

Indicadores de sustentabilidad a nivel cuenca Sustainability indicators at watershed level

M. G. Hinojosa-Pérez ^a, M. Hernández-Juárez ^a, E. M. Otazo-Sánchez ^a, O. A Acevedo-Sandoval ^{a*}

^a Área académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

El manejo sustentable de cuencas hidrológicas implica poner en marcha un plan de desarrollo sujeto a continuo monitoreo y ajuste, a este respecto, realizar una evaluación adecuada de este depende de los indicadores e índices disponibles. Es aquí donde la selección de un conjunto de indicadores relevantes desempeña un papel importante, puesto que se debe determinar que este conjunto ajuste adecuadamente al problema a describir y que diagnostique las limitaciones o alcances del manejo establecido. El presente trabajo realiza una revisión que integra el uso de indicadores de sustentabilidad en la evaluación del manejo sustentable a nivel cuenca, siendo de especial relevancia la selección de estos. Parte del objetivo de este trabajo es proporcionar información de interés que permita superar la incertidumbre durante el proceso de identificación y selección de indicadores para la evaluación de sustentabilidad de una cuenca hidrológica. Como procesos de selección resaltan la planeación participativa y la obtención de una primera aproximación de indicadores a través de revisiones de literatura. Con la revisión realizada, el índice de sustentabilidad de cuencas fue identificado como el más utilizado, este mide la respuesta a ciertas presiones, a pesar de que no mide completamente todas las respuestas en el sitio de interés obtiene resultados fáciles de interpretar, y muestra el vínculo entre la sustentabilidad y las actividades humanas. También fue de uso común un conjunto de indicadores no agregados para definir la situación de la cuenca, la evaluación con este permite analizar la condición actual, identificar tendencias y obtener modelos espaciales útiles para establecer un sistema eficaz en la planeación y creación de un manejo sustentable de la cuenca.

Palabras Clave: Manejo sustentable de cuencas, Índice de sustentabilidad, Indicadores no agregados, Planeación participativa, Revisión.

Abstract

Watershed sustainable management implies putting in motion a development plan attached to continuous monitoring and adjustment, in this regard, carrying out an accurate evaluation of this depends on the indicators and indices available. This is where the selection of a relevant indicators set plays an important role, since it must be determined that it adequately fits to the problem to be described and that it diagnoses the limitations or scope of the established management. The present work carries out a review that integrates the use of sustainability indicators in the evaluation of sustainable management at the watershed level, the selection of these being of special relevance. Part of the objective of this work is to provide information of interest that allows to overcome the uncertainty during the identification and selection process of indicators for watershed sustainability assessment. As selection processes, participatory planning and obtaining a first approximation of indicators through literature reviews stand out. With the review carried out, the watershed sustainability index was identified as the most used, it measures the response to certain pressures, although it doesn't fully measure all the responses at the site of interest, it obtains results that are easy to interpret, and shows the link between sustainability and human activities. A set of non-aggregated indicators was also in common use to define the situation of the watershed, the evaluation with this allows to analyze the current condition, identify trends and obtain useful spatial models to establish an effective system in the planning and creation of a watershed sustainable management.

Keywords: Watershed sustainable management, Sustainability index, Non-aggregated indicators, Participatory planning, Review.

*Autor para la correspondencia: acevedo@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: hi467879@uaeh.edu.mx (María Guadalupe Hinojosa-Pérez), martin_hernandez@uaeh.edu.mx (Martín Hernández-Juárez), profe_4339@uaeh.edu.mx (Elena María Otazo-Sánchez), acevedo@uaeh.edu.mx (Otilio Arturo Acevedo-Sandoval)

1. Introducción

Una cuenca hidrográfica es aquella superficie delimitada topográficamente por un parteaguas, el cual permite reunir los escurrimientos que desembocan en un punto común (Cotler, Galindo, González, Pineda, & Ríos, 2013). Si bien es cierto que las cuencas hidrográficas son utilizadas como unidades de análisis físicos, su concepto ha tomado importancia mundial para análisis socioeconómicos (Wang *et al.*, 2016) enfocados al desarrollo sustentable.

La gestión integral de la cuenca está basada en la cooperación y colaboración de todos los involucrados que comparten una visión en común. Este tipo de gestión está dirigida a la comprensión de la relación entre las partes de la cuenca, lo anterior implica reconocer los impactos aguas abajo generados por los procesos aguas arriba, además de valorar los servicios ecosistémicos que proporciona (Cotler *et al.*, 2013).

El manejo integral de cuencas está definido principalmente por las etapas: diagnóstico, planeación, implementación y evaluación; este tiene como objetivo generar un plan integral de desarrollo que incluye el uso sustentable de los recursos como un buen manejo de cuenca (Wang *et al.*, 2016).

El manejo sustentable de cuencas implica el uso adecuado de los recursos para un aprovechamiento óptimo que genere un mínimo daño al medioambiente (Srivastava, Sharma, & Raina, 2010), y que propicie un equilibrio con el desarrollo económico y social. Para su aplicación se requiere: planeación, asociación y participación de las partes interesadas; así como reconocer los vínculos entre las diferentes zonas de la cuenca, las interrelaciones entre el uso del suelo y agua (calidad y cantidad), las necesidades económicas y ambientales, entre otras (Pires *et al.*, 2017).

Para la planificación y el crecimiento sustentable de la cuenca se debe considerar como objetivo principal la conservación del suelo y el agua (Pande, 2020); en este contexto, es de gran importancia establecer el impacto generado en los recursos por el ámbito económico y social, con el propósito de gestionar un plan integral para el manejo sustentable de la cuenca.

Para simplificar la información que permita establecer el manejo de la cuenca, se puede hacer uso de indicadores ambientales y socioeconómicos. Estos indicadores también favorecen a crear una comunicación eficaz entre los grupos participantes como son los tomadores de decisiones y políticas, gestores, planificadores, administradores, científicos y el público en general (Pires *et al.*, 2017).

Los indicadores se pueden utilizar para informar y medir el estado y el desempeño del medioambiente, del ámbito social y económico. Al igual que son útiles para facilitar la presentación de informes sobre el progreso hacia el desarrollo sustentable. Asimismo pueden usarse en la planificación, aclaración de objetivos y políticas, y establecimiento de prioridades (OECD, 2003).

La presente revisión de literatura, tiene como objetivo proporcionar información relevante para la identificación de un marco coherente de indicadores que permita evaluar la sustentabilidad de la cuenca, ya sea utilizando indicadores agregados o no. Así es como la información presentada contribuye a disminuir la incertidumbre generada al momento de la selección de un conjunto de indicadores e índices adecuados para el análisis del manejo establecido.

Para la revisión anunciada anteriormente se llevó a cabo una búsqueda de artículos y textos relacionados con el uso de indicadores de sustentabilidad para la evaluación del manejo sustentable a nivel cuenca con palabras clave en inglés y español como: watershed (cuenca), sustainability (sustentabilidad), sustainable (sostenible), indicator (indicador), management (manejo), review (revisión), index (índice). Lo anterior facilitó identificar 42 documentos de interés para el cumplimiento del objetivo de este trabajo, estos documentos fueron publicados en las bases de datos: Scopus, Scielo y Google Académico. La búsqueda se ejecutó para el intervalo de tiempo del 2001 al 2021, en la cual el 86.00 % de los documentos son posteriores al año 2009.

