C1, C2, C3, C4 y C5.

A continuación se describen cada una de estas cinco variables, sus pesos y valores de escenario.

Variable C1 (masa de residuos peligrosos)

La masa de residuos peligrosos presentes en la entidad (t/año) representa un peligro o amenaza hacia el acuífero; lo ideal sería que se considerara también a las sustancias contenidas en ellos, pero en este trabajo esto no fue posible a causa de que las fuentes de información disponibles en México que pudieran proporcionar tal información reportan datos de sustancias para un número limitado de municipios. Los datos de residuos peligrosos generados en cada municipio del área de interés se tomaron



del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) (Semarnat, 2013), que reporta las toneladas de residuos peligrosos reportadas por las empresas.

El INGRP no reporta la masa de residuos peligrosos, sino el número de microgeneradores, pequeños generadores y grandes generadores de residuos, por lo que en este trabajo se propone estimar la masa de residuos peligrosos producida por cada municipio que integra el acuífero de estudio, considerando que la masa de residuos de un gran generador es de 10 toneladas, de 5 toneladas para un pequeño generador y 0.4 toneladas para los microgeneradores (Semarnat, 2013). La clasificación de la variable residuos peligrosos se propone que se haga con base en los datos del municipio que genere la mayor masa de residuos en el área de estudio; en la Tabla 5 se presenta la clasificación para dicha variable.

Tabla 5. Escenarios y sus valores correspondientes para la generación de residuos peligrosos.

Cantidad de residuos peligrosos (t/año)	VE
< 10	2
$\geq 10-30$	4
$\geq 30-40$	6
$\geq 40-50$	8
≥ 50	10

Variable C2 (superficie de la entidad)

La variable superficie de la entidad se refiere al área superficial de cada municipio en kilómetros cuadrados. Entre mayor sea la extensión territorial del municipio, se espera que la densidad de masa de residuos peligrosos generada y almacenada sea menor (es decir, que sea inversamente proporcional); por lo tanto, también será menor su contribución al posible riesgo de generación de focos calientes (*hot spots*) de contaminación en el agua subterránea. La clasificación de la variable se hace con base en el promedio de la extensión de los municipios que integran la república mexicana (ver Tabla 6).

Tabla 6. Escenarios y sus valores de la variable superficie de la entidad.

Extensión superficial (km ²)	VE
≥ 200	2
$\geq 150-200$	4
$\geq 100-150$	6
$\geq 50-100$	8
$\geq 10-50$	10

Variable C3 (conductividad hidráulica)

Se debe determinar el tipo de material geológico predominante en el área de estudio y asignar el valor de conductividad hidráulica típico correspondiente a cada material. Si no se cuenta con valores reales de conductividad hidráulica para la geología se pueden obtener datos de tablas de autores como Domenico y Schwartz (1990), quienes proponen intervalos de conductividades hidráulicas para cada tipo de material, por lo cual se debe obtener el promedio. La conductividad hidráulica de todos los acuíferos evaluados fue con base en estos autores. La geología superficial predominante se obtiene de planos especializados como los que edita en México el INEGI y el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Tabla 7. Escenarios y sus valores para la variable C3 conductividad hidráulica (m/d).

Intervalo de conductividad hidráulica (m/d)	VE
$\geq 1\ 000$	10
$\geq 10-1\ 000$	8
$\geq 0.02-10$	6
$\geq 0.00001-0.02$	4
< 0.00001	2

Variable C4 (profundidad del nivel freático)

La profundidad al nivel freático correspondiente de cada pozo se obtiene por lo general de datos proporcionados por las oficinas gubernamentales o directamente en campo. Se analiza la información de cada uno de los pozos de donde se tiene información para obtener los posibles escenarios. En la Tabla 8 se presenta la clasificación para la variable "Profundidad del nivel freático".

Tabla 8. Escenarios propuestos y sus valores para la profundidad del nivel freático.

Profundidad de nivel freático (m)	VE
≥ 50	2
$\geq 20-50$	4
$\geq 10-20$	6
$\geq 0-10$	8
< 0	10

Variable C5 (precipitación promedio anual)

La precipitación puede ayudar a la migración de un contaminante hacia el subsuelo y contaminar el agua subterránea. Es una variable con

variaciones importantes en el tiempo, pues dependiendo de las condiciones climáticas prevalecientes en un momento determinado se pueden tener altas o bajas tasas de precipitación.

La clasificación se realizó con base en el promedio de las precipitaciones anuales a nivel nacional. Los valores de escenario de esta clasificación se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de la variable C5 “Precipitación promedio anual”.

Intervalo de precipitación promedio anual (mm)	VE
< 500	2
≥ 500 -1 000	4
$\geq 1\ 000$ -1 500	6
$\geq 1\ 500$ -2 000	8
$\geq 2\ 000$	10

Indicador “Dependencia al agua subterránea” (IDAS)

Este indicador se refiere al porcentaje del consumo de agua total (agua subterránea + agua superficial) de una entidad o área que pertenece al uso del agua subterránea. Para desarrollar este indicador se obtienen los porcentajes de agua subterránea con respecto al agua superficial para cada municipio. En la Tabla 10 se observa la clasificación de los escenarios y sus valores para este indicador. En cualquier sistema se tendrán

condiciones más favorables en términos de sostenibilidad cuando la dependencia que se tenga del agua subterránea sea menor.

