

Evaluación tecno-económica de estrategias de transición energética en sistemas agrícolas: un análisis de contenido de la literatura

Techno-economic assessment of energy transition strategies in agricultural systems: a content analysis of the scientific

José Daniel Cardona Cárdenas¹, Jakeline Serrano García², Jonathan Cano Bedoya³

¹ Universidad Surcolombiana - jose.cardona@usco.edu.co

² Institución Universitaria ITM - jakelineserrano@itm.edu.co

³ Institución Universitaria ITM - jonathancano@itm.edu.co

Resumen

El imperativo de mitigar el cambio climático ha posicionado la evaluación tecno-económica de las estrategias de transición energética como un eje de investigación fundamental, motivo por el cual este estudio desarrolla un análisis de contenido y bibliométrico de la literatura enfocada específicamente en los sistemas agrícolas. Para ello, se examinó una muestra rigurosamente seleccionada de 148 documentos indexados en la base de datos Scopus, los cuales fueron procesados mediante herramientas como *VOSviewer* y *Bibliometrix* para identificar patrones cognitivos, redes de colaboración y métricas de desempeño. Los resultados revelan una tendencia de crecimiento sostenido en la producción académica a partir de 2020, concentrada en revistas de alto impacto del sector energético e impulsada por un ecosistema de coautoría globalizado que es articulado por potencias como Alemania, Italia y Estados Unidos. Estructuralmente, la literatura se organiza en clústeres temáticos fuertemente interconectados que abordan la viabilidad financiera, la adopción de nuevos vectores como el hidrógeno, la mitigación climática y el diseño tecno-económico. En conclusión, la maduración de esta área del conocimiento subraya que la descarbonización del sector agrícola exige un enfoque holístico e internacional respaldado por estudios rigurosos que favorezcan el ciclo de vida de las infraestructuras y promuevan la mejora continua de las redes de generación y almacenamiento, garantizando así proyectos que sean tanto técnica como financieramente competitivos a nivel global.

Palabras clave: Transición energética; análisis bibliométrico; evaluación tecno-económica; sistemas agrícolas; hidrógeno verde.

Introducción

El imperativo global de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones ha posicionado la transición hacia sistemas de energía limpia como uno de los ejes centrales de la investigación científica contemporánea. Dentro de este panorama, el desarrollo y la integración de nuevos vectores energéticos, particularmente el hidrógeno verde y azul, han captado una atención investigativa sin precedentes debido a su potencial para descarbonizar sectores de alta demanda (Bhandari y Shah, 2021). Sin embargo, la consolidación de estas tecnologías no depende únicamente de su capacidad técnica, sino que exige la aplicación de rigurosos análisis tecno-económicos que evalúen su competitividad frente a los modelos tradicionales y favorezcan la toma de decisiones financieras a lo largo de su ciclo de vida (Ueckerdt et al., 2024). Por consiguiente, la literatura académica actual evidencia un marcado esfuerzo colaborativo internacional enfocado en validar la viabilidad de infraestructuras basadas integralmente en fuentes renovables (Al-Ghussain et al., 2022) y en la mejora de las redes de almacenamiento y control (Qiu et al., 2022), estableciendo así las bases teóricas y metodológicas necesarias para articular una matriz energética verdaderamente sostenible.

Metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque de revisión de literatura con análisis de contenido, complementado con herramientas de análisis bibliométrico. Este tipo de análisis permite identificar tendencias, patrones y vacíos en la producción científica, facilitando una comprensión estructurada del estado del arte en un campo específico. La recolección de información se llevó a cabo en la base de datos Scopus, reconocida por su amplia cobertura y calidad en publicaciones científicas indexadas. Para ello, se diseñó una ecuación de búsqueda estructurada que integró términos relacionados con la evaluación tecno-económica y la transición energética en sistemas agrícolas, con el fin de maximizar la recuperación de documentos relevantes y garantizar la reproducibilidad del estudio. Este procedimiento se fundamenta en lineamientos metodológicos ampliamente aceptados para revisiones sistemáticas (Tranfield *et al.*, 2003;)

