PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA
SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE
ISSN: 3072-8452

ECONOMÍA CIRCULAR EN ENERGÍAS SOLAR FOTOVOLTAICA Y EÓLICA: PRÁCTICAS, TENDENCIAS Y DESAFÍOS HACIA LA SOSTENIBILIDAD

CIRCULAR ECONOMY IN SOLAR PHOTOVOLTAIC AND WIND ENERGY: PRACTICES, TRENDS, AND CHALLENGES TOWARD SUSTAINABILITY

AUTORAS

GERALDYNE TORRÓNTEGUI CHÁVEZ
TECNM – INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MÉXICO

YANETH BUSTOS TERRONES
SECIHTI - TECNM - INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN. DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MÉXICO

FLOR SALAIZA LIZÁRRAGA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN, DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS.
MÉXICO

doi 10.65011

Volumen 5 - Número 6
2026

Redilat
Red de Investigadores Latinoamericanos
PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE
LATINDES
INSTITUTO LATINOAMERICANO EN DESARROLLO SOSTENIBLE

Economía Circular en Energías Solar Fotovoltaica y Eólica: Prácticas, Tendencias y Desafíos hacia la Sostenibilidad

Circular Economy in Solar Photovoltaic and Wind Energy: Practices, Trends, and Challenges Toward Sustainability

Geraldyne Torróntegui Chávez
geraldyne.tc@culiacan.tecnm.mx
https://orcid.org/0009-0008-2202-8334
TecNM – Instituto Tecnológico de Culiacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación
Culiacán – México

Yaneth Bustos Terrones[1]
yaneth.bt@culiacan.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0001-6445-2071
SECIHTI - TecNM - Instituto Tecnológico de Culiacán. División de Estudios de Posgrado e Investigación
Culiacán – México

Flor Salaiza Lizárraga
flor.sl@culiacan.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0003-3864-0575
Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Culiacán, Departamento de Ciencias Económico-Administrativas.
Culiacán – México

Artículo recibido: 11/10/2026
Aceptado para publicación: 11/11/2026
Conflictos de Intereses: Ninguno que declarar

[1] Autora de correspondencia.

RESUMEN

La transición hacia fuentes de energía renovable plantea nuevos desafíos relacionados con el consumo de materiales, la generación de residuos y la gestión de componentes al final de su vida útil. En este contexto, la economía circular ofrece estrategias para minimizar los impactos ambientales, recuperar recursos valiosos y mejorar la sostenibilidad de las tecnologías renovables. El presente artículo analiza las prácticas de economía circular y las tendencias emergentes de investigación en sistemas de energía solar fotovoltaica y eólica, mediante una revisión sistemática de literatura basada en la metodología PRISMA, complementada con análisis bibliométrico y temático exploratorio. Se examinaron publicaciones científicas indexadas en Scopus y Web of Science durante el periodo 2022–2026, obteniendo una selección inicial de 207 artículos: 112 sobre sistemas fotovoltaicos y 95 sobre energía eólica. Los resultados evidencian un creciente interés científico en el reciclaje mecánico, térmico y químico, la recuperación de materiales, el ecodiseño, la reutilización de componentes y la valorización de residuos. En el sector fotovoltaico destacan la recuperación de silicio, vidrio, aluminio y plata, mientras que en el eólico predominan investigaciones sobre reciclaje de materiales compuestos, reutilización de palas y tratamientos alternativos de fin de vida útil. El análisis temático preliminar también identifica diferencias en las prioridades de investigación entre ambas tecnologías. A pesar de los avances, persisten desafíos económicos, tecnológicos, ambientales y regulatorios. Estos hallazgos permiten identificar oportunidades para fortalecer las estrategias circulares y contribuir a una transición energética más sostenible y eficiente en el uso de recursos.