Tabla 10. Escenarios y valores del indicador IDAS.

% agua subterránea utilizada	VE
< 10	2
$\geq 10-20$	4
$\geq 20-30$	6
$\geq 30-40$	8
≥ 40	10

Indicador “Calidad del agua subterránea para consumo humano” (ICAL)

Este indicador evalúa la calidad del agua desde el punto de vista de los parámetros físicos, químicos y biológicos mínimos necesarios para que el agua sea apta para consumo humano. Hasta donde sea posible se debe realizar un análisis de la evolución de la calidad a través del tiempo. Esto podría ser suficiente para evaluar la sostenibilidad del acuífero en cuanto a su calidad. Desafortunadamente, en la mayoría de las ocasiones, los monitoreos no se realizan de manera periódica y tampoco se contemplan los mismos parámetros, lo cual impide realizar la evaluación de la calidad del agua de manera adecuada.

En México no se cuenta con una norma oficial de calidad del agua subterránea, por lo que se propone usar la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Dicha norma contiene la concentración máxima permisible de 34 parámetros; sin embargo, no es posible encontrar información donde se hayan realizados estudios de calidad de agua de más de diez parámetros en todos los acuíferos de México. En la consulta a través de la calidad del agua subterránea solo se contó con información de cuatro parámetros que se encuentran en dicha norma: sólidos disueltos totales (SDT), dureza total, fluoruros totales y coliformes fecales de más de 1 080 pozos distribuidos en todo el país. Es por ello que por falta de suficientes parámetros, la forma en que se propone evaluar este indicador es como sigue:

$$\frac{P_{F.N.}}{P_T} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$P_{F.N.}$ = total de parámetros evaluados (SDT, dureza total, fluoruros totales y coliformes fecales) fuera de norma con base en la NOM-127-SSA1-1994.

P_T = total de parámetros muestreados (cuatro).

La clasificación de este indicador se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Escenarios y valores de escenario para el indicador ICAL.

% agua subterránea utilizada	VE
< 25 %	2
≥ 25 %-50 %	5
≥ 50 %-75 %	7
≥ 75 %	10

Indicador “Crecimiento de las ciudades” (ICC)

Este indicador tiene la finalidad de conocer la tasa de incremento anual poblacional para cada municipio correspondiente al periodo que se desea evaluar. El indicador “Crecimiento de las ciudades” es el más factible de poderse comparar entre dos periodos, ya que es un parámetro que se mide bajo censo cada 5 y 10 años. Este parámetro es importante para tomar en cuenta las generaciones futuras. La tasa de crecimiento se realiza con la siguiente ecuación (INEGI, 2000; INEGI, 2010):

$$T.C.P = \left(\left[\left(\frac{P_x}{P_0} \right)^{\frac{1}{t}} \right] - 1 \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

$T.C.P.$ = tasa de crecimiento poblacional (%).

P_x = población total del último censo (referencia final).

$P0$ = población total del censo base o inicial (referencia inicial).

t = tiempo de años transcurridos entre el momento de referencia de la población inicial y la población final.

Así, la clasificación del indicador ICC se evalúa con base en el porcentaje de la tasa de crecimiento anual poblacional, tal como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de escenario para la clasificación de la tasa de crecimiento anual poblacional.

Crecimiento poblacional anual (%)	VE
< 1	2
$\geq 1-2$	5
$\geq 2-3$	7
$\geq 3-4$	8
$\geq 4-5$	9
≥ 5	10

Indicador “Vulnerabilidad de acuíferos” (IVA)

El término vulnerabilidad acuífera se refiere a qué tan susceptible es un acuífero de ser contaminado. Existen varios métodos para su evaluación, pero se escogió el método GOD en vista de los pocos parámetros que maneja (Foster, 1987).

Las variables se multiplican entre sí y se obtiene un valor final entre 0 y 1. El valor GOD se modifica, pues se multiplica por 10 para obtener evaluaciones en este indicador de 0 a 10, y de esa manera poder evaluarse con los demás indicadores que contienen las mismas escalas de evaluación. La clasificación de este indicador se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación del indicador IVA.

VE según GOD	VE	Clases de IVA
0.1-0.3	1-3	Vulnerabilidad baja
$\geq 0.3-0.5$	3-5	Vulnerabilidad moderada
$\geq 0.5-0.7$	5-7	Vulnerabilidad alta
$\geq 0.7-1$	7-10	Vulnerabilidad muy alta

Indicador “Intrusión salina y salinización de agua subterránea” (IISS)

Uno de los problemas importantes que existen en los acuíferos es la salinización de las aguas subterráneas, la cual se debe a factores tales como intrusión salina, salinización de agua subterránea por prácticas agrícolas y salinización por cuerpos evaporíticos.

