



## Review [Revisión]

**MARCOS METODOLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD AGRÍCOLA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS: UNA REVISIÓN †**

**[METHODODOLOGICAL FRAMEWORKS FOR THE EVALUATION OF AGRICULTURAL SUSTAINABILITY AT WATERSHED LEVEL: A REVIEW]**

**Víctor Daniel Cuervo-Osorio<sup>1</sup>, Octavio Ruiz-Rosado<sup>1\*</sup>, Luis Manuel Vargas-Villamil<sup>2</sup>, Eliseo García-Pérez<sup>1</sup>, Felipe Gallardo-López<sup>1</sup> and Pablo Díaz-Rivera<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, Km. 88.5 Carr. Xalapa-Veracruz, Veracruz, México. Email: octavior@colpos.mx*

<sup>2</sup>*Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n. Carretera Cárdenas-Huimanguillo. C.P. 86500. Cárdenas, Tabasco.*

*\*Corresponding author*

### SUMMARY

**Background.** The selection of indicators and their use for the evaluation of agricultural sustainability at the watershed level is addressed. **Objective.** To discuss the importance of their use and the options of existing methodological frameworks for this purpose. **Main findings.** The concept of indicator and its characteristics are defined; subsequently, the main methodological frameworks used in the selection of indicators are described, with emphasis on the assessment of agricultural sustainability in watersheds. **Conclusions.** In the evaluation of agricultural sustainability at the watershed level, it is highlighted the selection of indicators based on a methodological framework that integrates the three dimensions of sustainability (social, ecological and economic). It was considered the management and interactions of the agroecosystems with other external systems and internal subsystems within the watershed. It is emphasized the importance of selecting indicators in a participatory manner, with producers and the application of multivariate analysis that may contribute to the generation of sustainability indices.

**Keywords:** agroecosystems; multivariate analysis; sustainability indicators.

### RESUMEN

**Antecedentes.** Se aborda la selección de indicadores y su empleo en la evaluación de la sustentabilidad agrícola en cuencas hidrográficas. **Objetivo.** Discutir la importancia de su utilización y las diversas opciones de marcos metodológicos existentes para este fin. **Hallazgos principales.** Se define el concepto de indicador y sus características; posteriormente se describen los principales marcos metodológicos utilizados en la selección de indicadores, con énfasis en los propuestos para evaluar la sustentabilidad agrícola en cuencas. **Conclusiones.** En la evaluación de la sustentabilidad agrícola a nivel de cuenca se destaca el seleccionar indicadores basándose en un marco metodológico que integre las tres dimensiones de la sustentabilidad (social, ecológica y económica). Para ello, se toma en cuenta las interacciones de los agroecosistemas y su manejo con relación a otros sistemas externos e internos a la cuenca. Se enfatiza sobre la importancia de seleccionar indicadores de forma participativa con productores y la aplicación de estadística multivariada que contribuya a la generación de índices.

**Palabras clave:** agroecosistemas; análisis multivariado; indicadores de sustentabilidad.

### INTRODUCCIÓN

Una cuenca hidrográfica (CH) es el territorio delimitado por la línea divisoria de las partes altas del territorio (parteaguas), la cual está definida por el relieve, donde el sistema hídrico conduce sus aguas a un afluente principal, que puede ser un río, lago y/o mar (Rodríguez, 2006; Visión Mundial, 2004). Dentro del área de una CH se encuentran recursos naturales,

ecosistemas, agroecosistemas y asentamientos humanos; estos sistemas biofísicos y socioeconómicos se encuentran integrados, son interdependientes y a su vez se interrelacionan con otras cuencas. Indiscutiblemente tienen relación con lo denominado cuenca hidrológica, concepto que integra a la estructura hidrogeológica subterránea. De aquí que la sustentabilidad agrícola en sentido amplio, integra a la agricultura *per se*, la ganadería, la silvicultura y hasta

† Submitted December 11, 2019 – Accepted February 26, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.  
ISSN: 1870-0462.

cierto punto a la producción acuícola, por lo que ha de considerar ambos conceptos.

La dinámica social e histórica determina los diversos usos que se le dan a los recursos naturales de una CH, así como la forma en que se organiza la población para su aprovechamiento y su impacto (Rodríguez, 2006). En consecuencia, los agroecosistemas presentes en una CH comparten recursos naturales, condiciones climáticas y contextos socioeconómicos similares, pero son manejados por productores con diferentes intereses y objetivos de producción (Ruiz-Rosado, 2001), esto de acuerdo al nivel funcional en que se encuentren, ya sea la parte alta, media o baja, y se encuentran interconectados por el recurso agua a lo largo de la cuenca. Por tal motivo, en ocasiones el manejo de los recursos naturales realizado para las actividades agrícolas no ha sido el adecuado; un ejemplo claro es la “revolución verde”, modelo de producción que ayudó al incremento de la producción, pero que trajo consigo consecuencias que dañan los recursos naturales (Huerta y Martínez-Centeno, 2018). Para revertir la tendencia del deterioro ecológico con repercusiones económicas y sociales, una transición hacia una agricultura sustentable no solo es necesaria, sino urgente. La agricultura sustentable es el proceso mediante el cual se obtienen cosechas redituables económicamente y que contribuyen a satisfacer las necesidades del productor, a través un conjunto de prácticas aceptables socialmente y en armonía con el ambiente (Sarandón y Flores, 2009; Candelaria-Martínez *et al.*, 2014).

