



Desarrollo sostenible a través del nexo agua-energía-alimentos: avances y perspectivas para México

Mahlknecht, Jürgen

Desarrollo sostenible a través del nexo agua-energía-alimentos: avances y perspectivas para México

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 31, 2024 | e224

Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Mahlknecht, J. (2024). Desarrollo sostenible a través del nexo agua-energía-alimentos: avances y perspectivas para México. *CIENCIA ergo-sum*, 31. <http://doi.org/10.30878/ces.v31n1a9>

Desarrollo sostenible a través del nexo agua-energía-alimentos: avances y perspectivas para México

Sustainable Development through the Water-Energy-Food Nexus: Advances and Perspectives for Mexico

Jürgen Mablknecht*

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México

jurgen@tec.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-5708-0043>

Recepción: 19 de enero de 2022

Aprobación: 19 de mayo de 2022

RESUMEN

Se evalúa el nexo agua-energía-alimentos y su perspectiva para México. Para este propósito, se emplea una revisión bibliográfica de los últimos avances y se cuantifican e ilustran las interrelaciones fundamentales en el país. Los resultados muestran que el nexo es un marco útil para aplicar estrategias y acciones referentes al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sustentable. Existen algunos estudios locales orientados a la generación de modelos de optimización e índices de desempeño para evaluar el estado actual y proyectar escenarios futuros. Sin embargo, para poder implementar el nexo, este país requiere un rediseño de las políticas públicas, así como una planificación coordinada de los sectores involucrados, incluida la participación de las partes interesadas de la sociedad, las empresas y la academia.

PALABRAS CLAVE: seguridad hídrica, seguridad energética, seguridad alimentaria, desarrollo sostenible, Objetivos de Desarrollo Sustentable.

ABSTRACT

The Water-Energy-Food Nexus and its outlook for Mexico are being assessed. To achieve this goal, a literature review of recent advancements is conducted, and the fundamental interrelationships in the country are quantified and illustrated. The results demonstrate that the Nexus serves as a valuable framework for implementing strategies and actions related to achieving the Sustainable Development Goals. There are some local studies focused on generating optimization models and performance indices to evaluate the current state and project future scenarios. However, to implement the nexus successfully, this country requires a redesign of public policies, as well as coordinated planning across the involved sectors, including the active participation of stakeholders from society, business, and academia.

KEYWORDS: water security, energy security, food security, sustainable development, Sustainable Development Goals.

INTRODUCCIÓN

El agua, la energía y los alimentos son recursos naturales vitales para sustentar la vida en Tierra e indispensables para el bienestar de las personas y las actividades económicas. A nivel global en 2020, alrededor de 2.37 000 millones de personas no tuvieron acceso adecuado a alimentos, 750 millones de personas no tuvieron acceso a energía y 2 000 millones personas vivieron en escasez de agua (WHO, 2021; IEA-IRENA, 2021; UN-Water; 2021).

Esta situación debe al crecimiento poblacional, la urbanización, las economías en alza y el consiguiente cambio en los patrones de consumo y el cambio climático que ejercen presión sobre esos tres recursos. Por ende, la seguridad hídrica, energética y alimentaria representa un gran desafío para el desarrollo sostenible. Se requiere una gestión eficaz de los recursos naturales para resolver los problemas mundiales críticos del hambre que mejoren la salud y construyan una economía sostenible (Sachs *et al.*, 2021).

Debido a la interrelación entre estos recursos naturales, la explotación de uno de ellos a menudo establece el prerrequisito de las abundancias de otro. Por ejemplo, la producción de cualquier tipo de energía fósil, energía hidroeléctrica, procesos de enfriamiento en la industria requieren de bastante agua; la extracción, conducción, tratamiento y distribución de agua, de mucha energía; la producción alimentaria (cultivo, ganado), preparación y distribución, de los alimentos de agua y energía en abundancia.

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

jurgen@tec.mx

Por lo tanto, para entender y atender estas interrelaciones se conceptualizó un marco o enfoque sistémico, llamado *Nexo Agua-Energía-Alimentos* (Nexo AEA o bien WEF Nexus, por sus siglas en inglés), con el fin de minimizar las compensaciones (acciones que reducen la abundancia de un recurso debido a la explotación de otro recurso) y maximizar las sinergias (acciones que conservan o aumentan la abundancia de los recursos conjuntamente) entre estos recursos y así hacer un uso más eficaz de ellos (figura 1).