Como resultado de la búsqueda inicial, se identificaron un total de 178 documentos. Posteriormente, se aplicaron criterios de exclusión con el objetivo de depurar la muestra y asegurar la calidad y pertinencia de los estudios analizados. Es así como, se consideraron únicamente documentos clasificados como artículos de investigación y artículos de revisión, publicados en idioma inglés, debido a su mayor impacto en la divulgación científica como se presenta en la

Figura 1 aplicando la metodología PRISMA (Page *et al.*, 2021). Tras la aplicación de estos criterios, se obtuvo una muestra final de 148 documentos, los cuales fueron sometidos a un proceso de análisis de contenido. Adicionalmente, se empleó el software VOSviewer para realizar un análisis de co-ocurrencia de palabras clave, lo cual facilitó la visualización de relaciones temáticas y la identificación de clusters conceptuales dentro del campo de estudio. De manera complementaria, se utilizó el paquete *Bibliometrix*, implementado en el entorno R, para llevar a cabo análisis bibliométricos descriptivos y de desempeño científico, tales como la identificación de tendencias de publicación, autores más productivos y fuentes de mayor impacto. Este tipo de análisis ha demostrado ser útil para explorar estructuras cognitivas en la investigación científica complementar enfoques cualitativos (Van Eck y Waltman, 2010)

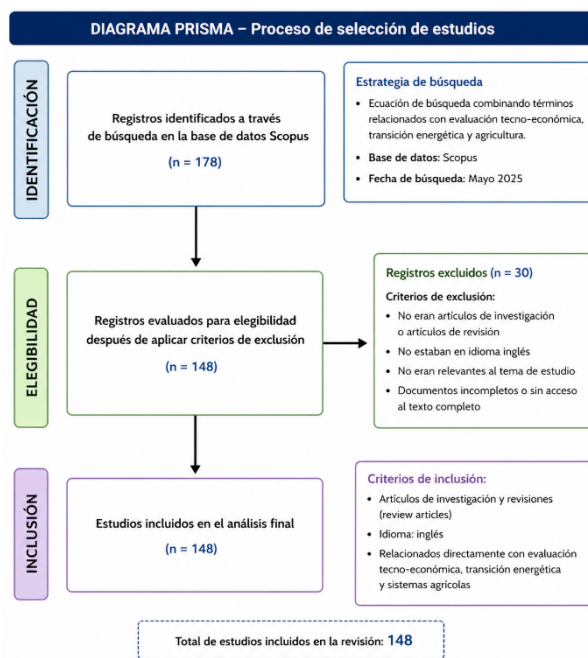


Figura 1.Diagrama Prisma del proceso de selección de la información. Fuente: propia.

Resultados

A partir de la Figura 2 de producción científica anual y los datos exportados, se observa una tendencia creciente en la producción académica relacionada con la evaluación tecno-económica en el contexto de la transición energética en sistemas agrícolas. Durante el periodo inicial (2013–2019), la cantidad de publicaciones se mantiene baja y relativamente estable, lo que sugiere una etapa incipiente del tema en la literatura científica. Sin embargo, a partir de 2020 se evidencia un incremento progresivo, con un crecimiento más marcado entre 2023 y 2025, alcanzando su punto máximo en este último año. Este comportamiento indica un aumento significativo del interés investigativo, probablemente impulsado por la relevancia global de la sostenibilidad, la descarbonización y la adopción de energías renovables en sectores productivos. No obstante, la ligera disminución posterior podría asociarse a variaciones en la indexación reciente o a ciclos normales de publicación. En conjunto, los resultados reflejan que el tema ha evolucionado de ser emergente a consolidarse como una línea de investigación en expansión, lo que abre oportunidades para el desarrollo de estudios más integrales y aplicados, especialmente en contextos regionales y agrícolas.

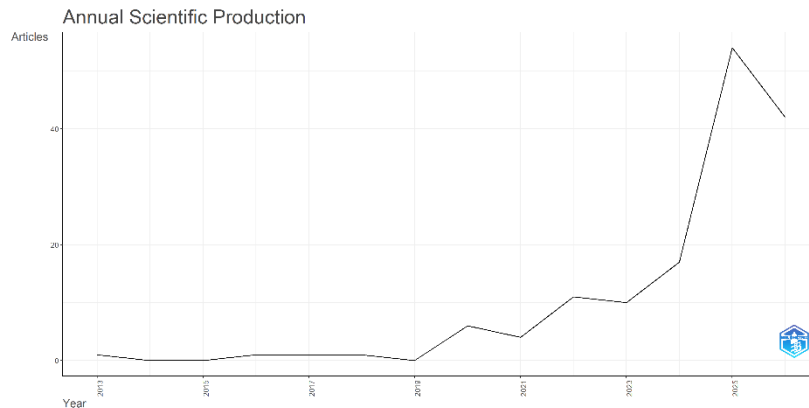


Figura 2. Producción científica anual sobre evaluación tecno-económica en la transición energética en sistemas agrícolas. Fuente: Bibliometrix.