En este sentido, la CH se considera una alternativa idónea como unidad para diseñar e instrumentar políticas orientadas al desarrollo rural, al manejo integrado participativo y sustentable de los recursos naturales (López, 2014). Esto se debe a sus características como territorio delimitado de forma natural, donde la sociedad tiene una identidad cultural y socioeconómica originada por la forma de acceso y aprovechamiento de los recursos naturales con la finalidad de satisfacer sus demandas (Aguirre, 2011; Caire, 2004; FAO, 2007), donde además, dependiendo de su ubicación en la cuenca (alta, media o baja), los productores enfrentan riesgos comunes por factores climáticos, de erosión, entre otros (Mengistu y Assefa, 2019). En este sentido, los programas, proyectos o esquemas de manejo de los recursos naturales de la CH utilizados en la agricultura deben sustentarse en datos y conocimientos que permitan observar tendencias, prever efectos y externalidades e inferir escenarios (Cotler *et al.*, 2010).

Una herramienta viable para la toma de decisiones sobre la sustentabilidad agrícola son los indicadores, ya que por medio de ellos se puede producir e interpretar información sobre diversos tópicos

(económicos, sociales y ecológicos), observar tendencias y valorar el cumplimiento de objetivos y metas (Singh *et al.*, 2009). El empleo de indicadores para la evaluación de la sustentabilidad agrícola en una CH permitirá contar con una base de información confiable y comprensible sobre los impactos a corto, mediano y largo plazo del manejo en la agricultura, que servirá en la toma de decisiones sobre los puntos identificados como críticos e inducir cambios que tiendan hacia la agricultura sustentable en beneficio de los productores y consumidores. Con base en lo anterior, surgen las interrogantes, ¿Qué es un indicador? ¿cómo se deben seleccionar los indicadores? ¿qué marcos metodológicos existen? y ¿cuál es el marco más adecuado para evaluar la sustentabilidad agrícola en una CH?

### Definición de indicador

De acuerdo con Gallopin (2006), un indicador es una variable o representación operativa de un atributo (calidad, característica o propiedad); se diferencia de un valor, ya que tiene un significado que va más allá de lo que se obtiene directamente de las observaciones; es decir, en función del valor que asume en determinado momento, despliega significados que los usuarios interpretaran más allá de lo que muestran directamente (Quiroga, 2001). Díaz-Ambrona (2013) menciona que un indicador es una medida del estado de un sistema que puede ser empleado en la evaluación del efecto que tienen nuestras acciones sobre un determinado recurso y permite ajustarlas para alcanzar un determinado objetivo. Los indicadores esquematizan los datos disponibles e informan a los usuarios sobre el estado actual o evolución que ha experimentado el sistema bajo determinadas prácticas de manejo. De acuerdo a Böhringer y Jochem (2007), Ruiz-Rosado (2001), y Sarandón y Flores (2009), un indicador debe cumplir con las siguientes características: a) ser adecuado al objetivo, b) brindar la posibilidad de determinar valores umbrales, c) tener características universales pero adaptado a cada condición en particular, d) tener escala cualitativa y/o cuantitativa, e) ser factible dependiendo de la disponibilidad de datos y costos, f) no tener sesgos (ser independiente del observador o recolector), g) permitir una percepción holística, h) ser relevante para el tomador de decisiones, i) estar expresado en unidades equivalentes por medio de transformaciones apropiadas, j) ser robusto (brindar y sintetizar información pertinente), y k) tener habilidad predictiva y sensibilidad a los cambios en el tiempo. El principal aspecto de los indicadores es su relevancia para la toma de decisiones (políticas, empresarias, personales), por lo que los atributos representados por los indicadores deben ser considerados importantes por los tomadores de decisión y/o por el usuario (Gallopin, 2006).

## Selección de indicadores

Una forma general de seleccionar indicadores se basa en propuestas que conciben de un modo lineal el análisis del fenómeno en estudio, sin un sustento conceptual sólido; simplemente utilizan listas *ad hoc* y en muchos casos un solo indicador para tratar de describir múltiples factores que interactúan en tiempo y espacio. Ejemplos de estos indicadores son los utilizados para evaluar la calidad del agua, la protección del recurso y su escasez (Chavez-Jimenez *et al.*, 2013), el balance hídrico (Sharma y Thakur, 2007), así como hidrológicos y geomórficos relacionados con la impermeabilidad de una cuenca (Wong *et al.*, 2008), la erosión del suelo en una cuenca (Okoba y Sterk, 2006) y aspectos biofísicos naturales de una cuenca (Romero *et al.*, 2013).

Si bien, los indicadores utilizados de forma individual sirven en el análisis de sus respectivas variables, un proceso dinámico no puede ser evaluado de esta forma, ya que el análisis no será coherente con respecto a lo que se plantea evaluar, dando resultados que aportan pocos elementos para la toma de decisiones (Galván-Miyoshi *et al.*, 2008). Sin embargo, para la solución de problemas puntuales es necesario identificar y evaluar indicadores específicos. Una alternativa para la selección de indicadores se lleva a cabo mediante marcos metodológicos que buscan operacionalizar el concepto de sustentabilidad agrícola, y que guían el proceso a través de etapas definidas. En la fase inicial se define el concepto y/o teoría, al buscar que exista una estrecha relación entre lo que se quiere evaluar y los indicadores seleccionados (Tonolli, 2018). En las fases finales, generalmente el conjunto de indicadores se agrega en un índice que sintetiza la información en un solo dato.