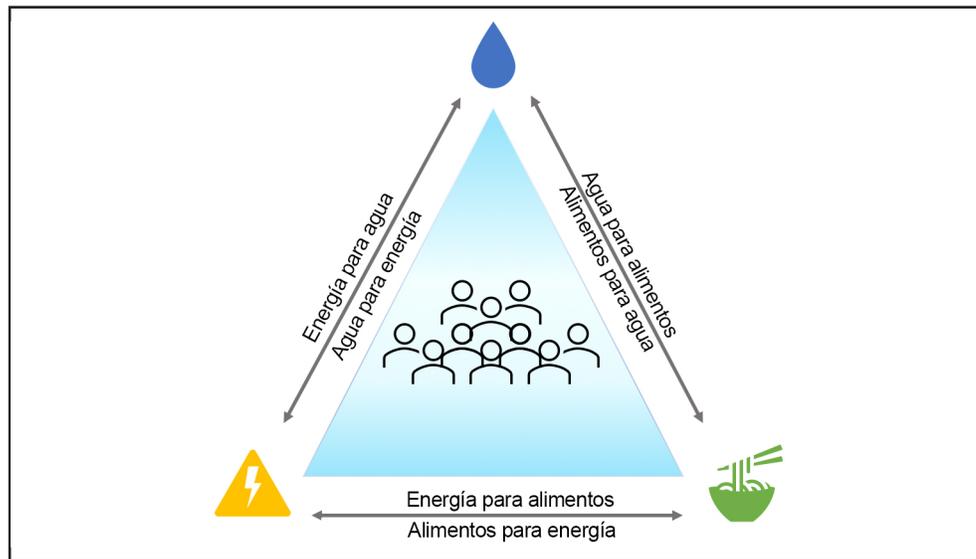


FIGURA 1
Esquema del Nexo AEA

Fuente: elaboración propia.

Nota: en el centro se indica la población y en los rincones los tres recursos vitales: agua, energía y alimentos y sus interrelaciones. En el texto se describen algunos ejemplos de interrelaciones.

Entre los muchos marcos o paradigmas propuestos para promover el desarrollo sostenible, el Nexo AEA está ganando atención entre académicos, gobiernos y empresas debido a su potencial para ayudar a comprender las sinergias y las compensaciones de estos recursos naturales de una manera interdisciplinaria (Simpson y Jewitt, 2019). Este marco está diseñado para mejorar la comprensión y la cuantificación de la oferta y la demanda de recursos naturales, sus flujos económicos y las estructuras sociales que impactan en la seguridad hídrica, energética y alimentaria.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de documentos existentes en la base de datos Scopus y World of Science sobre el tema del Nexo AEA. Los términos de búsqueda fueron “water AND energy AND food AND nexus”, “water AND energy AND nexus”, “food AND water AND nexus”, “energy AND food AND nexus” y “water AND energy AND food AND security”, además de considerar títulos, resúmenes o palabras clave de documentos. Después de un escrutinio inicial, se descartaron aquellos que no cumplen con los criterios del esquema del Nexo AEA enunciado. Por su parte, para el análisis sobre América Latina y México se retuvieron nada más documentos que hacen referencia a esta región o país respectivamente.

El análisis del Nexo AEA de México se basó en los factores internos fundamentales en el país, enunciados por Biggs *et al.* (2015). Estos factores representan las interrelaciones más importantes que existen dentro del Nexo AEA, como se muestra en la figura 2.