A partir de la Figura 3 se evidencia una clara concentración de la producción científica en revistas especializadas en el sector energético y de sostenibilidad. Los resultados presentan a *Energies* y al *International Journal of Hydrogen Energy* como las fuentes más relevantes y de mayor impacto en esta área de estudio, liderando la lista con un empate de 12 documentos publicados cada una. En un segundo plano, destaca *Sustainability* (Switzerland) con 7 documentos, seguida por un bloque de revistas altamente especializadas que cuentan con 6 publicaciones cada una (*Applied Energy*, *Energy Conversion and Management: X* y *Renewable Energy*). La lista se cierra con fuentes que aportan entre 4 y 5 documentos, consolidando un ecosistema de publicación enfocado, este comportamiento analítico sugiere que la temática investigada posee un nicho muy definido, donde los investigadores prefieren canalizar sus hallazgos a través de un grupo selecto de editoriales dedicadas a la transición energética, las tecnologías limpias y el desarrollo sostenible.

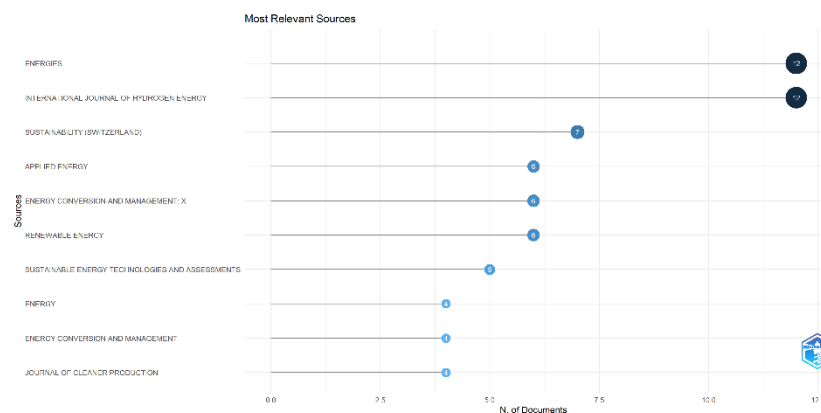


Figura 3. Fuentes de publicación relevantes. Fuente: Bibliometrix.

En la Figura 4, se presente la red de coautoría entre autores, en la cual se logra evidenciar un ecosistema de colaboración estructurado principalmente en dos agrupaciones o clústeres. el primer clúster, visualizado en color rojo, expone una densa red de interacción entre los investigadores *Abdullah, Gielen, McQueen, Reinisch, Saygin* y *Wagner*, destacando que cada uno de ellos cuenta con un único documento publicado, 78 citaciones acumuladas y una fuerza de enlace total de 7. por su parte, la segunda agrupación, representada en color verde, se encuentra fuertemente liderada por los autores *Griffiths* y *Sgouridis*, quienes dominan las métricas de la red al registrar 2 documentos, 139 citaciones y la mayor fuerza de enlace total, equivalente a 11 cada uno. estos dos investigadores operan visual y estadísticamente como los principales nodos puente o conectores entre su propio grupo por *Kennedy, Khalid* y *Zurita*, quienes registran un documento, 61 citaciones y una fuerza de enlace de 4 cada uno, y los miembros del clúster rojo. este comportamiento analítico demuestra que la producción académica en este espacio colaborativo depende de subgrupos fuertemente consolidados en sus propios nichos, pero que logran cohesionarse a nivel general gracias a figuras de alto impacto investigativo que facilitan la articulación y el flujo de conocimiento.