El número de indicadores a elegir es un aspecto importante que considerar durante el proceso de selección, en muchas ocasiones éste tiende a incrementar, lo que dificulta la recopilación de datos y su posterior interpretación. Un número adecuado de indicadores debería estar entre 10 y 25, lo que depende de la escala de análisis; se toma en cuenta que en ocasiones un mismo indicador se relaciona con diversas variables y que la motivación para su uso es un análisis simplificado, pero con una visión holística (Gallopín, 2006).

## Marcos metodológicos en la selección de indicadores

Existen diversas propuestas de marcos metodológicos para la selección de indicadores e índices de sustentabilidad agrícola, los que se han utilizado con distintos enfoques y niveles jerárquicos. Generalmente los marcos metodológicos presentan una estructura

descendente, es decir, van de lo general (un concepto) a lo particular (indicadores). El concepto se define en cada marco metodológico, al proponer diferentes aspectos básicos a considerar; mientras que los indicadores son específicos, acordes al caso y se seleccionan en función del contexto en particular, así como del concepto propuesto (Galván-Miyoshi *et al.*, 2008).

Como ya se mencionó, el empleo de un marco conceptual determinado supone el posicionamiento de una visión acerca de los componentes y las interacciones que se dan entre los recursos naturales y la sociedad, cuanto más entendible y detallado sea el marco metodológico, mejor será definido el indicador, ya que se clarifican los vínculos entre las diversas variables que lo componen (Soto y Schuschny, 2009). La adopción de algún marco metodológico dependerá de los objetivos de cada evaluación, la disponibilidad de información y los conceptos asumidos. También, pueden ser utilizados con adaptaciones y/o modificaciones para cada situación en específico o como base para generar nuevas propuestas metodológicas. A continuación, se describen algunos de los marcos metodológicos que se presentan en la literatura.

Uno de los primeros marcos desarrollados fue propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1993) denominado Presión-Estado-Respuesta (PER), el cual permite la derivación de indicadores de las presiones humanas sobre el ambiente, el estado de los ecosistemas y las respuestas individuales e institucionales a los retos ambientales que se presentan; es uno de los marcos más utilizados y ha sido base para generar nuevas metodologías.

Otro marco fue propuesto desde el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); lo desarrolló De Camino y Müller (1993), quienes proponen una metodología sistémica para la derivación de indicadores a partir de una revisión bibliográfica sobre el concepto de sustentabilidad y sus diferentes acepciones; sugieren cuatro categorías de análisis: la base de recursos del sistema; la operación del sistema; otros recursos exógenos al sistema de entrada o salida y la operación de otros sistemas exógenos de entrada o salida. Sin embargo, no presentan ninguna estrategia para el análisis y la integración de los resultados.

Por otro lado, Smyth y Dumanski (1994), elaboraron el marco de evaluación del manejo sustentable de tierras (FESLM, siglas en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, siglas en inglés). Este marco busca un análisis integral del sistema de manejo, pero tiene

un sesgo ambiental e incorpora débilmente los aspectos económicos y sociales que determinan su comportamiento.

Mientras que para estimar el nivel de desarrollo sostenible en territorios rurales, se desarrolló la metodología denominada Biograma (Sepúlveda, 2008), la cual evalúa el desarrollo del territorio en periodos largos de tiempo y cuenta con un programa de cómputo para manejar la información y graficar.

Diversos autores han evaluado la sustentabilidad agrícola mediante indicadores a través de múltiples propuestas metodológicas; dejan en claro que las diferencias en la escala de análisis (predio, finca, región, cuenca, estado, país), tipo de establecimiento, objetivos deseados, actividad productiva y características de los agricultores, hacen imposible la generalización de indicadores (Candelaria-Martínez *et al.*, 2014). Dentro de los marcos metodológicos que tienen como objetivo la valoración de la sustentabilidad agrícola se pueden mencionar a los siguientes: El marco para evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS) desarrollado por Masera, Astier y López-Ridaura (1999), el cual caracteriza los sistemas de producción y los evalúa de acuerdo con indicadores de siete atributos dentro de cuatro dimensiones. El modelo del agroecosistema sostenible (SAM siglas en inglés) propuesto por Belcher, Boehm y Fulton (2004), divide el agroecosistema en dos submodelos (económico y ambiental), selecciona indicadores y crea escenarios en base a modelaje temporal y espacial. En tanto que Van Cauwenbergh *et al.* (2007), plantean el marco de evaluación de la sostenibilidad de la agricultura y el medio ambiente (SAFE, siglas en inglés), metodología holística y de estructura jerárquica que se compone de principios, criterios, indicadores y valores de referencia; los principios están relacionados con las múltiples funciones del agroecosistema. Sarandón y Flores (2009) sugieren una metodología para diferentes situaciones o problemáticas, que se basa en un enfoque agroecológico y holístico; consiste en una serie de pasos que conducen a la obtención de un conjunto de indicadores que determinan los puntos críticos de la sustentabilidad de los agroecosistemas. Por último, el marco metodológico para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de alimentación y agricultura (SAFA, siglas en inglés) desarrollado por la FAO (2014), presenta pautas para evaluar el impacto de las operaciones alimentarias y agrícolas en el medio ambiente y las personas; este marco plantea cuatro dimensiones de la sustentabilidad: buen gobierno, integridad ambiental, resiliencia económica y bienestar social; propone indicadores clave de desempeño que facilitan medir el progreso hacia la sustentabilidad y realiza una interpretación holística.