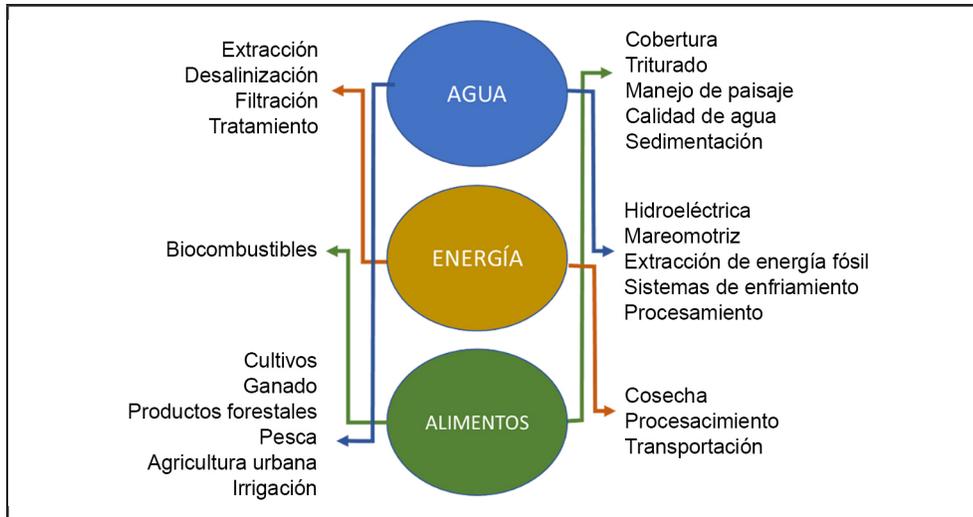


FIGURA 2
 Interrelaciones fundamentales dentro del Nexo Agua-Energía-Alimentos
 Fuente: elaboración propia con base en Biggs *et al.* (2015).

Se desarrolló un enfoque para cuantificar e ilustrar estas interrelaciones fundamentales (Mahlknecht *et al.*, 2020), el cual consistió en el cálculo de un factor normalizado (entre 0 y 1) para cada interrelación sectorial, es decir, el consumo en agua para energía (WC^{W-E}) y agua para alimentos (WC^{W-F}), el consumo de energía para agua (EC^{E-W}) y energía para alimentos (EC^{E-F}), el consumo de alimentos para agua (FC^{F-W}), y alimentos para energía (FC^{F-E}). Cada factor se obtuvo al dividir la suma de las compensaciones correspondientes entre los sectores por la disponibilidad de cada recurso. En el caso del agua, el consumo fue normalizado por el consumo total de agua (TWC); en el caso de la energía, éste se dividió por la producción neta de energía primaria (NEP); finalmente, para los alimentos éste se ponderó por la biomasa potencial neta (NPB) que podría transformarse en energía o agua. Donde i representa la interrelación entre energía y agua, f representa la interrelación entre el agua y los alimentos y k representa la interrelación entre alimentos y energía. Así, fue posible ilustrar el nivel del Nexo AEA que representan los recursos que interactúan entre los sectores de acuerdo con las ecuaciones (1) a la (6):

$$WE = \frac{\sum_i WC_i^{W-E}}{TWC} \tag{1}$$

$$WF = \frac{\sum_f WC_f^{W-F}}{TWC} \tag{2}$$

$$EW = \frac{\sum_i EC_i^{E-W}}{NEP} \tag{3}$$

$$EF = \frac{\sum_k EC_k^{E-F}}{NEP} \tag{4}$$

$$FW = \frac{\sum_j FC_j^{F-W}}{NPB} \tag{5}$$

$$FE = \frac{\sum_k FC_k^{F-E}}{NPB} \quad (6)$$

Los datos para integrar los factores se obtuvieron consultando fuentes oficiales (Secretaría de Energía y Comisión Nacional del Agua) y las redes temáticas del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt).

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Avances en el estudio del Nexo AEA

Desde su lanzamiento en 2011 en la Conferencia de Bonn, Alemania, de parte de la ONU (Hoff, 2011), se han logrado avances notables en ambos, en la fundamentación teórica y el despliegue práctico del enfoque Nexo AEA, con el fin de evaluar y eventualmente resolver problemas socioambientales complejos.

Los trabajos realizados han enfatizado la utilidad del marco Nexo AEA para evaluar y darse cuenta de las vulnerabilidades de la sociedad ante los riesgos naturales y socioeconómicos, y en cómo este marco puede contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) (Liu *et al.*, 2018). Hay tres ODS directamente involucrados en el Nexo AEA: ODS 2 (cero hambre), ODS 6 (agua potable y saneamiento para todos) y ODS 7 (energía limpia y asequible) y otros ODS que tienen relación indirecta con el Nexo. Los estudios se han llevado a cabo con el enfoque del Nexo AEA en el ámbito local, regional, nacional y continental.