Se revisaron 21 investigaciones, 15 *review*, cuatro secciones de libros y dos tesis de posgrado. Con los documentos anteriores se logró establecer un panorama general del manejo sustentable de cuencas y el uso de indicadores para su evaluación, dando énfasis a la identificación de indicadores relevantes que representen adecuadamente la situación actual en la cuenca.

A partir de la búsqueda efectuada se filtraron 16 investigaciones publicadas del año 2001 al 2020, de las cuales el 75 % son posteriores al 2014. Por último, el análisis de estas publicaciones permitió realizar una recopilación de indicadores utilizados por varios autores para evaluar el manejo de los recursos e identificar el impacto de acciones antropogénicas a escala de nivel cuenca, con la revisión de estas investigaciones se categorizó a los indicadores de sustentabilidad en indicadores ambientales y socioeconómicos. Esta recopilación ejemplifica la obtención de una primera aproximación de un conjunto de indicadores para el análisis de sustentabilidad haciendo referencia a análisis anteriores.

2. Conceptos básicos del manejo sustentable de cuencas

Cuenca hidrográfica: es un “elemento hidrológico natural” el cual drena a través de los ríos (superficiales y subterráneos) para dirigirse a un punto en particular (Pande, 2020) que comúnmente es llamado salida de la cuenca. De la misma forma, la cuenca es una unidad valiosa para el análisis socioeconómico y la consideración de varios cambios físicos relacionados con el uso y crecimiento de los activos.

Como unidad física una cuenca incluye los recursos agua, suelo y vegetación. Por otro lado, la unidad socioeconómica incluye a las personas, los procesos de producción agrícolas y ganaderos, así como las interacciones con los recursos suelo y agua, las estrategias de conservación, y las actividades sociales, económicas y culturales (Gashaw, 2015).

El funcionamiento de la cuenca se puede delimitar territorialmente (figura 1) de forma general en tres zonas: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja (Cotler *et al.*, 2013). Las características de cada zona definen la ocurrencia de los escurrimientos, ya que estos acontecen después de que la capacidad de almacenamiento del suelo y la acción de intercepción de la cubierta vegetal se han agotado, originando así la recarga de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

La región más cercana al parteaguas es la cuenca alta, aquí es donde se generan los primeros escurrimientos debido a que se encuentra en la mayor elevación, generalmente esta región está representada por sistemas de montañas y lomeríos. La

zona de transición (cuenca media) entre la parte alta y la baja es donde los escurrimientos iniciales se unen aportando a las corrientes concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica; por lo tanto, es un área de transporte y erosión (Cotler *et al.*, 2013).

Como la última zona de una cuenca esta la parte baja, esta es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. En esta zona se encuentran ecosistemas importantes, como los humedales terrestres y costeros; por lo cual, es el sitio donde se acumulan los impactos de la cuenca (Cotler *et al.*, 2013).

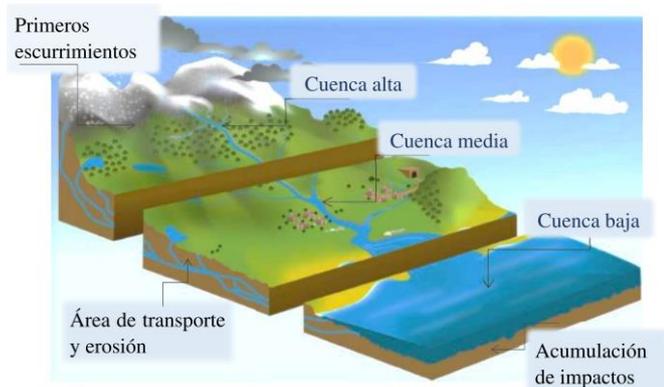


Figura. 1. Zonas de una cuenca, adaptado de Barragan A., Daza L., Calderón L., Navarro C., & Tosse L. (2018).

Las cuencas tienen límites bien definidos y salidas puntuales, además de que están estructuradas jerárquicamente por subcuencas y microcuencas (figura 2), del mismo modo, las anteriores están delimitadas por un parteaguas que permite la conducción de escurrimientos al curso principal del río. De forma análoga, al interior de las subcuencas se ubican las microcuencas, cuyas fronteras pueden incluir o no límites administrativos (Cotler *et al.*, 2013).

La anterior jerarquización de la cuenca ayuda a determinar la escala de análisis (cuencas, subcuencas o microcuencas), la elección de esta depende de los objetivos y problemas que se busquen resolver, así como de los alcances del manejo y gestión a implementar o diagnosticar. A nivel cuenca se pueden establecer las interacciones que generan aspectos como: deforestación, crecimiento intensivo y desordenado de actividades agrícolas, ganadería extensiva, planeación ineficiente de procesos de producción y de asentamientos humanos, entre otros (Cotler *et al.*, 2013). Este conjunto de problemas afecta ampliamente los servicios ecosistémicos y propicia la degradación de los recursos.

Por consiguiente, la cuenca como unidad de estudio permite relacionar los impactos del uso del suelo sobre los elementos que la conforman con base en los factores causantes, además de incluir los efectos de fenómenos naturales (Partida, 2018). De modo que, un análisis jerárquico de la cuenca permite relacionar con mayor alcance los aspectos sociales, culturales, políticos, económicos y ambientales que influyen en el manejo sustentable de esta.

Manejo sustentable de cuencas: según Wang *et al.* (2016), la primera referencia del manejo de cuencas se menciona en el texto sagrado del hinduismo de 800 A. C. "Atharva Veda" verso 19, 2.1 donde se establece que: uno debería tomar acción adecuada para el uso y la conservación del agua de las montañas, lo mismo que los pozos, ríos y el agua de lluvia para

beber, así como de la agricultura y las industrias. El manejo sustentable también implica el empleo apropiado de los recursos del ecosistema (suelo, agua, aire y biodiversidad), además persigue el objetivo de establecer una forma ideal de demanda que propicie una mínima degradación de este (Pande, 2020; Wang *et al.*, 2016).

De forma semejante, el Banco Mundial y las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), entre otros, usan el enfoque de manejo sustentable de cuencas para evaluar los beneficios ambientales de desarrollar proyectos. Así como para intentar mejorar en una manera sustentable la provisión de bienes y servicios de las cuencas, incluidos la agricultura, silvicultura y pesca (Wang *et al.*, 2016).