Palabras clave: energía renovable, economía circular, sostenibilidad, energía solar fotovoltaica, energía eólica

ABSTRACT

The transition toward renewable energy sources presents new challenges related to material consumption, waste generation, and end-of-life management. In this context, the circular economy offers strategies to minimize environmental impacts, recover valuable resources, and improve the sustainability of renewable energy technologies. This article analyzes circular economy practices and emerging research trends in solar photovoltaic (PV) and wind energy systems through a systematic literature review following the PRISMA methodology, complemented by bibliometric and exploratory thematic analyses. Scientific publications indexed in Scopus and Web of Science between 2022 and 2026 were examined, resulting in an initial selection of 207 articles: 112 studies on photovoltaic systems and 95 on wind energy. The findings highlight growing scientific interest in mechanical, thermal, and chemical recycling, material recovery, ecodesign, component reuse, and waste valorization. Photovoltaic research primarily focuses on recovering silicon, glass, aluminum, and silver, whereas wind energy studies emphasize composite material recycling, blade repurposing, and alternative end-of-life treatments. Preliminary title-based thematic analysis also reveals differences in research priorities between the two technologies. Despite technological advances, economic feasibility, recycling infrastructure, environmental impacts, and regulatory frameworks remain significant challenges. These findings highlight opportunities to strengthen circular economy strategies and support a more resource-efficient and sustainable energy transition.

Keywords: renewable energy, circular economy, sustainability, solar photovoltaic energy, wind energy

INTRODUCCIÓN

La transición hacia un modelo energético más sostenible ha impulsado el crecimiento de las fuentes de energía renovable, particularmente la solar fotovoltaica y la eólica, debido a su capacidad para generar electricidad sin emisiones directas de gases de efecto invernadero durante su operación. Sin embargo, aunque estas tecnologías contribuyen a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, su expansión también plantea nuevos desafíos ambientales relacionados con la extracción de materias primas, la fabricación de componentes y la gestión de los residuos que se generan al finalizar su vida útil. Esta situación plantea una pregunta fundamental: ¿qué ocurre con los paneles solares y los aerogeneradores cuando dejan de funcionar?

Los sistemas fotovoltaicos y eólicos están integrados por diversos materiales cuya recuperación y aprovechamiento representan tanto un desafío como una oportunidad. En el caso de los paneles solares, materiales como el vidrio, el aluminio, el silicio y la plata pueden reincorporarse a procesos productivos mediante tecnologías de reciclaje y recuperación (Sivagami et al., 2024). Por su parte, los aerogeneradores contienen materiales metálicos recuperables, pero también componentes de mayor complejidad, como las palas fabricadas con materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio o carbono, cuyo tratamiento resulta particularmente difícil debido a sus características estructurales (Mishnaevsky, 2021). Si estos materiales no se gestionan adecuadamente, los beneficios ambientales asociados con la generación de energía renovable pueden verse parcialmente comprometidos.

Ante este panorama, la economía circular surge como una alternativa al modelo tradicional de producción y consumo basado en extraer, fabricar, utilizar y desechar. Su propósito es mantener los materiales y productos en circulación durante el mayor tiempo posible mediante estrategias como la reducción del consumo de recursos, el ecodiseño, la reparación, la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos (Sahajwalla & Hossain, 2023). Aplicar estos principios a las tecnologías renovables implica considerar no solamente la generación de electricidad limpia, sino también los impactos ambientales y las oportunidades de aprovechamiento de materiales a lo largo de todo su ciclo de vida.

Durante los últimos años, diversas investigaciones han abordado la aplicación de estrategias circulares en ambos sectores. En energía solar fotovoltaica, los estudios recientes han explorado métodos mecánicos, térmicos, químicos y electroquímicos para separar componentes y recuperar materiales de valor, así como alternativas para reutilizar módulos y

mejorar su diseño (Sahajwalla & Hossain, 2024). Asimismo, se han empleado herramientas como el análisis de ciclo de vida y las evaluaciones técnico-económicas para comparar los impactos ambientales y la viabilidad de distintas opciones de tratamiento (Daniela-Abigail et al., 2024). En energía eólica, las investigaciones se han concentrado especialmente en el reciclaje y la reutilización de las palas de los aerogeneradores, incluyendo su transformación en materiales de construcción, aplicaciones estructurales y procesos de recuperación de fibras. Otros trabajos han examinado el desarrollo de materiales reciclables, la gestión de flujos de residuos y la evaluación ambiental de diferentes escenarios de desmantelamiento (Biblioteca et al., 2026).