En seguida, se presentan algunos casos relevantes que se han realizado para México y América Latina. El trabajo de López-Díaz *et al.* (2018) proponen un marco de optimización para el diseño de un sistema de biorrefinación. Estos autores toman en cuenta las interacciones con la cuenca hidrográfica circundante (río Balsas), utilizan una técnica de análisis de flujo de material a través del diseño de la cadena de suministro eficiente para la producción y distribución de materias primas, granos y biocombustibles y consideran los requisitos de agua y del uso de suelo.

Otro trabajo sugiere un modelo multiobjetivo para una comunidad pobre y marginada en el estado de Guerrero (Cansino-Loeza y Ponce-Ortega, 2018). El problema consistió en determinar la configuración óptima y sostenible para satisfacer las demandas de energía, agua y alimentos de los habitantes. Asimismo, se propuso el uso de tecnologías de conversión de residuos en energía para reducir el impacto ambiental.

A su vez, González-Bravo y colaboradores evaluaron las redes de distribución de agua y energía para la producción de alimentos en el desierto de Sonora con el fin de apoyar la toma de decisiones y orientar el desarrollo sostenible (González-Bravo *et al.*, 2018). Con el modelo de optimización desarrollado se pudo identificar la solución óptima, la cual incluye aspectos económicos, ambientales y sociales que satisfagan a los actores de interés.

En otro trabajo, Cansino-Loeza *et al.* (2020) evaluaron el progreso en la seguridad hídrica, energética y alimentaria en el estado de Sonora a través de un índice del Nexo AEA basado en la metodología de Mahlknecht y González-Bravo (2018) que involucra indicadores de disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los recursos de esta región. La evaluación de este estado, económicamente importante por su agricultura, su ganadería y su minería, consideró los ODS, los cuales permitieron identificar vulnerabilidades al desarrollo sostenible.

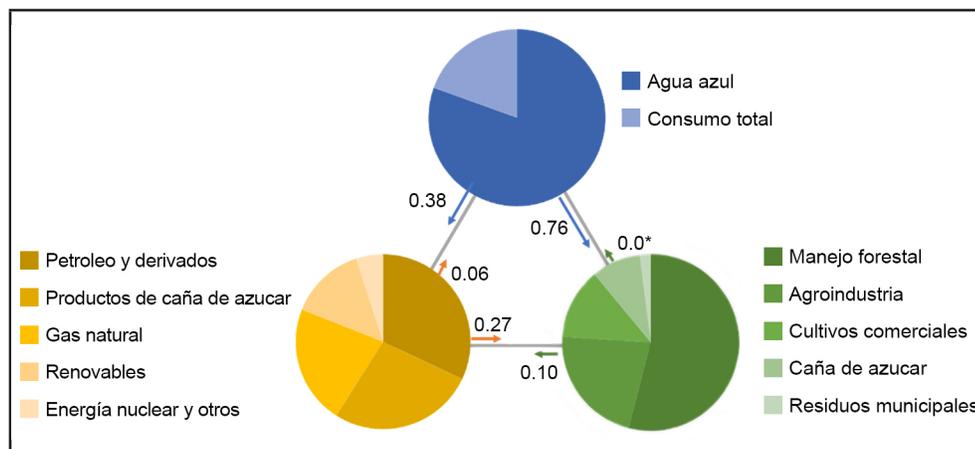
Finalmente, Sánchez-Zarco *et al.* (2020) analizaron la situación actual de la seguridad alimentaria, energética y hídrica del estado de Nuevo León, una entidad con un desarrollo económico desenfrenado, pero que lucha con la disponibilidad de los recursos naturales debido a sus condiciones climáticas adversas. Usando el enfoque del Nexo AEA, se hizo una evaluación considerando diferentes escenarios y basado en disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los recursos naturales involucrados.

En América Latina y el Caribe existe una fuerte dependencia del desarrollo de los precios de los *commodities* (bienes básicos usados en el comercio, como granos, materia prima, alimentos), por lo que es fundamental prestar atención prioritaria a la seguridad hídrica, energética y alimentaria. Mahlknecht y colaboradores hicieron un

análisis de datos regionales, basado en el enfoque del Nexo AEA, además de examinar la línea de base y las tendencias de la seguridad de estos recursos naturales (Mahlknecht *et al.*, 2020). Asimismo, desarrollaron un índice de desempeño para evaluar el progreso de la seguridad de los recursos agua, energía y alimentos de la región y otro índice basado en las interrelaciones de estos recursos. También, se abordaron desafíos críticos y soluciones para el desarrollo sostenible de esta región.