En el trabajo realizado por Mendoza-Millán (2015) se propone que la evaluación de la intrusión salina se realice con el método de vulnerabilidad GALDIT (Chachadi & Lobo-Ferreira, 2001); sin embargo,

de los 653 acuíferos solo el 30 % corresponde a acuíferos costeros. Además de que esta metodología es evaluada por seis variables como su acrónimo lo indica, la falta de información podría complicar la evaluación de la intrusión salina, sin mencionar que no tendría sentido la evaluación de los acuíferos continentales por este método.

Debido a lo anterior, se recomienda evaluar el indicador que englobe a todos los acuíferos (costeros y continentales) y caracterice la salinización e intrusión salina de una manera práctica. Para ello se proponen dos variables: la elevación del nivel freático (ENF), que nos permitirá conocer las cargas hidráulicas con respecto al nivel medio del mar, así como la dirección de flujo subterráneo y la concentración de SDT para conocer el tipo de agua subterránea con base en la clasificación de Conagua (2018). La Tabla 14 se muestra los valores de escenario para las dos variables.

Tabla 14. Clasificación del indicador IISS.

VE	Variable ENF (msnmm)	Variable SDT (mg/l)/tipo de agua
1	≥ 100	
2	80-100	$\leq 1\ 000$ /dulce
3	70-80	
4	60-70	
5	50-60	1 000-2 000/ligeramente salobre
6	40-50	
7	20-40	
8	0-20	2 000-1 000/salobre
9	-10-0	
10	≤ -10	$> 1\ 000$ /salina

La evaluación final de este indicador consistirá en el promedio de los valores de escenario de estas dos variables (Variable ENF y SDT) (Ecuación (4)), teniendo de esta manera su clasificación correspondiente (ver Tabla 15):

$$IIS = \frac{VE_{ENF} + VE_{SDT}}{2} \quad (4)$$

Tabla 15. Clasificación del indicador IIS.

IIS	Clases de IIS
≤ 3	Aceptable
3-5	Agua contaminada por sales
5-7	Agua contaminada por sales e inicio de intrusión salina
≥ 7	Intrusión salina

Indicador “Inversión en materia de agua” (IIMA)

El objetivo principal de este indicador es conocer qué tanta inversión se destina en medidas de gestión de agua. Aunque esta variable se puede evaluar tomando en cuenta otros criterios, como por ejemplo inversión en limpieza de ríos y población con acceso a agua potable, se realizó con base en plantas de tratamiento debido a que la escasa información accesible existente se limita en muchos casos al volumen de agua tratada en plantas de tratamiento de agua municipales y no municipales.

Se necesita conocer el porcentaje de agua tratada (de uso municipal y no municipal) en cada municipio del área de interés, estimado en función del volumen de agua concesionado.

El peor escenario de la zona es cuando se trate menos del 10 % del volumen total concesionado para sus diferentes usos y, por otro lado, el mejor escenario está dado por aquellas zonas donde se traten más del 50 % de su volumen concesionado, tal como se muestra en la Tabla 16. Para la obtención de este indicador no se diferenciaron volúmenes de agua tratada superficial y subterránea, pues no se genera dicha información; sin embargo, cualquier volumen de agua que se trate y reúse es un volumen de agua que se deja de extraer al acuífero y de los cuerpos de agua superficiales.

Tabla 16. Clasificación del indicador IIMA.

Porcentaje de agua tratada (%)	VE
< 10	10
$\geq 10-20$	9
$\geq 20-30$	7
$\geq 30-40$	5
$\geq 40-50$	3
≥ 50	2

La evaluación de indicadores de sostenibilidad en acuíferos se propone que se realice a una escala regional o menor; una evaluación a escala de municipios podría considerarse adecuada, de hecho, la metodología de este trabajo se enfoca a buscar la información por municipios. Sin embargo, es probable que en algunos acuíferos la escala

de municipios no proporcione el suficiente contraste en el área de estudio, por lo que entonces será necesario pasar a una unidad territorial más pequeña que podría ser a nivel localidad. En este trabajo se utilizó la mayoría de las veces la escala a nivel municipal. En la Tabla 1 se muestran los niveles de evaluación para cada indicador.

La zonificación geográfica no siempre es posible; para los indicadores IDNC e IDR se obtiene un solo valor de escenario representado para todo el acuífero en evaluación.

Sostenibilidad del acuífero

La sostenibilidad del acuífero se evalúa con base en los resultados obtenidos en la evaluación de cada indicador de acuerdo con su valor de escenario, los cuales son multiplicados por su peso asignado y sumado a las evaluaciones de los indicadores restantes. Los valores finales son normalizados en escala de 1 a 10; para ello se usará la Ecuación (5), la cual presenta el cálculo del índice de la sostenibilidad. Estos valores índices son clasificados para definir la clase de la sostenibilidad (sostenible, moderada, baja, muy baja e insostenible) de la zona y con ello observar cuáles son las zonas que presentan una sostenibilidad ineficiente:

$$Sostenibilidad_I = \frac{\sum_{i=1}^N I_i * P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (5)$$

Donde I_i es el resultado en la evaluación del indicador (valor final del indicador); P_i , el peso del indicador asignado, y $Sostenibilidad_i$ representa el índice de sostenibilidad. La ecuación representa una normalización de ponderación de los indicadores involucrados para el análisis de la sostenibilidad.