## Marcos metodológicos de indicadores de sustentabilidad agrícola en cuencas

Se encontraron en la literatura cuatro marcos metodológicos en relación con la evaluación de la sustentabilidad agrícola a nivel de cuencas; a continuación, se describen cada uno de ellos. Una de las primeras aportaciones metodológicas es el marco desarrollado por Ruiz-Rosado (2001), basado en la teoría de sistemas, el enfoque de co-evolución y la agroecología como disciplina holística. Esta metodología considera a la cuenca como un sistema, analiza la relación de su estructura y función respecto a cambios que ocurren en el paisaje agrícola, paisaje no agrícola y la infraestructura, así como el efecto de las dinámicas locales, políticas nacionales e internacionales, el empleo, la producción y los precios de productos agrícolas. Es decir, toma en cuenta las interacciones sociales, económicas y ecológicas que se llevan a cabo en el sistema cuenca y que influyen en las actividades agrícolas en ese nivel. Mediante el enfoque de co-evolución y la agroecología, analiza información cualitativa y cuantitativa, para posteriormente proponer un conjunto de indicadores dentro del contexto local, así como valores umbrales para la sustentabilidad. Tiende a agrupar la información de indicadores de las tres dimensiones en una sola escala y se puede identificar el grado de sustentabilidad, el cual se debe encontrar entre los valores umbrales; en caso contrario, el grado sería insustentable. Este marco se utilizó para el estudio de caso de la cuenca Great Stour, en Kent, Inglaterra; se utilizaron tres principales fuentes de información: el uso de suelo mediante sistemas de información geográfica (SIG), censos agrícolas y datos de calidad del agua (proporcionados por agencias gubernamentales). Además, mediante encuestas se recabó la opinión a académicos, estudiantes del Wye College y productores de la cuenca para conocer su percepción sobre la agricultura sustentable. La metodología considera la integración de las tres dimensiones de la sustentabilidad, aunque si faltase información, la integración podría darse solo en dos dimensiones, por ejemplo, la social y ecológica.

Desde otra perspectiva se encuentra el índice de pobreza del agua agrícola (AWPI, siglas en inglés), propuesto por Forouzani y Karami (2011). Es una herramienta interdisciplinaria que integra temas clave relacionados al recurso agua, en combinación con información agrícola, social, económica y ambiental, asociada a la capacidad de los agricultores para obtener acceso al agua y el uso del agua con fines productivos. Es útil para evaluar la situación del agua en la agricultura, sobre todo en lugares donde el suministro de agua puede ser limitado; su aplicación está diseñada a nivel parcela y comunidad; puede extrapolarse a nivel de cuenca desde su enfoque hídrico. Los

indicadores utilizados se dividen en cinco componentes: a) recurso o cantidad de agua disponible; b) acceso, dividido en acceso de los productores al agua o accesibilidad de la tierra al agua disponible; c) capacidad o potencial actual de manejo de agua agrícola a nivel de finca; d) uso o productividad estimada de la cantidad disponible de agua agrícola y ambiente, y e) factores ambientales que influyen en la calidad y cantidad de agua en la agricultura. Sin embargo, no se explica cómo dichos componentes se deben integrar dentro del índice y menciona que la disponibilidad de datos limita la aplicación de indicadores sofisticados, ya que la problemática del agua se focaliza a nivel local y los datos se encuentran a escalas mayores, generalmente a nivel nacional; por lo cual, los indicadores deben ser seleccionados cuidadosamente si se quiere que sean eficaces.

Por otro lado, Ramírez *et al.* (2008) evaluaron la sustentabilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado en Cartago, Costa Rica. Utilizaron la metodología MESMIS (Maser *et al.*, 1999), en una muestra de las fincas que se enfocan en producir cebolla y papa (10 % de la superficie de la cuenca), y recopilaron datos para los siguientes indicadores económicos: producción, relación beneficio/costo, disponibilidad de riego, acceso al crédito; indicadores ambientales: nivel de erosión severa, fósforo disponible, parcelas en conflicto de uso, plaguicidas aplicados; los indicadores sociales fueron la tenencia de la tierra, toxicidad de plaguicidas aplicados, índice de desarrollo social y nivel de escolaridad. Utilizan valores meta por indicador, tomados mediante fuentes de referencia y a través de talleres de discusión; no menciona si los involucrados en el taller son productores de las fincas o un grupo de expertos.