2. 2. Evaluación del Nexo AEA y perspectiva para México

En el caso de México (gráfica 1), actualmente el 76% del consumo total de agua se utiliza en el sector alimentario y solo el 38% del potencial en el sector energético (SENER, 2018; CONAGUA, 2018). No existe información oficial sobre cuánta agua se produce a partir del sector alimentario basado en las actividades descritas en la figura 2. Además, solo el 10% del potencial de la biomasa se utiliza para producir energía (García-Bustamante y Masera-Cerutti, 2016). Hay un alto potencial para fomentar el desarrollo de tecnologías para producir agua y energía a partir del sector alimentario. El consumo de energía en el sector agua y alimentos no es intensivo; los mayores consumidores de energía en México son los sectores industrial y transporte (García-Bustamante y Masera Cerutti, 2016). El país sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles. Por lo tanto, todavía hay un enorme potencial para invertir en tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables.



GRÁFICA 1

El Nexo AEA simplificado para México

Fuente: modificado de Mahlkecht *et al.* (2020).

Nota: la longitud de las flechas indica la dirección y los números el grado de interrelación entre dos sectores (entre 0 y 1). No está cuantificado Alimentos para agua.

La gráfica 1 vislumbra las preocupaciones y oportunidades entre los sectores del Nexo AEA. El agua es un recurso limitado, mientras que la energía y los alimentos dependen de su potencial de producción. Con base en esto, la gráfica muestra cómo los recursos hídricos representan el sector más vulnerable para el desarrollo energético y alimentario del país (agua para alimentos y agua para energía), así como la necesidad de implementar infraestructura verde para producción sostenible de agua (alimentos por agua).

México, como muchos otros países, aún no ha incorporado el enfoque del Nexo AEA en el diseño de sus políticas públicas, en la planificación o en la regulación de los servicios públicos o gestión de los recursos naturales. Los sectores responsables de estos recursos siguen trabajando desconectados entre sí en “silos” (Embrid y Martin, 2017; Mahlkecht *et al.*, 2020).

Otro de los desafíos es que México tiene una capacidad de planificación deficiente acompañada de un insuficiente manejo y control de recursos naturales. Esta conocida deficiencia tiene múltiples causas, entre las cuales se encuentran la debilidad del Estado, la ineficacia de los marcos regulatorios, las limitaciones en cuanto

a capacidades institucionales, medios adecuados y recursos humanos, la fragmentación del poder de decisión, la limitada participación ciudadana y la volatilidad de los precios en el caso del sector energético. Así, varios arreglos institucionales y de política pública son necesarios para poder mitigar la crisis de gobernanza y el informalismo legal. La planificación coordinada entre autoridades sectoriales desde el comienzo, incluida la participación de las partes interesadas de la sociedad, la industria y la academia, es vital para que se logre a implementar el Nexo AEA.

Por otro lado, para implementar el Nexo AEA de manera efectiva y abordar la riqueza de los recursos más abundantes de cada región de manera eficiente, existe una necesidad de desarrollar estrategias económicas para fomentar la cooperación económica intermunicipal, interestatal, e interregional, como inversiones, coordinación financiera, comercio y redes de producción transfronterizas. Las interrelaciones sectoriales no están bien identificadas o articuladas y se necesitan políticas sectoriales para fomentar la seguridad hídrica, energética y alimentaria, innovación tecnológica, esquemas de financiamiento y compartir plataformas para abordar las deficiencias más urgentes.