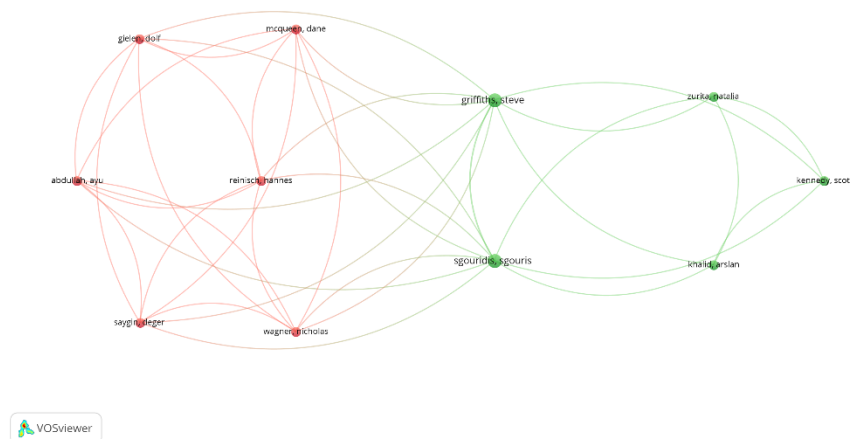


Figura 4. Red de co-autoría entre autores. Fuente: VOSViewer.

La red de colaboración entre países que se presenta en la Figura 5, se evidencia un ecosistema de investigación distribuido en múltiples clústeres interconectados que revelan las dinámicas de coautoría internacional el nodo de mayor centralidad y tamaño en la región occidental de la red corresponde a *Germany* ubicado en el clúster amarillo. Este país actúa como uno de los principales puentes articuladores, conectando directamente con potencias como el *United Kingdom* y *United Arab Emirates*, así como con otras agrupaciones geográficas que incluyen a *Australia* (clúster azul), *Norway* y *Spain* (clúster marrón). Por su parte, en el extremo derecho del gráfico se identifica un clúster rojo fuertemente consolidado y liderado por *Italy*, el cual mantiene una colaboración estrecha con *South Korea* y establece fuertes vínculos con el clúster verde, dominado por los *United States*. Este último nodo, de gran relevancia métrica, muestra a su vez ramificaciones hacia países como *Nigeria* y *Thailand*. Es así como, países emergentes se agrupan como el clúster azul donde Saudi Arabia sirve como enlace hacia Algeria y se conecta con el bloque europeo, y un clúster naranja más focalizado que vincula directamente a *India* con *Oman*. Este comportamiento sugiere que la producción científica en esta área está fuertemente impulsada por alianzas estratégicas transversales. Potencias europeas y norteamericanas operan como nodos centrales y de alto impacto que integran el esfuerzo investigativo de diversas regiones, incluyendo Asia, medio oriente y África, conformando una red de transferencia de conocimiento verdaderamente globalizada.