En este mismo sentido, Candelaria-Martínez *et al.* (2014) propone el Índice Agregado de Sustentabilidad Agrícola (IASA), con el cual evaluó la sustentabilidad de los agroecosistemas más representativos en una microcuenca; define claramente el concepto y establecen las dimensiones (ambiental, económica, sociedad y humana); así como indicadores y valores de sustentabilidad acordes al nivel jerárquico, que son definidos y ponderados con base en una consulta a expertos que conocen el área de estudio y con otros que cuentan con experiencia en evaluación de sustentabilidad. En la valoración de los indicadores, la sustentabilidad se encuentra entre valores umbrales, los cuales dependen del contexto local, para obtener el valor de cada una de las dimensiones suma los valores obtenidos en cada indicador; para conocer el valor final del IASA, se suman los valores de cada una de las cuatro dimensiones. La participación de los productores es esencial en esta metodología, ya que la valoración por medio de indicadores deriva en un

modelo de simulación, considerando la dinámica de sistemas, donde con la opinión de los productores se plantean modificaciones a los agroecosistemas y puede observarse la tendencia de su sustentabilidad a través del tiempo.

Las evaluaciones de sustentabilidad agrícola anteriores (Ruiz-Rosado, 2001; Forouzani y Karami, 2011; Ramírez *et al.*, 2008; Candelaria-Martínez *et al.*, 2014) tienen similitudes, se basan en marcos metodológicos bien definidos, sus conceptos y objetivos permiten articular los indicadores, tienen en claro su escala de análisis y en general tienen una visión sistémica tratando de determinar los puntos críticos de forma holística. Además, al menos en dos se toma en cuenta de forma explícita, el involucrar dentro de la evaluación a los actores principales que toman decisión (productores, académicos y sociedad). Sin embargo, uno de ellos está dirigido solo al recurso agua, dos más a los agroecosistemas presentes en la cuenca y otro, no logra integrar la dimensión económica en el análisis. Por lo que las evaluaciones resultan incompletas al no considerar las interrelaciones de los agroecosistemas entre sí y con otros sistemas externos e internos de la cuenca, y por no integrar al menos las tres dimensiones básicas de la sustentabilidad (ecológica, económica y social).

### **Consideraciones para la selección de indicadores de sustentabilidad agrícola en cuencas**

El principal obstáculo para evaluar la sustentabilidad es la ambigüedad del concepto, que puede tener diversos significados a diferente nivel jerárquico y representa múltiples interacciones entre las dimensiones ecológica, económica y social. Dichas interacciones dan como resultado una dinámica que no trata de llegar a un estado ideal predefinido, sino de un proceso continuo de cambio a través del tiempo, lo que representa a un sistema dinámico (García, 2017); por lo cual, en las evaluaciones mediante marcos metodológicos, el concepto de sustentabilidad debe definirse localmente, al prestar atención a la diversidad sociocultural y ambiental, tal y como lo sugieren Galván-Miyoshi, Maser y López-Ridaura (2008).

En cuanto a la selección de indicadores, es necesario considerar que los atributos de la sustentabilidad deben estar ligados con alguna dimensión analizada, ya que el indicador debe reflejar las variables explicativas para cada dimensión (Sepúlveda, 2008); además, se tomará en cuenta que los resultados de la evaluación de sustentabilidad sólo serán coherentes con los objetivos planteados y con los indicadores escogidos; es por ello, que la coherencia interna en la selección es esencial (Sarandón y Flores, 2009).

La sustentabilidad es difícil de comparar en tiempo y espacio, si se requiere realizar una valoración retrospectiva, se debe disponer de información de años anteriores para todos los indicadores seleccionados, lo que llevaría a realizar una selección *ad hoc*; en cambio, si la comparación es prospectiva, ésta se podría llevar a cabo a través de evaluaciones periódicas sistematizadas que formen un precedente con el cual se conocerá la evolución de la sustentabilidad en el tiempo. Por otro lado, si se pretende realizar evaluaciones comparativas entre dos cuencas, subcuencas o microcuencas, es claro que ambas podrían tener similitudes, pero también diversas características económicas, ecológicas y sociales que harán que se distingan una de otra; las diferentes interrelaciones que se dan en cada caso hacen que la selección de indicadores sea diferente y por ende la sustentabilidad; lo válido para una región o problema, puede no serlo para otra (Sarandón y Flores, 2009).

Se puede decir que pocos estudios abordan una evaluación de sustentabilidad agrícola a nivel de cuenca, la integración de las tres principales dimensiones no se ha realizado o solo se evalúa la sustentabilidad de los agroecosistemas dentro de la cuenca. De manera que, de acuerdo con el marco metodológico que se utilice, en las evaluaciones de sustentabilidad agrícola, la elección de indicadores deberá considerar las interacciones entre los diversos agroecosistemas de la cuenca y el impacto de su manejo, entendiendo que existen factores externos e internos a la cuenca que también deben ser tomados en cuenta.

La elección de los indicadores que se consideren adecuados dentro de la evaluación puede presentar ciertos inconvenientes, entre estos la falta y/o disponibilidad de información, el costo de recolección o si se requiere equipo tecnológico (cómputo, laboratorio) para la obtención de los datos y el tiempo para lograrlo. Ejemplos de algunos indicadores a nivel de cuenca que pueden ser utilizados, acorde al marco metodológico, depende de los objetivos de cada evaluación, la definición de sustentabilidad planteada, y considera las dimensiones básicas de la sustentabilidad: erosión, uso de suelo, cobertura vegetal, análisis químicos y microbiológicos para evaluar la calidad del agua, datos censales sobre calidad de vida de los productores (educación, salud, vivienda), aceptación social del modelo de producción, organización de productores, dependencia de insumos, subsidios gubernamentales y capital externo, producción por hectárea de las especies cultivadas y pecuarias, distribución y comercialización de productos agropecuarios, uso y aplicación de agroquímicos, entre otros. Algunos de ellos se pueden obtener a través del uso de la percepción remota o sistemas de información geográfica, ya que por medio

de ésta se puede hacer un análisis del territorio con información sobre las interrelaciones, que de otra forma no sería posible dadas las dimensiones territoriales de una cuenca. Los indicadores que no deberían ser considerados a nivel de cuenca serán aquellos que sean poco representativos, como materia orgánica del suelo o los que varían poco en el tiempo, como la textura del suelo (Sarandón y Flores, 2009).