Aunque estos avances muestran un interés creciente por incorporar los principios de circularidad al sector energético, también evidencian que no existe una solución única para ambas tecnologías. Las diferencias en la composición de los materiales, los procesos de fabricación, la infraestructura disponible y los costos de recuperación condicionan la aplicación de las estrategias circulares. Por ello, resulta necesario examinar de manera conjunta las prácticas investigadas en los sectores fotovoltaico y eólico, identificar sus principales enfoques y reconocer las tendencias que están orientando el desarrollo de nuevas soluciones. Este análisis puede contribuir a comprender qué alternativas reciben mayor atención científica y cuáles son los desafíos que aún requieren investigación.

En este contexto, el presente estudio busca responder las siguientes preguntas: ¿cuáles son las principales prácticas de economía circular investigadas en los sistemas de energía solar fotovoltaica y eólica?, ¿qué tendencias temáticas predominan en la producción científica reciente? y ¿qué similitudes, diferencias y desafíos se identifican en la aplicación de estas estrategias?. Estas preguntas parten del supuesto de que, aunque ambas tecnologías comparten el objetivo de avanzar hacia una generación energética más sostenible, sus características materiales y tecnológicas conducen a prioridades de investigación diferentes.

Para responderlas, se realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021), mediante la búsqueda y selección de publicaciones científicas indexadas en Scopus y Web of Science durante el periodo 2022–2026. El estudio se complementó con un análisis bibliométrico para examinar la evolución de las publicaciones y con un análisis temático exploratorio de los títulos de los artículos seleccionados, orientado a reconocer conceptos recurrentes y líneas de investigación. De esta manera, se pretende ofrecer una visión accesible

y fundamentada sobre cómo la economía circular puede contribuir a reducir los impactos ambientales de las tecnologías solar fotovoltaica y eólica, así como identificar oportunidades para fortalecer su sostenibilidad a largo plazo.

METODOLOGÍA

Diseño y enfoque de la investigación

La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica, complementada con un análisis bibliométrico y una exploración de tendencias temáticas. Este enfoque permitió examinar las principales prácticas de economía circular investigadas en los sistemas de energía solar fotovoltaica y eólica, así como identificar los enfoques científicos relacionados con la recuperación de materiales, el reciclaje, la reutilización de componentes y la gestión de residuos al final de su vida útil.

Para organizar la revisión se utilizó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), siguiendo las directrices de Page et al. (2021). Este procedimiento permitió estructurar las etapas de identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión de estudios, con el propósito de establecer un proceso de revisión transparente y reproducible.

Se realizaron búsquedas independientes para las tecnologías solar fotovoltaica y eólica, debido a las diferencias existentes entre sus materiales, componentes y alternativas de tratamiento al final de su vida útil. Posteriormente, la información recopilada se utilizó para caracterizar la producción científica y comparar las principales estrategias circulares estudiadas en ambos sectores.

Fuentes de información y periodo de estudio

La búsqueda de literatura científica se realizó el 14 de abril de 2026 en las bases de datos Scopus y Web of Science, seleccionadas por su cobertura de publicaciones académicas en los campos de energía, sostenibilidad, ingeniería y ciencias ambientales. El periodo de análisis comprendió publicaciones entre 2022 y 2026, con el propósito de identificar investigaciones recientes relacionadas con la aplicación de principios de economía circular en tecnologías renovables. Se consideraron artículos científicos publicados en inglés y en revistas académicas revisadas por pares.