Un elemento esencial del manejo sustentable de cuencas son los indicadores, estos se definen como un parámetro, o un valor derivado de parámetros. Un indicador cumple con las funciones de señalar, proveer información y describir el estado de un fenómeno, ambiente o área; además de que su significado se extiende más allá de un valor cuantitativo (OECD, 2003). Paralelamente, proporciona una visión integral y una representación confiable de tendencias y patrones que facilitan centrar la atención en cuestiones de importancia (Lyytimäki *et al.*, 2018). Al agregar o ponderar un conjunto de indicadores (indicador compuesto) se genera un índice, este mide ideas multidimensionales que no se pueden explicar utilizando solo un indicador (Juwana, Muttil, & Perera, 2012).

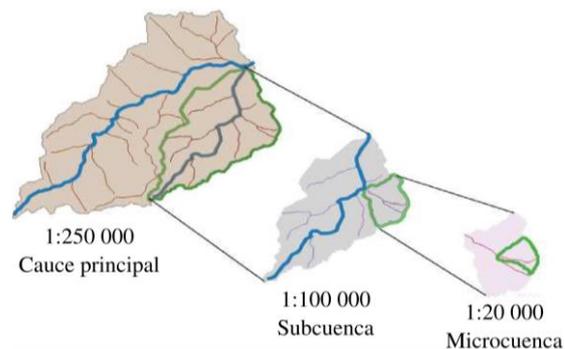


Figura. 2. Jerarquía de la cuenca, elaboración propia.

Por lo anterior mencionado, los indicadores de sustentabilidad son una forma de monitorear la integración de la economía y toma de decisiones ambientales, para así analizar las políticas y calibrar los resultados en el manejo sustentable de la cuenca. Adicionalmente, estos indicadores manifiestan la relación existente que compromete y correlaciona los aspectos ambientales, sociales y económicos a una escala definida (Dahl, 2012; Fraser, Dougill, Mabee, Reed, & McAlpine, 2006).

3. Principios del manejo sustentable de cuencas

El manejo de cuencas ha pasado de un enfoque físico de conservación y utilización del agua y suelo a la integración del desarrollo social, económico y ambiental. De modo que, el desarrollo sustentable implica integrar de una forma equilibrada las metas y objetivos ambientales con el ámbito social y económico (Moldan, Janoušková, & Hák, 2012).

La directriz que persigue lograr el manejo sustentable es: una relación soportable para el medio ambiente, viable y

equitativa económica y socialmente. Esta directiva está enfocada en maximizar el bienestar humano en el presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones (OECD, 2001).

Para el manejo sustentable de una cuenca no existe una metodología que alcance de forma efectiva una meta trazada para el desarrollo sustentable, ya que este se va desplazando progresivamente (Wang *et al.*, 2016), sin embargo, se puede delimitar un modelo conceptual (figura 3).

El modelo para el manejo sustentable de una cuenca inicia con la evaluación del estatus actual que tiene como objetivo caracterizar su situación mediante indicadores de salud del ecosistema. Posteriormente, con el uso de un método participativo se pueden identificar los intereses y objetivos de las partes involucradas (organizaciones, instituciones, participantes gubernamentales, localidades, etc.) que muestran interés en el manejo sustentable de la cuenca, para finalmente crear un plan que permita cumplir las metas trazadas.

Al implementar el plan de manejo de la cuenca se debe ejecutar continuamente el monitoreo de las estrategias que lo conforman con la finalidad de evaluar el éxito o las fallas presentadas. Lo anterior permite revalorar los objetivos y realizar ajustes para mejorar el progreso del manejo sustentable de la cuenca (Wang *et al.*, 2016).

Por consiguiente, el manejo de cuencas proporciona un marco para el desarrollo sustentable, en el cual integra la toma de decisiones como ayuda en la evaluación del medioambiente y el estado de la cuenca. Con el análisis del manejo de la cuenca se logra identificar sus problemas, definir y reevaluar los objetivos a corto y largo plazo, así como las acciones y las metas. De igual manera, permite diagnosticar los beneficios y costos para implementar y monitorear acciones (Chang, DiGiovanni, Mei, & Wei, 2016).

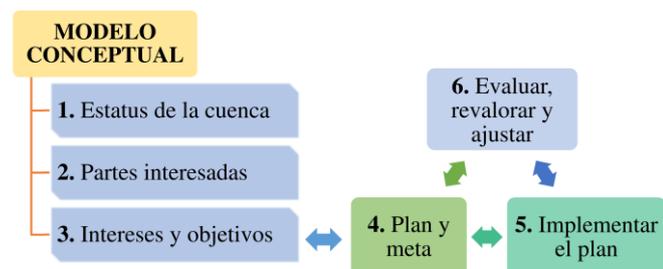


Figura. 3. Modelo conceptual para el desarrollo de un plan de manejo de una cuenca, adaptado de Wang *et al.* (2016).

4. Identificación de indicadores de sustentabilidad

Los indicadores de sustentabilidad deben evolucionar con el tiempo a medida que cambian las circunstancias (Fraser *et al.*, 2006; Juwana *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2017) y, a su vez, basarse en los tres pilares fundamentales de sustentabilidad: ambiental, social y económico.

Afirmar que todos los indicadores desarrollados por expertos son relevantes para situaciones locales es imposible, por esta razón, se debe garantizar que los indicadores midan con precisión lo que es localmente importante (Blanchet & Girois, 2013; Dahl, 2012; Fraser *et al.*, 2006).

4.1. ¿Qué debe incluir un indicador?

Un indicador adecuado cumple con la función de hacer visible un problema, de adaptarse al cambio de condiciones ambientales y socioeconómicas. Debido a esto, es de relevancia que se ajusta específicamente al problema de análisis. También debe determinar una respuesta inmediata y ser reproducible bajo estándares establecidos (ser medible y específico) (Hak, Kovanda, & Weinzettel, 2012; Lyytimäki *et al.*, 2018).

Adicionalmente, un indicador debe presentar fácil disponibilidad y entendimiento para el público en general, así como implicar un bajo costo para su desarrollo; por último debe contar con los fundamentos científicos que permitan cambios en su metodología (Cornescu & Adam, 2014; Dahl, 2012; Malta & Marques da Costa, 2021).

Los indicadores de sustentabilidad ofrecen una medida de la efectividad de las gestiones y políticas para lograr que un sistema se mueva hacia un estado más sustentable, para lo cual deben contar con la capacidad de evaluar las relaciones de causa y efecto (McCool & Stankey, 2004).

Para generar un indicador se pueden tomar en cuenta las siguientes consideraciones (Dahl, 2012; OECD, 2003; Partida, 2018):

- Uso de un marco conceptual común, el cual este basado en un entendimiento general de conceptos y definiciones sobre algún modelo, por ejemplo: el modelo presión-estado-respuesta (PER) o por mencionar otro, el marco para la evaluación de sistemas de manejo incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS).
- Identificar los criterios que permitan ayudar a seleccionar indicadores y validar su elección.
- Definir su relevancia política, solidez analítica y mensurabilidad.
- Examinar la interacción dinámica y las tendencias entre diferentes sectores (ambientales, sociales y económicos) y procesos.
- Contar con orientación para el uso de indicadores en relación con la evaluación de desempeño, en este sentido, cabe señalar que son solo una herramienta y deben ser interpretados en contexto para adquirir su significado completo.