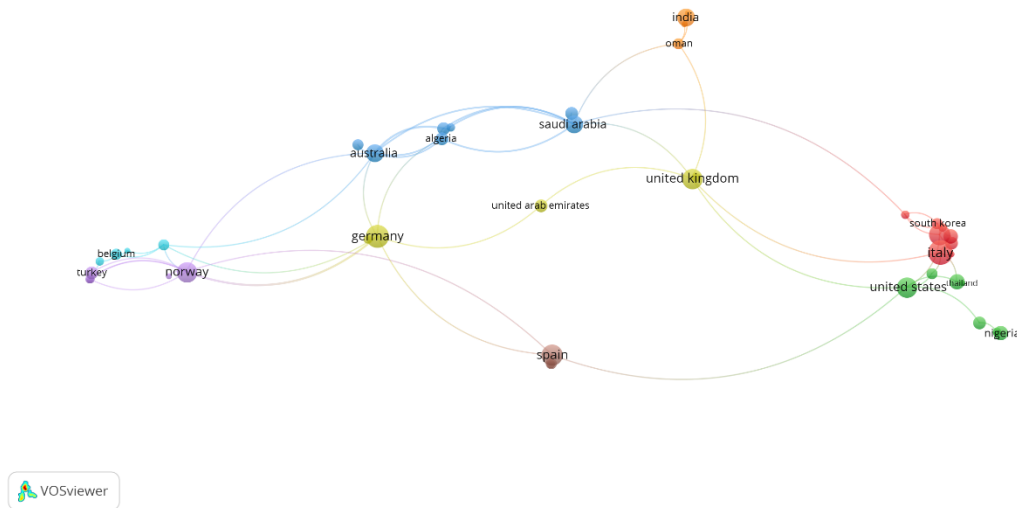
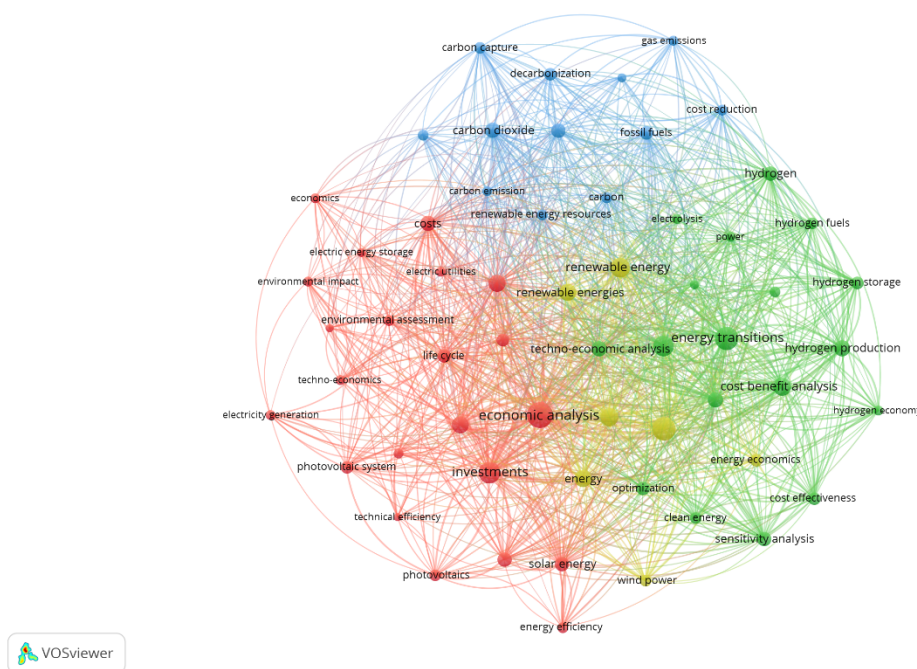


Figura 5. Co-autoría entre países. Fuente: VOSViewer.

La Figura 6 red de co-ocurrencia de palabras clave, presenta una estructuración temática dividida en cuatro clústeres principales fuertemente interconectados. En la sección izquierda destaca un amplio clúster rojo centrado en la evaluación financiera y de viabilidad, liderado por nodos de gran centralidad como "*conomic analysis* e *investments*", los cuales se vinculan estrechamente con *solar energy*, *costs* y variables de sostenibilidad como *life cycle* y *environmental impact*. El clúster verde agrupa los términos enfocados en el cambio de matriz energética, dominada por *energy transitions* y *renewable energy*, extendiéndose de manera significativa hacia el desarrollo tecnológico del vector del hidrógeno (*hydrogen*, *hydrogen production*, *hydrogen storage*). El clúster azul dedicado a la mitigación climática, agrupando términos críticos como *carbon dioxide*, *decarbonization*, *carbon capture* y *fossil fuels*. Finalmente, actuando como puente integrador en el centro, se aprecia un clúster amarillo donde convergen conceptos analíticos y de diseño como *techno-economic analysis*, *optimization* y *wind power*. esta distribución topológica indica que la literatura científica actual aborda el problema energético desde un enfoque sumamente holístico, donde la transición hacia fuentes limpias y los esfuerzos de descarbonización están obligatoriamente supeditados al rigor de la optimización sistémica y la factibilidad techno-económica.



- Qiu, D., Dong, Z., Zhang, X., Wang, Y., y Strbac, G. (2022). Safe reinforcement learning for real-time automatic control in a smart energy-hub. *Applied Energy*, 309, 118403. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118403>
- Tranfield, D., Denyer, D., y Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Ueckerdt, F., Verpoort, P. C., Anantharaman, R., Bauer, C., Beck, F., Longden, T., y Roussanaly, S. (2024). On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. *Joule*, 8(1), 104–128. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.004>
- Van Eck, N. J., y Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