La búsqueda se desarrolló por separado para cada tecnología, lo que permitió construir dos conjuntos de publicaciones y examinar sus características de manera independiente antes de realizar la comparación temática.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante combinaciones de palabras clave en inglés relacionadas con tres dimensiones principales: economía circular y gestión de materiales, tecnología energética y evaluación de sostenibilidad. Se utilizaron operadores booleanos AND y OR para combinar conceptos relacionados y recuperar publicaciones que abordaran simultáneamente las tecnologías de interés y las prácticas circulares.

Para energía solar fotovoltaica se empleó la siguiente cadena de búsqueda

("circular economy" OR recycling OR "end of life" OR "material recovery") AND ("photovoltaic module" OR "solar panel" OR "PV module" OR "solar pv") AND ("life cycle assessment" OR "LCA" OR "environmental assessment" OR "sustainability assessment" OR "life cycle")

Para energía eólica se utilizó la siguiente cadena:

("circular economy" OR recycling OR "end of life" OR "material recovery") AND ("wind energy" OR "wind turbine" OR "wind farm") AND ("life cycle assessment" OR "LCA" OR "environmental assessment" OR "sustainability assessment" OR "life cycle")

La combinación de estos términos permitió orientar la búsqueda hacia estudios que relacionaran las prácticas de economía circular con la evaluación ambiental y la gestión del ciclo de vida de las tecnologías renovables. Asimismo, se aplicaron filtros de periodo de publicación, idioma y tipo de documento para delimitar el conjunto inicial de resultados.

Criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la pertinencia de la literatura seleccionada, se establecieron criterios de inclusión y exclusión relacionados con el alcance temático, el tipo de publicación y el periodo de estudio. Se incluyeron artículos científicos publicados entre 2022 y 2026, redactados en inglés, sometidos a revisión por pares y enfocados en tecnologías de energía solar fotovoltaica o eólica. Además, los estudios debían abordar prácticas de economía circular, gestión de residuos, recuperación de materiales, reciclaje, reutilización o estrategias relacionadas con el final de la vida útil de los sistemas energéticos.

Se excluyeron artículos de revisión, publicaciones que no correspondieran a las tecnologías seleccionadas y estudios que no abordaran la gestión del final de la vida útil ni las prácticas de economía circular. También se descartaron registros duplicados identificados durante el proceso de selección. Estos criterios permitieron delimitar el análisis a investigaciones relacionadas directamente con los objetivos del estudio y reducir la incorporación de publicaciones ajenas al tema central. El proceso de selección se desarrolló mediante las etapas de identificación, revisión, evaluación de elegibilidad e inclusión de publicaciones. Los resultados de ambas tecnologías se procesaron de manera independiente.

Selección de estudios sobre energía solar fotovoltaica

En la búsqueda sobre energía solar fotovoltaica se identificaron inicialmente 564 registros, de los cuales 377 procedían de Scopus y 187 de Web of Science. Durante la depuración inicial se eliminaron 306 registros mediante herramientas de automatización y 75 registros duplicados, quedando 183 publicaciones para la revisión de títulos y resúmenes. En esta etapa se excluyeron seis artículos de revisión. Posteriormente, se evaluaron 177 publicaciones, de las cuales 54 fueron descartadas por no estar enfocadas en sistemas fotovoltaicos. De los 123 estudios restantes, 11 fueron excluidos por no abordar escenarios de fin de vida útil ni prácticas de economía circular. Como resultado, el proceso PRISMA original permitió seleccionar 112 artículos científicos relacionados con la economía circular en sistemas de energía solar fotovoltaica.

Selección de estudios sobre energía eólica

En el caso de la energía eólica se identificaron inicialmente 664 registros, correspondientes a 359 publicaciones de Scopus y 305 de Web of Science. Durante la depuración se eliminaron 384 registros mediante herramientas de automatización y 100 registros duplicados, quedando 180 publicaciones para la revisión de títulos y resúmenes. Posteriormente, se excluyeron 23 artículos de revisión, por lo que 157 publicaciones continuaron a la evaluación de elegibilidad. De estas, 43 fueron descartadas porque no estaban enfocadas en sistemas de energía eólica, mientras que otras 19 se excluyeron por no abordar la gestión del final de la vida útil ni las prácticas de economía circular. De esta manera, el proceso PRISMA original identificó 95 artículos científicos para el análisis de economía circular en energía eólica.