Índice de sostenibilidad del acuífero

Una vez estimados los valores de escenario final de los 10 indicadores propuestos, se integran junto con sus pesos en la Ecuación (5) para calcular el índice de sostenibilidad del acuífero, que es el valor final que describe la sostenibilidad del sistema evaluado.

Los valores finales pueden ir de 2 a 10, de este modo la clasificación de la sostenibilidad fue dividida en cuatro categorías de acuerdo con su rango de evaluación, las cuales son las siguientes: sostenible, moderadamente sostenible, baja sostenibilidad e insostenible (ver Tabla 17).

Tabla 17. Clases de sostenibilidad con base en el índice de sostenibilidad.

Valores del índice de sostenibilidad	Clases de la sostenibilidad
≤ 3	Sostenible
$> 3 - \leq 5$	Moderadamente sostenible
$> 5 - \leq 7$	Baja sostenibilidad
> 7	Insostenible

Análisis de sensibilidad y carga de peso

El análisis de sensibilidad y carga de peso para uso de metodologías en los que intervienen variables y pesos que definen la importancia de cada uno de ellos en la evaluación, como en este estudio, son importantes para identificar anomalías y ejecutar un análisis más profundo de los pesos y variables involucradas (Ramos-Leal, 2002). Lodwick, Monson y Svoboda (1990), y Napolitano y Fabri (1996) desarrollaron estos métodos para definir ajustes a ese tipo de metodologías y reducir la subjetividad, por lo que en el presente estudio se realizó este análisis de sensibilidad y carga de peso, para identificar los indicadores con mayor problema hacia la sostenibilidad de los acuíferos en México.

Dado que esta metodología se aplicó primero a nivel de acuífero y después a nivel nacional, se consideró oportuno hacer un análisis de sensibilidad y carga de peso (ecuaciones (6) y (7), respectivamente). El primer análisis sirvió para detectar el nivel de sensibilidad de la

metodología aplicada y observar la variación de resultados que se tenían al descartar cada uno de los indicadores propuestos, como lo muestra la siguiente expresión (Lodwick *et al.*, 1990), la cual fue ajustada a la metodología propuesta:

$$Sensibilidad_I = \left| \frac{S_I}{N} - \frac{S_{I-1}}{n} \right| \quad (6)$$

Donde:

$Sensibilidad_I$ = sensibilidad evaluada descartando un indicador I.

S_I = índice de sostenibilidad calculado con todos los indicadores.

S_{I-1} = índice de sostenibilidad descartando un indicador I.

N = número total de indicadores evaluados.

n = número de indicadores utilizados en la evaluación parcial de la sostenibilidad.

El segundo análisis sirvió para observar el peso efectivo (W_{SI}) (Napolitano & Fabri, 1996) que ejerce cada indicador en el resultado final (índice de sostenibilidad) (Ecuación (7)) y que pueda facilitar a los tomadores de decisiones identificar los indicadores que mayor peso tienen en la evaluación; es decir, hacer una comparación entre el peso teórico dado en la metodología contra el peso real que tiene cada indicador con el resultado final del índice de sostenibilidad:

$$W_{SI} = \frac{S_{wi} - S_{xi}}{Sostenibilidad} * 100 \quad (7)$$

Donde S_{wi} y S_{xi} son los resultados obtenidos en la evaluación del indicador y los pesos asignados, respectivamente, y *Sostenibilidad* fue el resultado de la evaluación (índice de sostenibilidad).

Sistema de información geográfica (SIG)

Se ubican geográficamente las zonas y sus clases de sostenibilidad para determinar las zonas donde se presentan las evaluaciones de sostenibilidad más desfavorables, dar soluciones y mejorar con ello la sostenibilidad del sitio.

La información necesaria con la que se debe contar para el análisis de la sostenibilidad de un acuífero y su almacenamiento en el *software* SIG se representa en la Tabla 18.

Tabla 18. Información necesaria para almacenar en un SIG.

Nombre	Tipo	Fuente principal
Geología	Polígono	INEGI
Acuífero	Polígono	Conagua
Topografía	Línea	INEGI
Hidrología	Línea y polígono	INEGI
Clima	Línea y polígono	INEGI
Pozos REPDA	Puntos	Conagua
Pozos con calidad del agua	Puntos	Conagua
Piezometría	Puntos	Conagua
Poblaciones	Polígono	INEGI
Estados, municipios, localidades	Polígono	INEGI
Red piezométrica actual	Puntos	Conagua

Resultados y discusión

Evaluación de la sostenibilidad en México

Con la metodología anterior se obtuvo el índice de sostenibilidad de acuíferos a nivel nacional, con el fin de definir sus clases de sostenibilidad. Los planos se muestran en la Figura 1.