Por ende, se deben de fomentar las siguientes iniciativas: *a*) aumentar la productividad del agua, *b*) invertir en tecnología moderna para un uso más eficiente y eficaz del agua, *c*) mejorar la gestión de los sistemas de riego, *d*) reemplazar fuentes de alto contenido de carbono para producir electricidad con fuentes renovables de energía, *e*) construir nueva infraestructura que apoye sistemas eléctricos con bajas emisiones de carbono, *f*) aumentar la producción energética a través de la producción de energía limpia, *g*) mejorar la red eléctrica, *h*) reducir emisiones derivadas de la deforestación y degradación forestal a través de programas de reforestación, *i*) introducir incentivos para que los productores de energía conserven el agua, *j*) aumentar la seguridad energética mediante la implementación de servicios energéticos modernos en la búsqueda de desarrollo sostenible, *k*) introducir prácticas agrícolas innovadoras, como la agrosilvicultura, sistemas de riego integrados, sistemas de acuicultura, *l*) proponer sistemas sustentables alimentarios mediante la reducción de las pérdidas y el desperdicio de alimentos y *m*) desarrollar nuevos alimentos e ingredientes alimentarios de acuerdo con los principios de la sostenibilidad (Embrid y Martin, 2017; Mahlkecht *et al.*, 2020).

PROSPECTIVA

México se está urbanizando rápidamente, pero la recopilación de información no va acorde con la velocidad del crecimiento urbano. Para el desarrollo de proyecciones y recomendaciones con respecto al Nexo AEA se requiere una gran cantidad de información desagregada. Sin embargo, la información en la actualidad disponible suele ser dispersa, no continua y no homogénea por el limitado seguimiento y verificación. Por ejemplo, para generar el análisis del Nexo a nivel nacional, de los datos recopilados sobre las interrelaciones de los sectores (gráfica 1), algunos que se obtuvieron por instituciones gubernamentales no están disponibles en forma desagregada, otros se recopilaron de organizaciones civiles y redes académicas y otros más no están cuantificados en absoluto. Por consiguiente, es necesario producir información de calidad que permite el análisis cuantitativo del Nexo AEA. Estos datos deben ser consistentes y comparables entre las diferentes escalas de planificación y puestos a disposición de los actores involucrados y el público en general.

Hay algunos investigadores que opinan que el enfoque Nexo debe de incluir explícitamente la “Tierra” (Nexo AEAT o bien WEFL nexus, por sus siglas en inglés) debido a que el suelo se puede considerar un recurso natural y está ligado de modo intrínseco a los otros tres. You y sus colaboradores presentaron en un estudio reciente de optimización para minimizar el costo total anual del establecimiento y la operación de una planta de producción de bioetanol y su cadena de suministro para satisfacer las necesidades de una sociedad bajo recursos naturales limitados (energía, agua y alimentos). Con base en este estudio, se muestra la importancia de la inclusión de la disponibilidad de suelo y la capacidad tecnológica existente en el modelo (You *et al.*, 2021).

Otros investigadores opinan que además de la “Tierra” se debe de reconocer el “Clima” en el Nexo. De acuerdo con esto, el Nexo se ampliaría a Agua-Energía-Alimentos-Tierra-Clima (Nexo AEATC). Sušnik *et al.* (2021) mostraron que este enfoque es muy práctico para definir la política pública y planificación estratégica en el ámbito

nacional aplicando los juegos serios (juegos diseñados con un propósito formativo) con la participación de los actores involucrados. En el estudio de Laspidou *et al.* (2020) se simuló el Nexo AEATC en el ámbito nacional como un sistema multisectorial holístico que proporciona información sobre la vulnerabilidad de los recursos naturales a escenarios socioeconómicos futuros para una nación.

Por último, se ha propuesto incluir los “Bosques” en el Nexo (Nexo AEAB o bien WEEF nexus, por sus siglas en inglés) (Melo *et al.*, 2021). Según estos autores, la “seguridad forestal” debería constituir una cuarta dimensión fundamental de un nuevo marco de Nexo, que esté respaldado por un papel integrado de los bosques en el desarrollo sostenible y la participación de las comunidades locales en soluciones basadas en la naturaleza, en particular en los países del hemisferio sur (figura 3).