Organización de la información y análisis bibliométrico

Una vez seleccionadas las publicaciones, se organizó la información bibliográfica para caracterizar la producción científica relacionada con las prácticas de economía circular en ambos sectores energéticos. El análisis bibliométrico consideró variables como el año de publicación, la revista científica, la editorial y el país del autor de correspondencia. Estas variables permitieron examinar la evolución temporal de la investigación, identificar las principales fuentes de publicación y reconocer la participación de distintos países en el desarrollo de conocimiento científico.

La información fue procesada y representada gráficamente mediante Python, utilizando herramientas de análisis y visualización de datos. Se elaboraron representaciones de la distribución anual de publicaciones, la producción científica por país y la participación de revistas y editoriales. Los resultados se analizaron de forma independiente para las tecnologías fotovoltaica y eólica, con el propósito de reconocer diferencias en la distribución y evolución de sus respectivas publicaciones.

Identificación y clasificación de prácticas de economía circular

De manera complementaria al análisis bibliométrico, se examinaron las principales prácticas de economía circular identificadas en la literatura seleccionada. Para los sistemas de energía solar fotovoltaica se consideraron investigaciones relacionadas con el reciclaje de módulos, la recuperación de materiales como silicio, vidrio, aluminio y plata, la separación de componentes, la reutilización de paneles y las estrategias de ecodiseño. También se examinaron enfoques de evaluación ambiental y económica destinados a analizar los impactos y beneficios de las alternativas de tratamiento. En el caso de la energía eólica, el análisis se centró en investigaciones relacionadas con la gestión de palas de aerogeneradores al final de su vida útil, el reciclaje de materiales compuestos, la recuperación de fibras de vidrio y carbono, los tratamientos mecánicos, térmicos y químicos, y la reutilización de componentes en aplicaciones estructurales o materiales de construcción.

Asimismo, se consideraron estudios relacionados con el análisis de ciclo de vida, la evaluación económica, los flujos de materiales y los aspectos normativos asociados con la gestión de residuos. La organización de estas prácticas permitió reconocer los principales enfoques tecnológicos y de gestión reportados en la literatura, así como establecer una base para comparar las oportunidades y limitaciones de circularidad entre ambos sectores.

Análisis exploratorio de tendencias temáticas

Con el propósito de complementar la revisión de prácticas circulares, se incorporó un análisis exploratorio de los títulos de los artículos seleccionados. Este procedimiento se orientó a reconocer los conceptos más recurrentes y las posibles líneas de investigación predominantes en cada tecnología. Para ello, los títulos fueron recopilados y organizados en conjuntos independientes para energía solar fotovoltaica y energía eólica. Posteriormente, se realizó una exploración de las palabras y expresiones relacionadas con las prácticas circulares, considerando conceptos como reciclaje, recuperación de materiales, residuos, análisis de ciclo de vida, reutilización y sostenibilidad.

Como recursos de visualización se emplearon nubes de palabras y gráficas de frecuencia de términos. Las nubes de palabras facilitaron la identificación visual de conceptos recurrentes, mientras que las gráficas permitieron observar su frecuencia relativa dentro de cada conjunto de títulos. Este análisis se consideró complementario y exploratorio, debido a que la presencia de una palabra en el título de una publicación no necesariamente representa la totalidad de sus objetivos, métodos o resultados. Por lo tanto, la interpretación de las tendencias se contrastó con las prácticas identificadas en la revisión de literatura, evitando utilizar las frecuencias de términos como una medida directa de la efectividad de las estrategias circulares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Investigación sobre energía solar fotovoltaica

El análisis bibliométrico original de los 112 artículos fotovoltaicos muestra una actividad científica importante durante el periodo 2022–2026 (Figura 1). En 2022 se identificaron 17 publicaciones, mientras que en 2025 se registró el mayor número de estudios, con 36 artículos. Para 2026 se contabilizaron 24 publicaciones en el conjunto analizado.