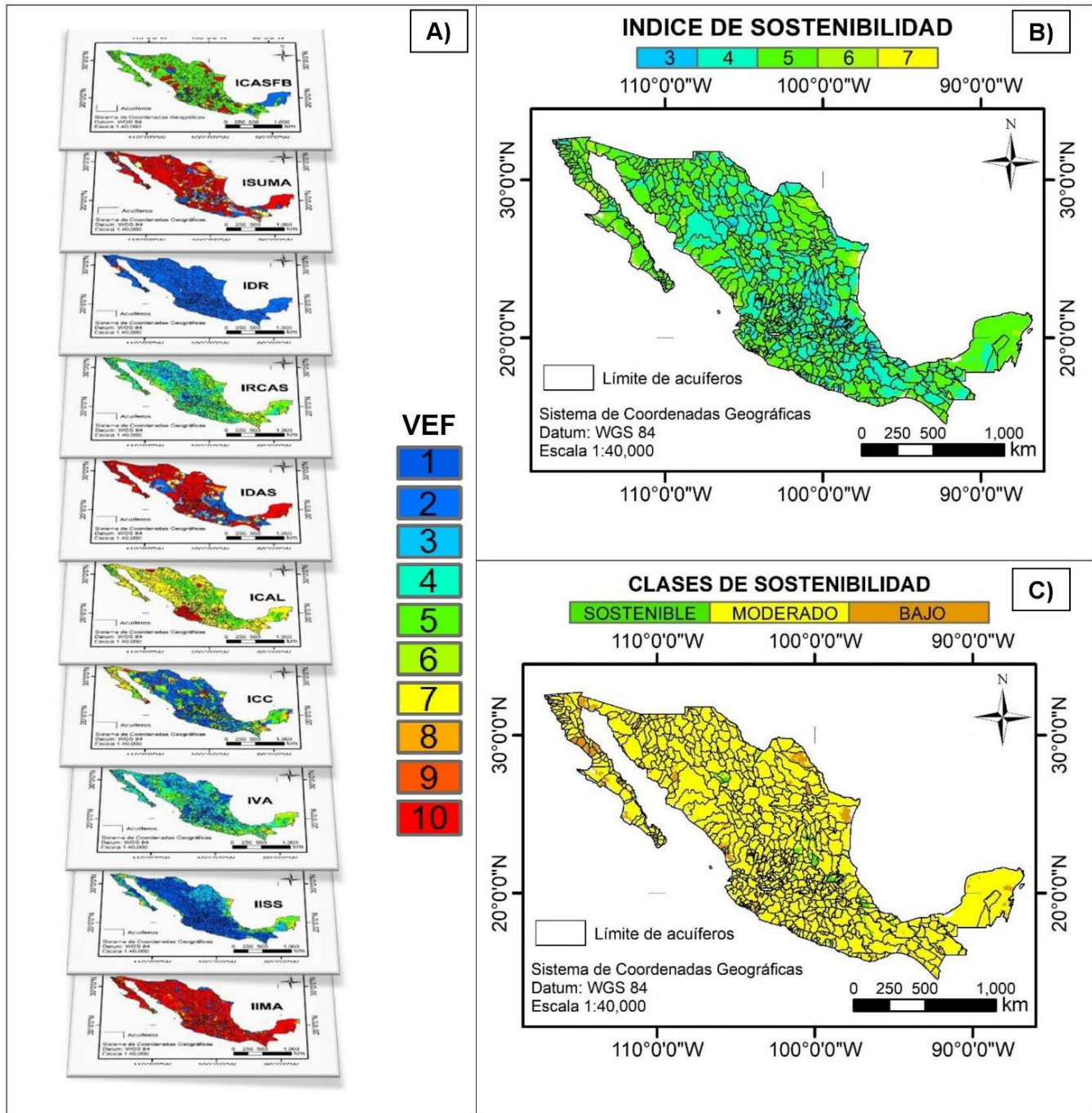


Figura 1. a) VEF de los 10 indicadores; b) evaluación del índice de sostenibilidad correspondiente a cada acuífero; c) clases de sostenibilidad obtenidas por acuífero.

Los resultados de sostenibilidad indican que el 95 % de los acuíferos está dentro de la clasificación moderadamente sostenible; el 3.5 % en una sostenibilidad baja, y el resto en la clasificación sostenible (Tabla 19).

Tabla 19. Clasificación de los resultados de sostenibilidad y la cantidad de acuíferos que caen dentro de cada clasificación.

Clasificación de sostenibilidad	Numero de acuíferos
Sostenible	7
Moderadamente sostenible	623
Baja sostenibilidad	23

Dentro de los acuíferos que presentan evaluaciones más desfavorables en la sostenibilidad se enlistan 23 con los indicadores que afectaron en su evaluación (Tabla 20).

Tabla 20. Acuíferos que presentan baja sostenibilidad.

Acuífero	Estado	Indicador
Coyotillo	Sonora	IIMA, IDAS
San José de Guaymas	Sonora	IIMA, IDAS
Laguna Agua Grande	Sinaloa	IIMA, IDAS
Valle de San Luis Río Colorado	Sonora	IIMA, IDAS
Huatulco	Oaxaca	IIMA, IRCAS
Lampazos-Villaldama	Nuevo León	IIMA, IDAS
Cihuatlán	Jalisco	IIMA, IDAS
Venustiano Carranza	Colima	IIMA, IISS, IRCAS
Marabasco	Colima	IIMA, IISS, IRCAS
Colima	Colima	IIMA, IISS, IRCAS
Comitán	Chiapas	IIMA, IISS, IRCAS
San Lucas	Baja California Sur	IIMA, IDAS, IISS
San Bruno	Baja California Sur	IIMA, IDAS, IISS
San Marcos-Palo Verde	Baja California Sur	IIMA, IDAS, IISS
Cabo San Lucas	Baja California Sur	IIMA, IDAS, IISS
Agua Amarga	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
La Bachata-Santa Rosalita	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
Ensenada	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
Santa Catarina	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
Punta Canoas-San Jose	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
Laguna De Chapala	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
El Huerfanito	Baja California	IIMA, IDAS, IISS
Allende-Piedras Negras	Coahuila	IIMA, ICASFB, IDAS