Basándose en lo anterior, aunque se genere el mejor sistema de indicadores posible, este necesita complementarse con otras herramientas e insumos; igualmente debe alinearse con los valores del grupo objetivo (reforzarlos y no amenazarlos) y contar con la confianza de los usuarios (Dahl, 2012). Por último debe describir las interacciones, conexiones e impactos entre las partes de la cuenca (Gashaw, 2015).

4.2. Identificación del indicador.

Una forma de identificar indicadores relevantes es mediante procesos participativos, los métodos utilizados en estos procesos para recolectar, interpretar y mostrar datos deben ser fáciles y eficaces para que todas las partes interesadas puedan

participar en la consulta (Dahl, 2012; Fraser *et al.*, 2006). Para el manejo sustentable de cuencas, los procesos participativos se pueden estructurar en torno a la identificación y seguimiento de indicadores de sustentabilidad que puedan afectar la gestión ambiental.

Con el análisis de los 15 *review* y las cuatro secciones de libros obtenidos mediante la búsqueda relacionada con el uso de indicadores de sustentabilidad para la evaluación del manejo sustentable a nivel cuenca en las bases de datos: Scopus, Scielo y Google Académico, destaca el proceso de consulta comunitaria como base de la identificación de un conjunto de indicadores (figura 4).

Los autores de los documentos analizados mencionan que un conjunto de indicadores puede estar definido por un grupo de expertos u obtenerse de una revisión de literatura mediante la recopilación de estudios representativos para el tema de interés. Sin embargo, un proceso participativo de las partes involucradas en la cuenca permite describir la situación actual del área de estudio, además de que proporciona información para la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias, y como consecuencia promueve la participación y el compromiso comunitario.



Figura 4. Proceso de consulta comunitaria para selección o definición de indicadores, adaptado de Fraser *et al.*, 2006; Juwana *et al.* (2012).

Para el proceso de consulta comunitaria se deben establecer claramente los límites del sistema en estudio, y las relaciones existentes entre las partes involucradas y los componentes de la cuenca; para así, definir los objetivos y metas trazadas bajo una escala temporal necesaria para el proceso del sistema en su totalidad. Igualmente, se deben establecer los niveles de jerarquía (elementos) que lo describan como un completo (Blanchet & Girois, 2013).

La jerarquización permite analizar las interacciones de los elementos, reconocer el impacto de estos en el sistema y determinar el desempeño de los indicadores, los cuales se valoran según su peso y robustez para obtener índices (Malta & Marques da Costa, 2021).

Si un indicador proporciona información que responde a la problemática planteada, al igual que mide el progreso con base en los objetivos, y entre lo anterior responde preguntas oportunas e informa con claridad el rango del problema identificado, se puede decir que es un indicador destacado (Hak *et al.*, 2012); no obstante, se debe examinar la precisión

y facilidad de uso antes de probarlos para obtener una buena interpretación (Fraser *et al.*, 2006; Moldan *et al.*, 2012).

En síntesis, los indicadores deben cumplir con criterios tales como: permitir medir el nivel de logro en las distintas dimensiones de sustentabilidad y reflejar directrices realistas. Para lo cual, es relevante contar con un mecanismo de recolección de datos (datos válidos, confiables, disponibles y actualizados), sobre todo deben evitar redundancia (el mismo problema no debe estar descrito por los mismos indicadores), ser comparables (rastrear tendencias) y útiles para el grupo interesado (Lyytimäki *et al.*, 2018).

4.3. Valoración y clasificación de los indicadores seleccionados.

Realizar una comparación entre los indicadores seleccionados para el análisis de la cuenca y algunos indicadores nacionales o internacionales permitirá valorar y clasificar el conjunto de indicadores según su importancia. Esta valoración se puede efectuar con una categorización de excelente (100 %) y pobre (0 %), o determinando una escala cualitativa de tres niveles (no significativo, significativo o altamente significativo). El análisis anterior debe estar basado en el nivel de cumplimiento de los pilares de sustentabilidad (Fraser *et al.*, 2006; Malta & Marques da Costa, 2021; Pires *et al.*, 2017).

Después de la selección del conjunto de indicadores, el volverlos a evaluar mediante la técnica comunitaria permite distinguir cuáles son los más específicos para la región de estudio. La consulta comunitaria funciona como un foro neutral donde se puede discutir la problemática existente en la cuenca. Al mismo tiempo, ayuda a desarrollar la capacidad de la comunidad para abordar futuros problemas y muestra el compromiso de esta (Fraser *et al.*, 2006).

Es común que este consenso conduzca a indicadores que no están en disponibilidad de ser medibles, en lugar de obviarlos, estos se pueden considerar como ayuda para resaltar puntos clave en la ausencia de información o investigación de la cuenca (Blanchet & Girois, 2013; Fraser *et al.*, 2006).

Los indicadores son útiles si están organizados en un marco coherente en lugar de individualmente como una simple colección de elementos. Por consiguiente, en el caso de indicadores relacionados con el desarrollo sustentable es de gran importancia definir el marco de componentes para su clasificación, ya que estos abarcan temas ambientales, sociales y económicos (Pires *et al.*, 2017).

El objetivo de determinar el marco de componentes es proponer una clasificación que permita describir los aspectos ambientales y socioeconómicos, incluyendo sus respectivos cambios y buscando niveles de consumo o producción que ejercen presión sobre el medioambiente (Juwana *et al.*, 2012). Como resultante de esta clasificación, se logra identificar el conjunto de parámetros que definen a los indicadores para determinar el progreso y definir sus alcances (Pintér, Hardi, Martinuzzi, & Hall, 2012).

Cabe mencionar que para definir la clasificación de indicadores, se parte de la recopilación de información localmente relevante para la cuenca, la cual debe ser recolectada y analizada por las partes interesadas. Al igual que, debe permitir equilibrar y contrastar los factores ambientales y socioeconómicos que ayudarán a conocer las implicaciones de las acciones humanas, además de identificar sus impactos en el

uso de la tierra y el manejo de los recursos (Juwana *et al.*, 2012).

4.4. *Recolección y procesamiento de información.*

La etapa de recolección y procesamiento de información requiere especial cuidado, ya que los indicadores deben ser analizados, procesados y estandarizados (proceso de validación) para así definir los índices que mejor cumplen con los criterios de sustentabilidad (Juwana *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2017). Para definir un índice se realiza el agregado de los indicadores, el anterior está basado en las propiedades de la información disponible y el propósito de su desarrollo (Juwana *et al.*, 2012).

Contar con información adecuada está determinado por el presupuesto, los sitios de monitoreo y la frecuencia de muestreo; de igual forma es de gran importancia la disponibilidad de tecnología, la determinación del propósito administrativo y la representatividad (Behmel, Damour, Ludwig, & Rodríguez, 2016).

La disponibilidad y calidad del monitoreo determina la fiabilidad de la información, a su vez, esta ayuda a comprender, proteger y mejorar los hábitats proporcionando datos que permiten cuantificar cambios ambientales en la cuenca; por lo tanto, contar con redes de monitoreo es un elemento clave para la gestión y protección del medioambiente, ya que registran información sobre el estado actual del recurso (Jiang *et al.*, 2020).