Un aspecto importante que destacar es el potencial de generar indicadores en forma participativa, no solo con académicos expertos en la zona de estudio, sino también con los involucrados, ya sea productores o informantes clave; ya que ellos tienen información y conocimientos importantes de su entorno y el manejo de sus recursos, que ayudaría ampliamente en la selección de indicadores locales. Esto con la intención de que la información obtenida a través de los indicadores sirva en el diseño de los programas gubernamentales y políticas públicas de desarrollo rural sustentable, y así considere las problemáticas y necesidades reales de los productores y consumidores.

En los marcos metodológicos para la evaluación de la sustentabilidad agrícola no se hace mención a la aplicación de algún método estadístico; sin embargo, en la agregación de indicadores en índices, diversos autores (Domínguez *et al.*, 2011; Escobar, 2008; Ruíz, 2012) proponen el uso de estadística multivariada para evitar sesgo durante las etapas de estandarización y ponderación de los indicadores. En este sentido, el análisis de componentes principales ha sido una herramienta útil para la generación de índices de variables cuantitativas en diversas áreas, como en la evaluación de calidad o desempeño ambiental (Escobar, 2006; Hsu y Zomer, 2016; Pérez-Maqueo *et al.*, 2013), al igual que en índices relacionados a la educación (Estévez, 2002), parámetros genéticos (Olasege *et al.*, 2019), financiamiento carretero (Kaba y Assaf, 2019) o el desarrollo humano (García y Puerta, 2008; Yongheng, Angang y Ning, 2005), por nombrar algunos pocos. En este sentido, el tipo de información generada en las evaluaciones de sustentabilidad (cualitativa y cuantitativa), genera una estructura de datos que puede ser analizada mediante el análisis factorial múltiple (Escofier y Pagès, 1994), el cual es una extensión del análisis de componentes principales; además, se destaca su utilidad en el esquema de ponderación como un paso de preprocesamiento para el agrupamiento; asimismo, explora y describe relaciones e interrelaciones de las variables (Abdi *et al.*, 2013; Osorio, Rodríguez y Salamanca, 2017; Stanimirova, Walczak y Massart, 2005), y proporciona información importante para la evaluación.

## CONCLUSIONES

Al revisar los marcos metodológicos utilizados en la evaluación de la sustentabilidad agrícola, principalmente a nivel de cuenca hidrológica, se pueden identificar dos procesos en la forma de seleccionar indicadores, uno de forma subjetiva y otro basado en un marco metodológico *ad hoc*. El marco metodológico es el más adecuado; para realizar una evaluación congruente se debe tener en claro los objetivos de la investigación o desarrollo, y coherencia entre la teoría, el concepto y la metodología, además, debe ajustarse a los presupuestos, información y recursos para derivar los indicadores. No existe un marco único o principal para evaluar la sustentabilidad; la elección o creación de alguno de ellos dependerá de los objetivos, la disponibilidad de información y los conceptos asumidos para la evaluación. Las evaluaciones de sustentabilidad agrícola a nivel de cuenca deberán integrar las dimensiones ecológica, económica y social, y considerar las interrelaciones entre los diversos agroecosistemas presentes, su manejo, así como en relación con otros factores externos e internos en la cuenca. Se debe poder seleccionar indicadores de forma participativa con los involucrados (académicos, productores e informantes clave). Además, el uso de métodos estadísticos multivariados coadyuva a la generación de índices más robustos y a la interpretación de las diferentes interrelaciones.

### Agradecimientos

Se agradecen los comentarios de los revisores

**Financiamiento.** Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para los estudios de doctorado otorgada al primer autor.

**Conflicto de interés.** Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

**Cumplimientos de normas éticas.** La presente revisión se desarrolló bajo el código de ética del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Asimismo, no incluye ningún estudio realizado con seres humanos o experimentos con animales, respetándose la cultura local.

**Disponibilidad de datos.** Los datos están disponibles con el autor por correspondencia (octavior@colpos.mx), con previa solicitud.