El ejercicio que se presenta en este estudio hace notar la falta de información que se necesita para llevar a cabo una mejor determinación de la sostenibilidad en los acuíferos del país; sin embargo, se considera una buena aportación desde el punto de vista ambiental, pues la gestión

del agua subterránea no debe ser vista nada más como un mero servicio a la población, sino que se deben tomar en cuenta otras componentes como subsidencia, agotamiento de pozos y sobreexplotación de acuíferos que pueden presentarse cuando la gestión del agua subterránea no se lleva de manera eficiente.

El trabajo sobre indicadores de agua subterránea realizado por la UNESCO (2007) es de gran valor, pero su implementación en México crearía una mayor incertidumbre en los resultados a causa de la falta de información que ya se ha mencionado. Aunque se sabe del costo económico para la generación de información en los acuíferos del país, es importante que no se soslaye por más tiempo su obtención, que se le conceda el gran valor de bienestar social y ambiental que tiene, y se otorgue un mayor presupuesto, que tenga como resultado la procuración de este recurso a las generaciones futuras.

Análisis de sensibilidad y carga de peso

En la Tabla 21 y Tabla 22 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad y carga de peso, respectivamente, así como los planos correspondientes a cada indicador en la Figura 2 y Figura 3.

Tabla 21. Análisis de sensibilidad de los indicadores propuestos en la metodología.

Indicador	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
ICASFB	0	3.91	1.04	0.81
ISUMA	0	2.34	0.40	0.45
IDR	0	3.39	0.99	0.27
IRCAS	0	1.97	0.65	0.35
IDAS	0	1.86	1.06	0.36
ICAL	0.01	3.89	1.57	0.68
ICC	0	2.38	1.24	0.49
IVA	0	2.37	0.85	0.44
IISS	0	2.31	1.24	0.53
IIMA	0	2.93	2.18	0.45

Tabla 22. Análisis de carga de peso de los indicadores propuestos en la metodología.

Indicador	Mínimo (%)	Máximo (%)	Media (%)	Desviación estándar	Peso teórico	Peso efectivo (%)	Peso real
ICASFB	4.33	33.78	13.88	4.69	5	13.89	5.00
ISUMA	1.53	17.54	8.97	2.84	2	5.56	3.23
IDR	3.86	27.62	5.56	1.70	5	13.89	2.00
IRCAS	1.44	17.80	7.02	1.89	3	8.33	2.53
IDAS	2.61	22.56	12.64	4.82	3	8.33	4.55
ICAL	4.37	36.76	17.56	3.38	5	13.89	6.32
ICC	1.57	13.25	4.09	2.37	2	5.56	1.47
IVA	1.23	16.28	5.95	2.17	3	8.33	2.14
IISS	1.61	19.05	4.26	3.13	4	11.11	1.53
IIMA	3.57	29.85	20.06	4.15	4	11.11	7.22

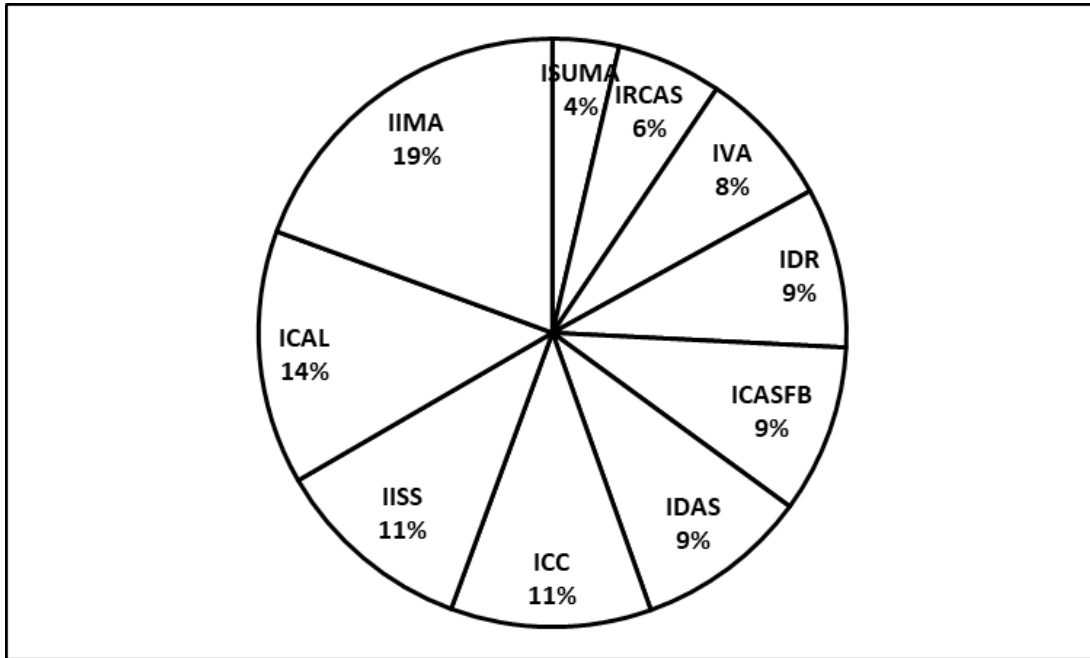


Figura 2. Resultados de evaluación sobre el impacto en la sensibilidad.