4.5. *Evaluación de la sustentabilidad con el uso de indicadores.*

Como se mencionó en la sección anterior, la información recopilada permite obtener una evaluación de la sustentabilidad de la cuenca mediante el agregado de indicadores para producir un índice, teniendo en cuenta sus interacciones y la distinción de los impactos generados. Así mismo, se pueden analizar las condiciones y tendencias sin agregar a los indicadores (identificación de relaciones), lo anterior permite reducir la subjetividad en la interpretación del conjunto de indicadores y con lo cual facilita su entendimiento (Graymore, Sipe, & Rickson, 2008).

Algunos elementos que se deben tener en cuenta para la evaluación de la sustentabilidad en la cuenca son (Juwana *et al.*, 2012):

- Definir el peso de los indicadores (ponderación)
- Agregar los indicadores
- Analizar robustez del índice (incertidumbre)
- Interpretar el valor final del índice

En primer lugar, el peso para cada indicador puede asignarse con base en el análisis de datos que lo conforman (métodos estadísticos) o mediante métodos participativos (Juwana *et al.*, 2012). Seguido del agregado de componentes e indicadores para el desarrollo de un índice. Para lo anterior, los métodos más comunes son los aritméticos (suma de valores ponderados, los valores bajos se compensan con los altos) o geométricos (multiplicación de valores ponderados, no hay compensación entre los valores) (Juwana *et al.*, 2012).

Como elemento importante de la evaluación de la sustentabilidad en la cuenca está el análisis de robustez, el cual proporciona una mejor comprensión del índice, puesto que da a conocer sus fortalezas y debilidades. Este análisis determina

la incertidumbre y permite identificar las variaciones de los datos de entrada y los errores en las salidas. Finalmente, para la interpretación del índice se puede definir su rendimiento en una forma escalada o relacionar su valor final con el nivel de prioridad de acción necesario en la cuenca (Juwana *et al.*, 2012).

Las metodologías de evaluación de la sustentabilidad en una cuenca diagnostican agentes físicos, biológicos y químicos (cantidad y calidad), también evalúan el manejo de residuos y emisiones, y el uso de los recursos. Adicionalmente, identifican los cambios en las funciones del medioambiente que han generado las actividades humanas; y por último, relacionan las acciones ejecutadas de prevención, compensación y adaptación a los impactos (Pires *et al.*, 2017).

En resumen, cualquier método de evaluación de sustentabilidad no solo debe proporcionar resultados fáciles de interpretar, sino también mostrar el vínculo entre la sustentabilidad y las actividades humanas. Asimismo debe ser eficiente en tiempo y disponibilidad de información, también debe establecer la necesidad de reducir acciones negativas y de aumentar la eficiencia de procesos existentes en la cuenca. Finalmente, debe hacer hincapié en la importancia de acciones de gestión para lograr un desarrollo sustentable (Graymore *et al.*, 2008; Pires *et al.*, 2017).

4.6. *Revisión de literatura para identificación de indicadores a nivel cuenca.*

En esta sección se pretende ejemplificar la obtención de un conjunto de indicadores para el análisis de sustentabilidad. Que como menciona Juwana *et al.* (2012) una primera aproximación de un conjunto de estos para el desarrollo de un índice, se obtiene mediante una revisión de literatura bajo el marco de análisis de sustentabilidad, haciendo referencia a diagnósticos anteriores y a conjuntos de índices y componentes existentes.

En la revisión de literatura dirigida al uso de indicadores de sustentabilidad para la evaluación del manejo sustentable a nivel cuenca se utilizaron motores de búsqueda como: Scopus, Scielo y Google Académico. Se incluyeron palabras claves principales (a) y secundarias (b), así como criterios para la selección de textos académicos que cumplan con el objetivo de la revisión. El proceso de selección de documentos de interés se muestra en la figura 5.

Primero, con operadores *booleanos* (*y/and, or*) se combinaron las palabras clave en los diferentes motores de búsqueda para un periodo del 2001 a 2021, posteriormente la selección de documentos de interés se definió clasificando los resultados en grupos como: manejo sustentable, evaluación de sustentabilidad e indicadores de sustentabilidad de cuencas. Para la clasificación se analizó el título, las palabras clave, el resumen, y la conclusión de cada documento para identificar los que corresponden al objetivo de la revisión. De los documentos obtenidos se seleccionaron 21 investigaciones, 15 *review*, cuatro secciones de libros y dos tesis de posgrado; solo seis publicaciones son anteriores al 2006 y la mayoría de ellas son de los años 2012, 2017 y 2020.

Segundo, de los 42 documentos seleccionados se filtraron 16 investigaciones que tuvieron como objetivo el uso de indicadores de sustentabilidad para la evaluación del manejo sustentable a nivel cuenca, de las cuales 12 fueron publicadas después del 2014.

Por último, las 16 investigaciones seleccionadas se clasificaron en dos campos de estudio a nivel cuenca: uso de suelo y calidad del agua nexa uso del suelo. El primer grupo de clasificación tiene como propósito estudiar los efectos de la variación del uso de suelo y las políticas de este en la cuenca, similarmente analizan la influencia del uso y cobertura del suelo en el desarrollo de una cuenca, y finalmente evalúan la efectividad de la rehabilitación y conservación del suelo. En el segundo grupo, el objetivo de las investigaciones fue relacionar la calidad del agua con la cobertura, uso y estatus del suelo para determinar la sustentabilidad de una cuenca, en este grupo los autores agregaron una evaluación de la necesidad de gestión del uso de suelo, agua y conservación del medioambiente.

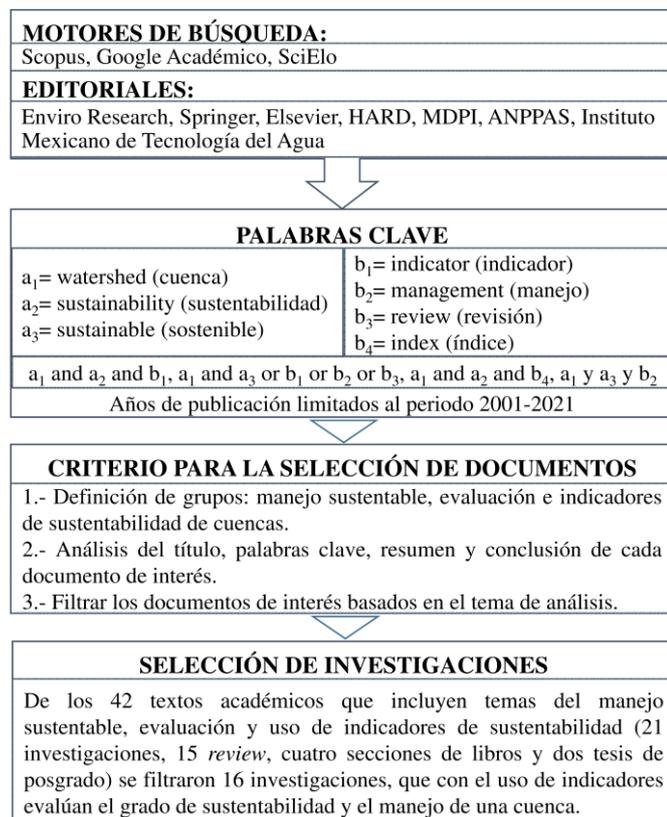


Figura. 5. Proceso de selección de textos académicos, elaboración propia.