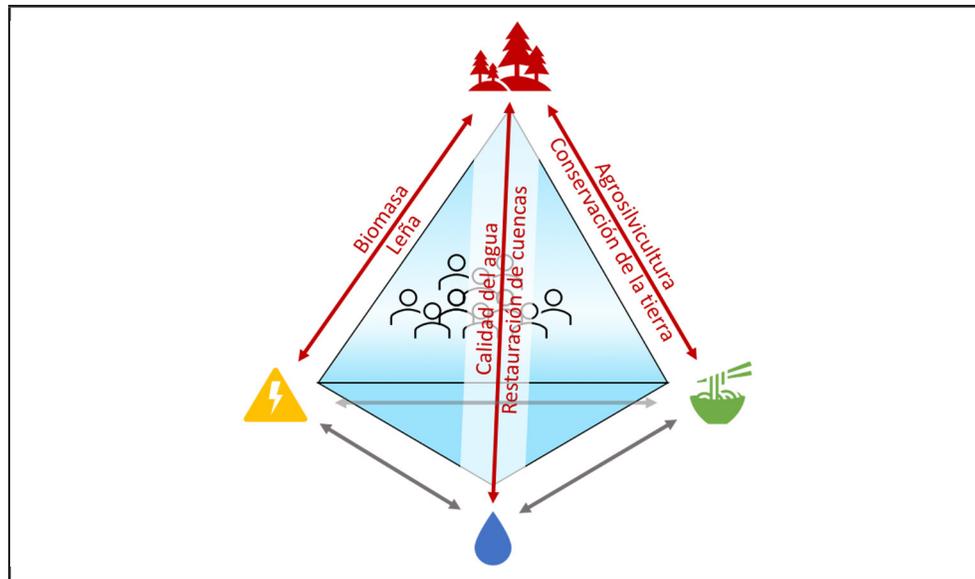


FIGURA 3

Esquema del Nexo Agua-Energía-Alimentos-Bosques

Fuente: elaboración propia con base en Melo *et al.* (2021).

Nota: las flechas rojas indican las interrelaciones con los bosques, mientras que las flechas grises indican las interrelaciones entre agua, energía y alimentos descritas en la figura 2.

Como se nota, estos diferentes nuevos enfoques son factibles y aplicables dentro de ciertas áreas de aplicación y no existe una solución única. Es imprescindible que el método seleccionado coadyuve a acelerar el ritmo y la magnitud de los cambios necesarios para alcanzar los ODS. Todos deben ser útiles para mitigar la escasez de los recursos naturales y adaptarse al desafiante futuro incierto. Lograr el desarrollo sostenible no solo requiere más que abordar la oferta y la demanda dinámica de los recursos, sino también debe centrarse en cómo conservar y restaurar los ecosistemas que apoyan el aprovisionamiento de dichos recursos naturales.

CONCLUSIONES

El Nexo AEA está ganando atención entre gobiernos, académicos y empresas debido a su potencial para ayudar a comprender las sinergias y compensaciones de los recursos naturales agua, energía y alimentos de una manera interdisciplinaria. Este marco está diseñado para comprender y cuantificar de la oferta y la demanda de recursos naturales mencionados, sus flujos económicos y las estructuras sociales que afectan la seguridad hídrica, energética y alimentaria. Los trabajos realizados han enfatizado la utilidad del marco Nexo AEA para evaluar y darse cuenta de las vulnerabilidades de la sociedad ante los riesgos naturales y socioeconómicos y de cómo este marco puede contribuir a implementar estrategias y acciones para lograr los ODS relacionados.

En México se han elaborado algunos estudios basados en el enfoque del Nexo AEA, la mayoría están orientados a generar modelos de optimización o índices de desempeños que contribuyan a evaluar el estado actual y proyectar escenarios futuros para la toma de decisiones. Sin embargo, este país –como muchos otros– aún no ha incorporado el enfoque del Nexo AEA en el diseño de sus políticas pública, en la planificación y en la regulación de los servicios públicos o gestión de los recursos naturales debido a una serie de desafíos.

Para superar estos obstáculos, se requiere un rediseño de las políticas públicas y, una planificación coordinada entre las autoridades sectoriales desde el comienzo, incluida la participación de las partes interesadas de la sociedad, las empresas y la academia. También, es necesario producir información de calidad que permite el análisis cuantitativo del Nexo.

Por último, existen varios nuevos enfoques complementarios al Nexo AEA, que incluyen el uso del suelo, el clima o los bosques como dimensiones adicionales; todos ellos son factibles y aplicables dentro de ciertas áreas de aplicación y no existe una solución única. Con base en lo expuesto, es primordial que el método seleccionado se adapte para coadyuvar a acelerar el ritmo y la magnitud de los cambios necesarios para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es producto de la Cátedra de Economía Circular del Agua FEMSA del Tecnológico de Monterrey. FEMSA no tuvo ningún rol en el diseño del estudio, recopilación y análisis de datos, decisión de publicar o preparación del manuscrito. Se agradece a los árbitros que aportaron una mejora a la estructura del artículo.