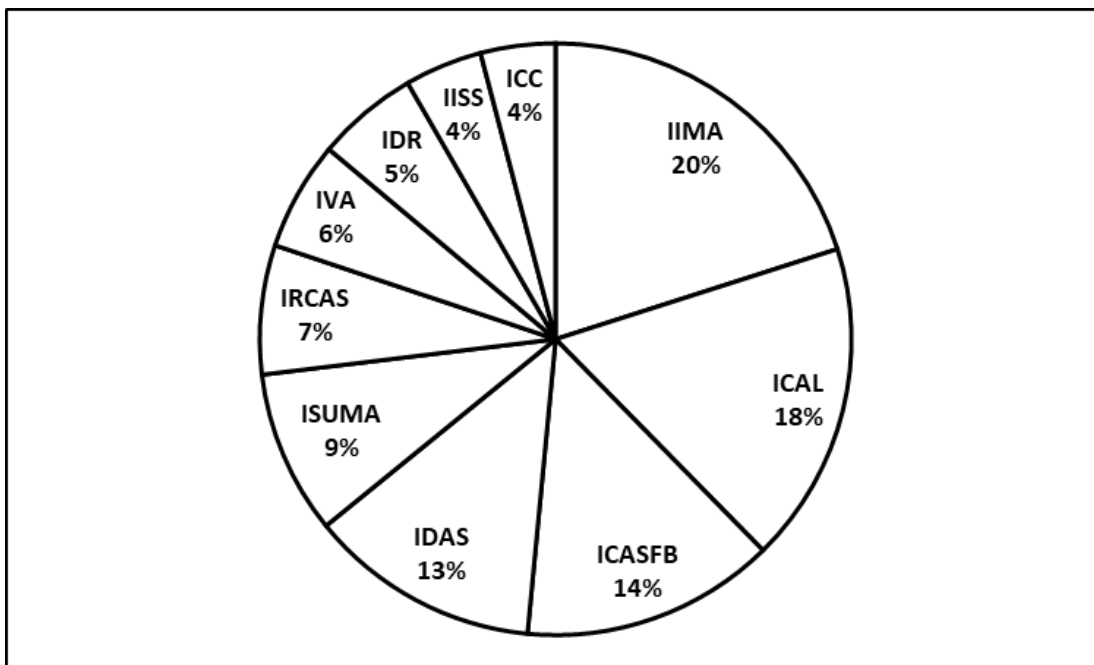


Figura 3. Comparación gráfica de los resultados de carga de peso sobre la evaluación de la sostenibilidad.

Los resultados de sensibilidad y carga de peso muestran que el indicador IIMA es el indicador que en promedio es más sensible y con mayor peso en el resultado final de la sostenibilidad a nivel nacional. Esto se debe a que en su mayoría (más del 70 % del área), su evaluación dio resultados desfavorables en la sostenibilidad al no tener muy buena proporción de agua tratada con respecto al agua suministrada. Esto serviría para atender y solicitar mayor inversión en plantas de tratamiento a nivel nacional, como una herramienta para garantizar el buen desarrollo sostenible hídrico del país. Al contar con más suministro de agua tratada para los diferentes usos disminuiría de forma significativa la demanda de los recursos hídricos superficiales y subterráneos del país.

Por otro lado, el indicador siguiente al que hay que poner atención es el indicador ICAL, debido a que también tuvo un peso importante en el resultado final de la sostenibilidad y más aún en los acuíferos occidentales, con más problemas en específico en los acuíferos de Jalisco, Michoacán y Guerrero.

Conclusiones y recomendaciones

Se propone una metodología denominada índice de sostenibilidad de acuíferos basada en la evaluación de diez indicadores, cada uno de ellos con varios escenarios. El uso de esta metodología proporciona una visión

de la sostenibilidad en los acuíferos, facilitando la toma de decisiones en cuanto a la gestión del agua, y permitiendo identificar de manera más eficiente las áreas geográficas menos sostenibles y los indicadores que presentan los escenarios más desfavorables.

En cuanto a los indicadores que presentaron las evaluaciones más desfavorables fueron los indicadores IIMA (indicador “Inversión en materia de agua”), seguido de ISUMA (indicador “Suministro de agua por habitante”) e IDAS (indicador “Dependencia al agua subterránea”). Esto se observó en 23 acuíferos, donde se aprecia una sostenibilidad baja. Para el caso del primer indicador, se observó que no se cuenta con las suficientes plantas de tratamiento y/o volumen de agua tratada para mantener un mejor equilibrio con el volumen de agua concesionada para los diferentes usos. Mejorando la inversión en plantas de tratamiento, los indicadores ISUMA e IDAS también serían afectados de una manera positiva y mejorarían su evaluación, sobre todo para las zonas del norte y sureste del país (zonas donde también estos indicadores se vieron afectados).