Las investigaciones seleccionadas provienen de revistas internacionales, instituciones nacionales y de algunas publicaciones académicas. Las cuales se efectuaron en cuencas ubicadas en Asia (4), África (1), Norte América (7), Sur América (3) y Europa (1). En particular, su análisis permitió identificar un conjunto de parámetros e índices utilizados para la evaluación de la sustentabilidad y el manejo de una cuenca, este conjunto se clasificó en indicadores ambientales y socioeconómicos.

Se identificaron dos tendencias de análisis a nivel cuenca, la primera es una evaluación mediante un índice de sustentabilidad generado por la agregación de indicadores y subíndices, con lo cual varios autores describieron el estado de los principales recursos de la cuenca. También evaluaron la condición del hábitat, el impacto generado por procesos productivos, y compararon políticas del manejo de los recursos en función de su sustentabilidad durante un periodo determinado.

La segunda tendencia identificada fue la realización de análisis a partir del acoplamiento de modelos naturales y humanos definidos por indicadores ambientales y socioeconómicos. En su mayoría los análisis basados en indicadores no agregados se fundamentan en el uso de un modelo espacial, que permite correlacionar la degradación y calidad del suelo, así como la situación del hábitat y las características fisicoquímicas del suelo y agua en diferentes partes de la cuenca. Al mismo tiempo, interpretan el desempeño e impactos relacionados a la sustentabilidad, con la finalidad de proporcionar información útil para planes de gestión y conservación de recursos.

La revisión anterior permitió agrupar indicadores ambientales (tabla 1) y socioeconómicos (tabla 2). Los primeros describen el uso de los recursos y su estado actual en la cuenca, principalmente referidos a las propiedades físicas y químicas del suelo y el agua. Así mismo, identifican los impactos generados por las actividades y procesos antropogénicos en partes claves del ecosistema. Los indicadores socioeconómicos describen tasas de crecimiento, producción y desarrollo; además de los impactos generados por el manejo actual de la cuenca.

Tabla 1: Indicadores/índices ambientales a nivel de cuenca.

Categoría	Indicador/Índice
Cantidad de agua	Agua / persona / año ^{1, 2, 4, 5, 9, 14, 15, 16} Recarga de manto freático ²
Propiedades fisicoquímicas del agua	BOD ₅ ^{1, 4, 5, 10, 14, 15, 16} (TN, Demanda química de oxígeno) ¹⁰ (DO, pH, TOC, NH ₃ -N, <i>ICI</i>) ^{9, 15} TSS530 ^{8, 9, 15} , TP ^{8, 10, 15} Elementos tóxicos potenciales ⁷ (SDT, Coliformes totales y fecales) ¹⁵
Propiedades fisicoquímicas del suelo	(Textura, BD, EC, RFC, VI) ¹⁵ Geomorfometría de la cuenca ¹² (MO, TN, K, P, pH, SOC, SAR) ¹⁵ Elementos tóxicos potenciales ⁷
Hábitat	(Índice de integridad biótica, <i>QHEI</i>) ^{9, 15}
Especie clave	Riqueza de peces ¹³ , <i>ICI</i> ^{9, 15}

Referencia: 1.- (Chandniha, Kansal, & Anvesh, 2014), 2.- (Gashaw, Tulu, & Argaw, 2017), 4.- (Mititelu-Ionuș, 2017), 5.- (Preciado, 2013), 8.- (Wilson, 2015), 9.- (Wang, 2001), 12.- (Puno & Puno, 2019), 13.- (Granco et al., 2019), 14.- (Belalcázar & Ortega, 2019), 15.- (Partida, 2018), 16.- (Maynard, Cruz, & Gomes, 2017).

Abreviaturas: Velocidad de infiltración (VI), Bulk density (BD), Electric Conductivity (EC), Relative filed capacity (RFC), Materia orgánica (MO), Nitrógeno total (TN), Fósforo (K), Potasio (P), Soil organic carbon (SOC), Sodium adsorption ratio (SAR), Biological oxygen demand (BOD₅), Dissolved oxygen (DO), Total organic carbon (TOC), Nitrogen-total ammonia (NH₃-N), Total suspended solids (TSS530), Total phosphorus (TP), Sólidos disueltos totales (SDT), *Invertebrate Community Index (ICI)*, *Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI)*.

El índice aplicado con mayor frecuencia fue el índice de sustentabilidad de cuencas (WSI) (Belalcázar & Ortega, 2019; Chandniha et al., 2014; Maynard et al., 2017; Mititelu-Ionuș, 2017; Preciado, 2013) que considera la relación de indicadores e índices enfocados al manejo del recurso agua, incluyendo la

cantidad de agua disponible por persona anual, BOD₅, EDI y HDI. Similar al anterior es el índice agregado de sustentabilidad de la microcuenca (IASuM) (Partida, 2018), este adiciona al análisis características fisicoquímicas del agua (DO, pH, TOC, NH₃-N, ICI) y el suelo (MO, TN, K, P, pH, SOC, SAR); además de un factor del manejo de los recursos.

WSI y IASuM relacionan los factores de hidrología, medioambiente, vida y política, con el fin de establecer una dimensión integral bajo el modelo PER. Estos índices muestran las presiones existentes sobre la cuenca y el progreso del sistema hacia la sustentabilidad (Preciado, 2013). Debido a su uso práctico solo miden la respuesta a presiones generadas, en consecuencia, no miden completamente todas las respuestas en la región de estudio.

Por otro lado, el índice general de sustentabilidad (OSI por sus siglas en inglés) utilizado por Shrestha & Dwivedi (2017) ofrece un análisis bajo un marco espacial de cambio de uso de suelo (LU/LC por sus siglas en inglés). Este es un enfoque que considera la dinámica histórica del cambio y uso de suelo en la cuenca, en el cual los autores integran las tasas de cambio bajo diferentes escenarios, logrando así una interpretación espacialmente explícita de las categorías de sustentabilidad analizadas bajo dos escenarios de demanda.

Tabla 2: Indicadores/índices socio-económicos a nivel de cuenca.