## REFERENCIAS

- Abdi, H., Williams, L. J. and Valentin, D. 2013. Multiple factor analysis: Principal component analysis for multitable and multiblock data sets. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 5(2):149-179. <https://doi.org/10.1002/wics.1246>
- Aguirre, M. 2011. La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista virtual REDESMA*. 5(1):9-20. ISSN 19551078 (Disponible en línea) [http://www.sagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/cuencas\\_m\\_aguirre.pdf](http://www.sagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/cuencas_m_aguirre.pdf)
- Belcher, K. W., Boehm, M. M. and Fulton, M. E. 2004. Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural Systems*. 79(2):225-241. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00072-6)
- Böhringer, C. and Jochem, P. E. P., 2007. Measuring the immeasurable — A survey of sustainability indices. *Ecological Economics*. 63(1):1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.008>
- Caire, G. L., 2004. Implicaciones del marco institucional y de la organización gubernamental para la gestión ambiental por cuencas. El caso de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta Ecológica*. 71:55-78. ISSN: 14052849 (Disponible en línea) <https://www.redalyc.org/pdf/539/53907105.pdf>
- Candelaria-Martínez, B., Ruiz-Rosado, O., Pérez-Hernández, P., Gallardo-López, F., Vargas-Villamil, L., Martínez-Becerra, Á. y Flota-Bañuelos, C. 2014. Sustentabilidad de los agroecosistemas de la microcuenca Paso de Ovejas 1, Veracruz, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 11(73):87-104. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.CDR11-73.sdam>
- Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A. and Mediero, L. 2013. Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management*. 27(12):4237-4258. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0404-2>
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V. y Cuevas, M. 2010. Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. In: Cotler, H. (Coord.). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México. Pluralia Ediciones e Impresiones. pp 210-215

- De Camino, R. y Müller, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales. Bases para establecer indicadores. San José, Costa Rica. IICA/GTZ.
- Díaz-Ambrona, C. 2013. Indicadores de sostenibilidad de la agricultura y ganadería española. In: V Simposio Brasileño de agricultura sostenible y II Congreso Internacional de agricultura sostenible. Viçosa, Brasil. 18-20 de octubre de 2013. 114-148 pp.
- Domínguez, M., Blancas, F. J., Guerrero, F. M. y González, M. 2011. Una revisión crítica para la construcción de indicadores sintéticos. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*. 11:41-70. (Disponible en línea) <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2094>
- Escobar, L., 2006. Indicadores sintéticos de calidad ambiental: Un modelo general para grandes zonas urbanas. *Eure*. 32(96):73-98. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612006000200005>
- Escobar, L. A., 2008. Indicadores ambientales sintéticos: Una aproximación conceptual desde la estadística multivariante. *Gestión y ambiente*. 11(1):121-140. ISSN: 0124-177X (Disponible en línea) <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169414452008.pdf>
- Escofier, B. and Pagès, J. 1994. Multiple factor analysis (AFMULT package). *Computational Statistics & Data Analysis*. 18(1):121-140. [https://doi.org/10.1016/0167-9473\(94\)90135-X](https://doi.org/10.1016/0167-9473(94)90135-X)
- Estévez, J. F. 2002. La construcción de un Índice cuantitativo sobre educación superior utilizando la técnica de análisis de componentes principales. *Revista de la Educación Superior*. 31(121):138-153. (Disponible en línea) <http://publicaciones.anuies.mx/journal/121>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2007. La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. Roma, Italia. Estudio FAO, Montes 150. (Disponible en línea) <http://www.fao.org/3/a0644s/a0644s00.htm>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. SAFA: Sustainable Assessment of Food and Agriculture Systems Guidelines. Roma, Italia. FAO. (Disponible en línea) <http://www.fao.org/nr/sustainability/evaluaciones-de-la-sostenibilidad-safa/es/>
- Forouzani, M. and Karami, E. 2011. Agricultural water poverty index and sustainability. *Agronomy for Sustainable Development*. 31(2):415-431. <https://doi.org/10.1051/agro/2010026>
- Gallopin, G. 2006. Los indicadores de desarrollo sostenible. Aspectos conceptuales y metodológicos. In: Seminario de expertos sobre indicadores de sostenibilidad en la formulación y seguimiento de políticas. Lugar y fecha Santiago, Chile. FODEPAL. 1-35
- Galván-Miyoshi, Y., Masera, O. y López-Ridaura, S. 2008. Las evaluaciones de sustentabilidad. In: Astier, M.; Masera, O. y Galván-Miyoshi, Y. (Coords.). Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. SEAE / CIGA / ECOSUR / CIEco / UNAM / GIRA / Mundi-Prensa / Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. Benifaió. Valencia, España. pp. 41-58
- García, J. M. 2017. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIM PLE Cuarta edición. Zaragoza, España. 334 p.
- García, T. y Puerta, C. 2008. Comparación temporal del desarrollo mediante un índice cuantitativo. *Revista de Economía mundial*. 18:105-114. ISSN: 1576016 (Disponible en línea) <https://www.redalyc.org/pdf/866/86601809.pdf>
- Hsu, A. and Zomer, A. 2016. Environmental Performance Index. Major Reference Works. Wiley StatsRef: Statistics Reference. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03789.pub2>
- Huerta, K. K. y Martínez-Centeno, A. L. 2018. La revolución verde. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*. 4(8):1040-1052. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i8.6717>
- Kaba, E. K. and Assaf, G. J. 2019. Roads funding priority index for Sub-Saharan Africa using principal components analysis. *Case Studies*