La calidad del agua subterránea para consumo humano, de acuerdo con la evaluación del indicador ICAL (indicador “calidad del agua subterránea”), se encontró altamente impactada en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán y la Ciudad de México, y en zonas puntuales en los estados de Sonora, Coahuila e Hidalgo. Comparando los resultados de este indicador con el indicador IVA (indicador “Vulnerabilidad de acuíferos”) e IRCAS (indicador “Riesgo a la contaminación del agua subterránea”), se tiene una importante similitud, ya que en estas zonas la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación es alto, infiriendo que la contaminación se debió a las actividades antrópicas que deterioran la

calidad del recurso hídrico subterráneo. Así, el saneamiento de los acuíferos en estas zonas es de mayor prioridad, por lo que se recomienda un muestreo a detalle que contemple más parámetros o la generación de información que permita hacer una evaluación de sostenibilidad de acuíferos más precisa.

Con la modificación del indicador IISS (indicador de intrusión salina y salinización) a la evaluación propuesta por Mendoza-Millán (2015) se pudo hacer una evaluación más práctica para conocer las zonas con problemas de intrusión salina y salinización de acuíferos en el país. Las zonas que presentaron valores de escenario alto se identificaron con problemas de intrusión salina y fueron fuertemente marcadas en la península de Baja California y Yucatán, y en las partes costeras de los estados de Sonora, Sinaloa, Tamaulipas y Veracruz. Por tal motivo, es importante hacer estudios de intrusión salina más detallados en estas zonas. Por otra parte, hubo valores de escenario de 3 y 4 (valores de escenario moderados) en zonas continentales, y que pueden ser mayor apreciadas en la porción norte del país, en los estados de Chihuahua, Nuevo León y Coahuila, siendo este último el que mayor área de impacto por SDT tiene, lo que muchas veces se debe a las prácticas agrícolas en el área.

Los resultados finales obtenidos dieron índices de sostenibilidad que van de 2 a 7, y tres tipos de clases de sostenibilidad (sostenible, moderado y alto), siendo la sostenibilidad moderada la de mayor proporción en el país. No se presenta la clase insostenible en ninguna zona de México. Tomando las recomendaciones anteriores de los indicadores IIMA (indicador de inversión en materia de agua), ISUMA (indicador de suministro de agua por habitante), IDAS (indicador de

dependencia al agua subterránea) e ICAL (indicador de calidad del agua subterránea), la sostenibilidad del país enfocada en el recurso hídrico subterráneo mejorará de una forma positiva.

Herramientas como los *softwares* de sistemas de información son de gran ayuda para manipular, interpretar, actualizar y realizar álgebra de mapas, para así cuantificar y cualificar la sostenibilidad del acuífero de interés.

Es necesario continuar con la aplicación de esta metodología en diversos tipos de acuíferos y detectar las adecuaciones de los indicadores seleccionados, así como la integración de algunos otros que se puedan medir. La evaluación de este tipo de metodologías se sugiere hacer en periodos de cinco años, para observar los cambios en el desarrollo sostenible.

Referencias

- Cervera-Gómez, L. E. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos*, 8(16), 9-41.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019). *Disponibilidad por acuífero*. Recuperado de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acui_feros.html

- Chachadi, A., & Lobo-Ferreira, J. (2001). Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. In: *Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology* (pp. 143-156), Anna University, Chennai, India.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2000). *Norma Oficial Mexicana OM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Foster, S. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. International Conference Noordwijk Aan Zee, The Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague.
- Herrera-Carbajal, S., Villalba-Atondo, A. I., & Molinar-Tabares, M. E. (2007). Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del río San Pedro en Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1), 21-30.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *Censo de población y vivienda 2000*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of maps operation in geographical information systems – Suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4, 413-428.
- Mendoza-Millán, J. A. (2015). *Metodología de indicadores de sostenibilidad en acuíferos. Caso de estudio acuífero Costera de Veracruz* (tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Napolitano, P., & Fabbri, A. G. (April, 1996). Single parameter sensibility analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. In: *Proceedings of the Vienna Conference*, 235 (pp. 559-566). International Association of Hydrological Sciences.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/9789240015241>
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (1987). *Asamblea General. A/42/427. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Recuperado de http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf. Consultado en 2013

- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015*. Recuperado de https://www.senado.gob.mx/comisiones/fomento_economico/eventos/docs/resolucion_080916.pdf
- Ponce, V. M., & Da-Silva, J. (2018). *How much water could be pumped from an aquifer and still remain sustainable?* Recuperado de http://ponce.sdsu.edu/how_much_water_could_be_pumped_from_an_aquifer.html
- Ramos-Leal, J. A. (2002). *Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato* (tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Semarnat, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Integración y actualización del inventario nacional de generación de residuos peligrosos (INGRP) 2004-2013*. México, DF, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators. IHP-VI series of groundwater No. 14*. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.