Categoría	Indicador/Índice
Educación	EDI ^{1, 4, 5, 14, 15, 16} , Valor-Creencia-Norma ¹³
Vida	Índice de Marginación ¹⁵ , HDI ^{1, 4, 5, 14, 15, 16}
Producción	(IPA, CPPI, IFA) ² , CR ¹⁶
Conservación de recursos	Prácticas de conservación del suelo ² MPF ¹⁵ , (RSL, SWC) ² , CEI ⁷ , LCF ^{3, 12} USLE ¹¹
Cobertura	% de vegetación ^{5, 14} , días con cobertura ³ EPI ^{1, 4, 5, 14, 15, 16} LU/LC ^{1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 12} SLUP ¹¹ , ABM ¹³
Manejo de cuenca	(Impactos por operación, manejo de residuos) ⁷ (BMPs, IWRM) ¹

Referencia: 1.-(Chandniha et al., 2014), 2.-(Gashaw et al., 2017), 3.-(Liu, Huffman, Green, Joosse, & Martin, 2020), 4.-(Mittitelu-Ionuș, 2017), 5.-(Preciado, 2013), 6.-(Shrestha & Dwivedi, 2017), 7.-(Souza et al., 2020), 8.-(Wilson, 2015), 9.-(Wang, 2001), 10.-(Hong, Hailin, & Zhen, 2011), 11.-(Karas, 2020), 12.-(Puno & Puno, 2019), 13.-(Granco et al., 2019), 14.- (Belalcázar & Ortega, 2019), 15.-(Partida, 2018), 16.- (Maynard et al., 2017).

Abreviaturas: *Education development index* (EDI), *Human Development Index* (HDI), % Increased Production Area (IPA), % Crop production and productivity Increment (CPPI), % Improvement of fodder availability (IFA), Cumulative rating approach (CR) based on crop production limitations, Integrated water resources management (IWRM), Management practice factor (MPF), % Reduction in soil loss (RSL), Soil and water conservation (SWC), Compensation of environmental impacts (CEI), Land cover factor- Universal soil loss equation (LCF), Universal soil loss equation (USLE), Land cover/Land use (LC/LU), Sustainable land use planning (SLUP), *Environment pressure index* (EPI), Agent-based model (ABM). Best management practices (BMPs), Integrated water resources (IWRM).

En último término, el conjunto de indicadores e índices que permiten analizar la condición de sustentabilidad y tendencias sin ser agregados fueron abordados con modelos LU/LC, hidrológicos, (Gashaw et al., 2017; Hong et al., 2011; Karas,

2020; Liu et al., 2020; Puno & Puno, 2019; Souza et al., 2020; Wang, 2001; Wilson, 2015) y de planificación sustentable del uso del suelo (SLUP por sus siglas en inglés) (Karas, 2020).

En los modelos LU/LC y SLUP la probabilidad de que el uso o cobertura del suelo en un periodo de tiempo cambie de un tipo a otro depende de factores sociales, económicos y ambientales. Estos modelos admiten realizar comparaciones en diferentes tiempos, para los cuales se estiman empíricamente las probabilidades condicionales de transición y después son usadas para simular las condiciones potenciales futuras (Naiman, 2012; Wilson, 2015).

De los modelos anteriores, Granco et al. (2019) propone un análisis en el cual acopla un sistema natural y humano (ABM por sus siglas en inglés) mediante un submodelo hidrológico y ecológico para vincular explícitamente las ciencias biofísicas y sociales con los problemas de sustentabilidad. Este autor incluye como indicador a los valores, creencias y normas para simular las decisiones de los agentes humanos en el apoyo de una política diseñada para conservar y proteger la biodiversidad de la cuenca.

La aplicación de este tipo de modelos permite realizar un diagnóstico espacial, lo cual es notable por su eficacia para planear y crear un sistema que propicie el desarrollo y la planificación de un manejo sustentable de la cuenca, considerando la gestión del suelo y agua. Además de incluir su relación con los demás recursos existentes y los procedimientos de aprovechamiento y manejo.

5. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar una revisión referente al uso de indicadores de sustentabilidad a nivel cuenca para la evaluación del manejo sustentable. Lo anterior permitió identificar que las evaluaciones a nivel cuenca son esenciales, dado que a esta escala se pueden lograr impactos mayores hacia la sustentabilidad. De esta manera, los grupos involucrados pueden dirigir su participación a la acción común; generando así confianza y colaboración mediante el diálogo entre las partes interesadas (habitantes, usuarios, agencias, participantes gubernamentales e instituciones) para la toma de decisiones y la implementación de un plan de manejo sustentable.

La anterior revisión efectuada permitió identificar varios elementos clave en las primeras etapas de reconocimiento de la sustentabilidad de una cuenca, ya que en estas, nos enfrentamos a la identificación y selección de indicadores adecuados que permitan evaluar el plan de manejo. Así mismo, posibilita ejemplificar un conjunto de indicadores ambientales y socioeconómicos utilizados en varias investigaciones a nivel cuenca.

Un elemento clave para la evaluación de la sustentabilidad de una cuenca, es que los indicadores permitan definir las relaciones ambientales y socioeconómicas. Por tal motivo, su selección mediante procesos participativos puede ajustarse potencialmente, ya que propician la participación y el compromiso comunitario; a pesar de ser un proceso laborioso y que requiere tiempo para lograr acuerdos.

Con el conjunto de indicadores sobresalientes obtenido de las 16 investigaciones seleccionadas, se pudo percibir la limitación que representa el no contar con información actualizada y confiable, que por consiguiente acrecienta la

necesidad de redes de monitoreo en la cuenca. Puesto que solo contar con una red de monitoreo, facilitaría la obtención de datos relevantes para describir de manera completa las interacciones y conexiones en el uso de los recursos en las diferentes partes de la cuenca. En definitiva, para una gestión adecuada de la cuenca sobresale la necesidad de inversión en el monitoreo que permita visualizar el desplazamiento del plan establecido.

Agradecimientos

MGHP agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por la beca de doctorado en Ciencias Ambientales, no. 802102.