- on Transport Policy. 7(4):732-748. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.09.002>
- López, W. 2014. Análisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 13(2):39-45. doi: 10.5154/r.rchsa.2012.06.017
- Masera, O., Astier, M. y López-Ridaaura, S. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. México. Mundi-Prensa, GIRA, Instituto de Ecología.
- Mengistu, F. and Assefa, E. 2019. Farmers' decision to adopt watershed management practices in Gibe basin, southwest Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*. 7(4):376-387. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.006>
- OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). 1993. *Environmental Indicators. OECD Core Set of indicators for environmental performance reviews. Environment Monographs No 83. OECD/GD (93)179*. Paris. Organisation for Economic Cooperation and Development.
- Okoba, B. O. and Sterk, G. 2006. Quantification of visual soil erosion indicators in Gikuuri catchment in the central highlands of Kenya. *Geoderma*. 134(1):34-47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.08.013>
- Olasege, B. S., Zhang, S., Zhao, Q., Liu, D., Sun, H., Wang, Q., Ma, P. and Pan, Y. 2019. Genetic parameter estimates for body conformation traits using composite index, principal component, and factor analysis. *Journal of dairy science*. 102(6):5219-5229. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15561>
- Osorio, M., Rodríguez, N. y Salamanca, G. 2017. Técnicas de análisis multivariado, modelamiento factorial múltiple y PLS-PATH para estudio y clasificación de tipos de mieles venezolanas de los estados de Lara y Yaracuy. *Ciencia en Desarrollo*. 8(1):129-143. ISSN 01217488 (Disponible en línea) <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v8n1/0121-7488-cide-8-01-00129.pdf>
- Pérez-Maqueo, O., Martínez, M. L., Vázquez, G. and Equihua, M. 2013. Using four capitals to assess watershed sustainability. *Environmental Management*. 51(3):679-693. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9972-9>
- Quiroga, R. 2001. Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. Santiago de Chile. CEPAL. Serie Manuales No. 16.
- Ramírez, L., Alvarado, A., Pujol, R., MacHugh, A. y Brenes, L. 2008. Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 32(2):93-118. ISSN 03779424 (Disponible en línea) <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6758>
- Rodríguez, F. 2006. Cuencas hidrográficas, descentralización y desarrollo regional participativo. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*. 7(12):113-125. ISSN: 1409-4746 (Disponible en línea) <https://www.redalyc.org/pdf/666/66612867008.pdf>
- Romero, A., Márquez, A. y Díaz, E. 2013. Determinación de indicadores físico naturales en la cuenca media del Río Unare y su relación con el cambio climático. *Revista de Ciencia y Tecnología Agrrollanía*. 10. (Disponible en línea) <http://www.postgradovipi.50webs.com/agrovol10.html>
- Ruíz, C. Y. 2012. Aplicación del análisis de componentes principales como técnica para obtener índices sintéticos de calidad ambiental. *UCV-SCIENTIA*. 4(2):145-153. (Disponible en línea) <http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/UCV-SCIENTIA/article/view/295>
- Ruiz-Rosado, O. 2001. The systems approach for sustainable development at catchment and parish group levels. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 8(1):79-84. <https://doi.org/10.1080/13504500109470065>
- Sarandón, S. y Flores, C.C., 2009. Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología*. 4:19-28. (Disponible en línea) <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/117131>

- Sepúlveda, S. 2008. Biograma: metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de territorios. San José, Costa Rica. IICA.
- Sharma, A. K. and Thakur, P. K. 2007. Quantitative assessment of sustainability of proposed watershed development plans for kharod watershed, western India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 35(3):231-241. <https://doi.org/10.1007/BF03013491>
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K. and Dikshit, A. K., 2009. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*. 9(2):189-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.05.011>
- Smyth, A. J. and Dumanski, J. 1993. FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. *World Soil Resources Report 73*. Roma, Italia. FAO.
- Soto, H. y Schuschny, A. R. 2009. Guía metodológica: diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible. Santiago de Chile. Cepal/GTZ. (Disponible en línea) <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3661-guia-metodologica-diseno-indicadores-compuestos-desarrollo-sostenible>
- Stanimirova, I., Walczak, B. and Massart, D. L. 2005. Multiple factor analysis in environmental chemistry. *Analytica Chimica Acta*. 545(1):1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.04.054>
- Tonolli, A. J., 2018. Propuesta metodológica para la obtención de indicadores de sustentabilidad de agroecosistemas desde un enfoque multidimensional y sistémico. *Rev. FCA UNCUYO*. ISSN 03704661 (Disponible en línea) [http://revista.fca.uncu.edu.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=617:2019-03-07-18-51-17&catid=20:en-prensa&Itemid=23](http://revista.fca.uncu.edu.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=617:2019-03-07-18-51-17&catid=20:en-prensa&Itemid=23)
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bienders, C., Brouckaert, V., Franchois, L., Garcia Ciudad, V., Hermey, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., Sauvenier, X., Valckx, J., Vanclooster, M., Van der Veken, B., Wauters, E. and Peeters, A., 2007. SAFE - A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 120(2):229-242. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.006>
- Visión Mundial. 2004. Manual de manejo de cuencas. San Salvador, SV. World Vision. (Disponible en línea) <https://www.actswithscience.com/Descargas/manual%20de%20manejo%20de%20cuenca.s.pdf>
- Wong, T., Knights, D. and Lloyd, S. 2008. Hydrologic, water quality and geomorphic indicators of catchment Effective Imperviousness. *Australasian Journal of Water Resources*. 12(2):111-119. <https://doi.org/10.1080/13241583.2008.11465339>
- Yongheng, Y., Angang, H. and Ning, Z., 2005. An Alternative to Human Development Index with Principal Component Analysis. *Economic Research Journal*. 7. (Disponible en línea) [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-JYJ200507000.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-JYJ200507000.htm)