REFERENCIAS

- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M., Horsley, J., Pauli, N., McNeill K., Neef, A., Van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S., & Imanari, Y. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science and Policy*, 54, 389-397.
- Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2018). Involving the water–energy–food nexus in integrating low-income and isolated communities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 1399-1418.
- Cansino-Loeza, B., Sánchez-Zarco, X. G., Mora-Jacobo, E. G., Saggiante-Mauro, F. E., González-Bravo, R., Mahlknecht, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus for Sustainable Development in Regions with Resource Scarcities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(36), 13734-13748.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). *Estadísticas del agua en México*. México: Ciudad de México.
- Embrid, A., & Martin L. (2017). *Water-Energy-Food Nexus in Latin America and the Caribbean countries, planning, regulatory framework and identification of priority interconnections*. Bonn: United Nations Organization.
- García-Bustamante, C. A., & Masera-Cerutti O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México: Red Temática de Bioenergía del Conacyt*. Guadalajara: México.
- González-Bravo, R., Saucedo-Valenzuela, M., Mahlknecht, J., Rubio-Castro, E., & Ponce-Ortega, J. M. (2018). Optimization of water grid at macroscopic level analyzing water-energy–food nexus. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), 12140-12152.
- Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus: Background for the Bonn 2011 Nexus Conference. Stockholm: Stockholm Environment Institute.
- IEA (International Energy Agency)-IRENA (International Renewable Energy Agency). (2021). *Tracking SDG7: The energy progress report*. <https://trackingsdg7.esmap.org/>

- Laspidou, C. S., Mellios, N. K., Spyropoulou, A. E., Kofinas, D. T., & Papadopoulou, M. P. (2020). Systems thinking on the resource nexus: Modeling and visualization tools to identify critical interlinkages for resilient and sustainable societies and institutions. *Science of the Total Environment*, 717, 137264.
- Liu, J., Hull, V., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., Pahl-Wostl, C., Xu, Z., Chung, M.G., Sun, J., & Li, S. (2018). Nexus approaches to global sustainable development. *Nature Sustainability*, 1(9), 466-476.
- López-Díaz, D. C., Lira-Barragán, L. F., Rubio-Castro, E., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2018). Optimization of biofuels production via a water–energy–food nexus framework. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1443-1466.
- Mahlknecht, J., & González-Bravo, R. (2018). Measuring the water-energy-food nexus: The case of Latin America and the Caribbean region. *Energy Procedia*, 153, 169-173.
- Mahlknecht, J., González-Bravo, R., & Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, 194, 116824.
- Melo, F. P., Parry, L., Brancalion, P. H., Pinto, S. R., Freitas, J., Manhães, A. P., Meli, P., Ganade, G., & Chazdon, R. L. (2021). Adding forests to the water–energy–food nexus. *Nature Sustainability*, 4(2), 85-92.
- SENER (Secretaría de Energía). (2018). *Balance Nacional de Energía 2018*. México: Ciudad de México.
- Sachs, J., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G., & Woelm, F. (2021). *Sustainable Development Report 2021*. Cambridge University Press.
- Sánchez-Zarco, X. G., Mora-Jacobo, E. G., González-Bravo, R., Mahlkecht, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Water, energy, and food security assessment in regions with semiarid climates. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(10), 2145-2161.
- Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. (2019). The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 8.
- Sušnik, J., Jussah, O., Orabi, M. O., Abubakar, M. C., Quansah, R. F., Yahaya, W., Adonadaga, J.A., Cossa, C., Ferrato, J., Cossa, C.A., Hadi, W., Yuniarto, A., Marsono, B. D., & UNICEF-United Nations Children's Fund (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021*.
- UN-Water (United Nations Water). (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*.
- WHO (World Health Organization) (2021). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs*. World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF) 202.
- You, C., Han, S., & Kim, J. (2021). Integrative design of the optimal biorefinery and bioethanol supply chain under the water-energy-food-land (WEFL) nexus framework. *Energy*, 228, 120574.

CC BY-NC-ND