Referencias

- Barragan A., M. C., Daza L., N. M., Calderón L., Y., Navarro C., L. F., & Tosse L., O. (2018). Guía metodológica para la formulación de los planes de manejo ambiental de microcuencas – PMAM. Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental., 48.
- Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R., & Rodríguez, M. (2016). Water quality monitoring strategies—A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312-1329.
- Belalcázar B., P. A., & Ortega B., M. (2019). *Evaluación de la sostenibilidad de la subcuenca hidrográfica La Fragua ubicada en el departamento de Nariño, mediante cuatro indicadores: Hidrología, Medio Ambiente, Vida y Política*. (Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente), Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Blanchet, K., & Girois, S. (2013). Selection of sustainability indicators for health services in challenging environments: balancing scientific approach with political engagement. *Eval Program Plann*, 38, 28-32. doi: 10.1016/j.evalprogplan.2012.11.003.
- Chandniha, S. K., Kansal, M. L., & Anvesh, G. (2014). Watershed sustainability index assessment of a watershed in Chhattisgarh, India. *Current World Environment*, 9(2), 403.
- Chang, C. C., DiGiovanni, K., Mei, Y., & Wei, L. (2016). Sustainability. *Water Environment Research*, 88(10), 1299-1333. doi: 10.2175/106143016X14696400494975.
- Cornescu, V., & Adam, R. (2014). Considerations Regarding the Role of Indicators Used in the Analysis and Assessment of Sustainable Development in the E.U. *Procedia Economics and Finance*, 8, 10-16. doi: 10.1016/s2212-5671(14)00056-2.
- Cotler A., H., Galindo A., A., González M., I. D., Pineda L., R. F., & Ríos P., E. (2013) Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. *SEMARNAT* (Primera ed., pp. 36). México D.F.: SEMARNAT.
- Dahl, A. L. (2012). Achievements and gaps in indicators for sustainability. *Ecological Indicators*, 17, 14-19. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.04.032.
- Fraser, E. D., Dougill, A. J., Mabee, W. E., Reed, M., & McAlpine, P. (2006). Bottom up and top down: analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. *J Environ Manage*, 78(2), 114-127. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.04.009.
- Gashaw, T., Tulu, T., & Argaw, M. (2017). Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 6(1), 14. doi: 10.1186/s40068-016-0078-x.
- Gashaw., T. (2015). Review. The implications of watershed management for reversing land degradation in Ethiopia. *Agriculture and Environmental Management*, 4(1), 5-12.
- Ghaemi, M., Astaraci, A. R., Emami, H., Nassiri Mahalati, M., & Sanaeinejad, S. H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad-Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 1005-1020.
- Granco, G., Heier Stamm, J. L., Bergtold, J. S., Daniels, M. D., Sanderson, M. R., Sheshukov, A. Y., . . . Aistrup, J. A. (2019). Evaluating environmental change and behavioral decision-making for sustainability policy using an agent-based model: A case study for the Smoky Hill River Watershed, Kansas. *Science of the Total Environment*, 695. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133769.
- Graymore, M. L. M., Sipe, N. G., & Rickson, R. E. (2008). Regional sustainability: How useful are current tools of sustainability assessment at the regional scale? *Ecological Economics*, 67(3), 362-372. doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.002.
- Hak, T., Kovanda, J., & Weinzettel, J. (2012). A method to assess the relevance of sustainability indicators: Application to the indicator set of the Czech Republic's Sustainable Development Strategy. *Ecological Indicators*, 17, 46-57. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.04.034.
- Hong, Z., Hailin, L., & Zhen, C. (2011). Analysis of Land Use Dynamic Change and Its Impact on the Water Environment in Yunnan Plateau Lake Area—A Case Study of the Dianchi Lake Drainage Area. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2709-2717.
- Jiang, J., Tang, S., Han, D., Fu, G., Solomatine, D., & Zheng, Y. (2020). A comprehensive review on the design and optimization of surface water quality monitoring networks. *Environmental Modelling & Software*, 132, 104792. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104792.
- Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. J. (2012). Indicator-based water sustainability assessment - a review. *Sci Total Environ*, 438, 357-371. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.093.
- Karas, E. (2020). Evaluation of a sustainable land use planning model in the Elmalı basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4). doi: 10.1007/s10661-020-8203-8.
- Liu, J., Huffman, T., Green, M., Joosse, P., & Martin, T. (2020). Changes in land use and management by farm type and the impact on soil cover in Canada, 1991–2011. *Ecological Indicators*, 116. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106531.
- Lyytimäki, J., Antikainen, R., Hokkanen, J., Koskela, S., Kurppa, S., Känkänen, R., & Seppälä, J. (2018). Developing Key Indicators of Green Growth. *Sustainable Development*, 26(1), 51-64. doi: 10.1002/sd.1690.
- Malta, F. S., & Marques da Costa, E. (2021). Socio-Environmental Vulnerability Index: An Application to Rio de Janeiro-Brazil. *International Journal of Public Health*, 66. doi: 10.3389/ijph.2021.584308.
- Maynard, I. F. N., Cruz, M. A. S., & Gomes, L. J. (2017). Applying a sustainability index to the Japarutaba river watershed in Sergipe state. *Ambiente & Sociedade*, 20, 201-220.
- McCool, S. F., & Stankey, G. H. (2004). Indicators of sustainability: challenges and opportunities at the interface of science and policy. *Environ Manage*, 33(3), 294-305. doi: 10.1007/s00267-003-0084-4.
- Mititelu-Ionuș, O. (2017). Watershed Sustainability Index Development and Application: Case Study of the Motru River in Romania. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5).
- Moldan, B., Janoušková, S., & Hák, T. (2012). How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological Indicators*, 17, 4-13. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.04.033.
- Naiman, R. J. (2012). Watershed management: balancing sustainability and environmental change. In R. J. Naiman (Ed.), *Watershed management: balancing sustainability and environmental change*. N.Y., U.S.A.: Springer Science & Business Media.
- OECD. (2001) Sustainable development strategies What are they and how can development co-operation agencies support them? *OECD OBSERVER* (pp. 8): OECD.
- OECD. (2003). OECD environmental indicators: Development, measurement and use. *Organisation for economic co-operation and development. Environmental Performance and Information Division*, 37.
- Pande, C. B. (2020). Watershed Management and Development. *Springer, Cham*, 13-26. doi: 10.1007/978-3-030-47244-3_2.
- Partida S., S. (2018). *Valoración de la sustentabilidad del río aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz*. (Postgrado Doctorado en ciencias), COLPOS, Veracruz, México.
- Pintér, L., Hardi, P., Martinuzzi, A., & Hall, J. (2012). Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. *Ecological Indicators*, 17, 20-28. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.07.001.
- Pires, A., Morato, J., Peixoto, H., Botero, V., Zuluaga, L., & Figueroa, A. (2017). Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. *Sci Total Environ*, 578, 139-147. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.217.
- Preciado J., M. (2013). Aplicación del índice de sustentabilidad WSI en la cuenca Lerma-Chapala. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Tecnología y Ciencias del agua*, IV, 21.
- Puno, G. R., & Puno, R. C. C. (2019). Watershed conservation prioritization using geomorphometric and land use-land cover parameters. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(3), 279-294.
- Shrestha, S., & Dwivedi, P. (2017). Projecting land use changes by integrating site suitability analysis with historic land use change dynamics in the

- context of increasing demand for wood pellets in the southern United States. *Forests*, 8(10). doi: 10.3390/f8100381.
- Souza F., P. W. M., Cavalcante, R. B. L., Nascimento Jr, W. R., Nunes, S., Gastauer, M., Santos, D. C., . . . Siqueira, J. O. (2020). The sustainability index of the physical mining Environment in protected areas, Eastern Amazon. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, 100074.
- Srivastava, R. K., Sharma, H. C., & Raina, A. K. (2010). Suitability of soil and water conservation measures for watershed management using geographical information system. *Soil and water conservation*, 9(3), 148-153.
- Wang G., Mang, S., Cai, H., Liu, S., Zhang, Z., Wang, L., & Innes, J. L. (2016). Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. *Journal of Forestry Research*, 27(5), 967-994.
- Wang, X. (2001). Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. *Journal of Environmental Management*, 61(1), 25-36.
- Wilson, C. O. (2015). Land use/land cover water quality nexus: quantifying anthropogenic influences on surface water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(7). doi: 10.1007/s10661-015-4666-4.