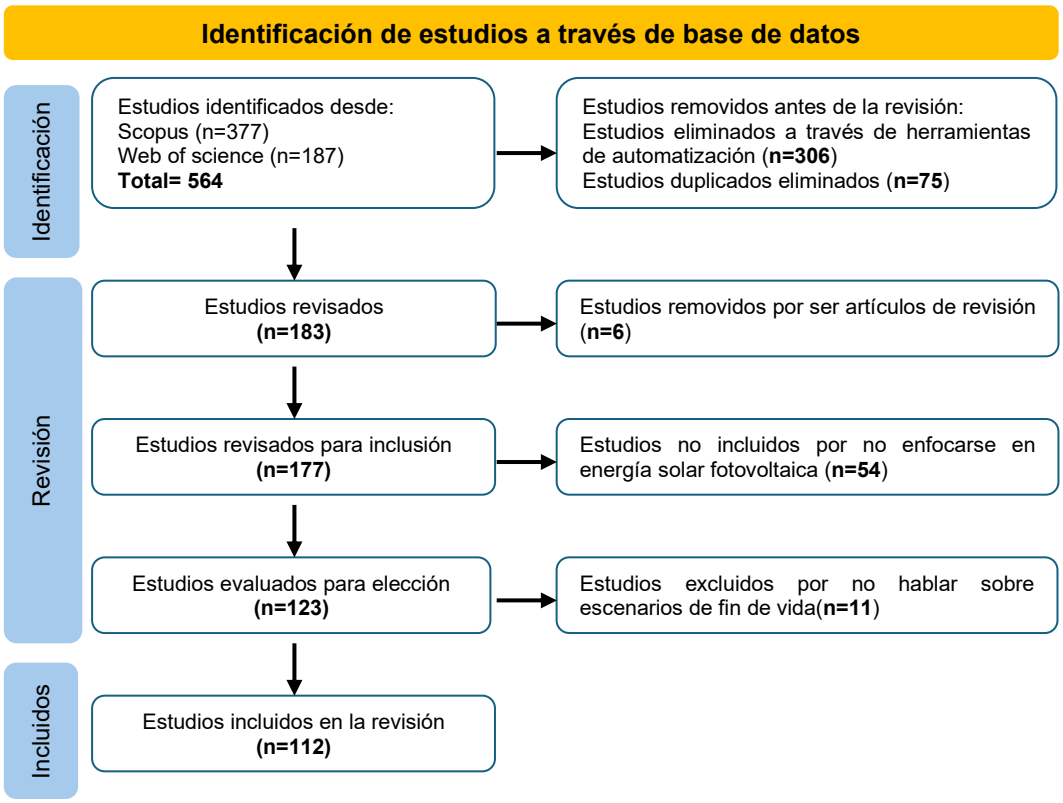
Este comportamiento refleja una mayor presencia de investigaciones recientes sobre reciclaje, recuperación de materiales y gestión circular de módulos solares. No obstante, debido a que la búsqueda se realizó en abril de 2026, los datos de ese año representan únicamente una parte del periodo anual y no permiten determinar una disminución de la actividad científica.

Entre las principales revistas identificadas destacan Journal of Cleaner Production, con 8 publicaciones; Solar Energy Materials and Solar Cells, con 7; y Resources, Conservation and Recycling, con 6. Estas fuentes reúnen investigaciones relacionadas con procesos de reciclaje, evaluación ambiental, materiales y sostenibilidad.

Respecto a la distribución geográfica, China presentó el mayor número de publicaciones según el país del autor de correspondencia, con 32 artículos, seguida de Estados Unidos con diez y Australia con nueve. También se identificaron contribuciones de otros países, incluidos India, Brasil y México (Figura 2).

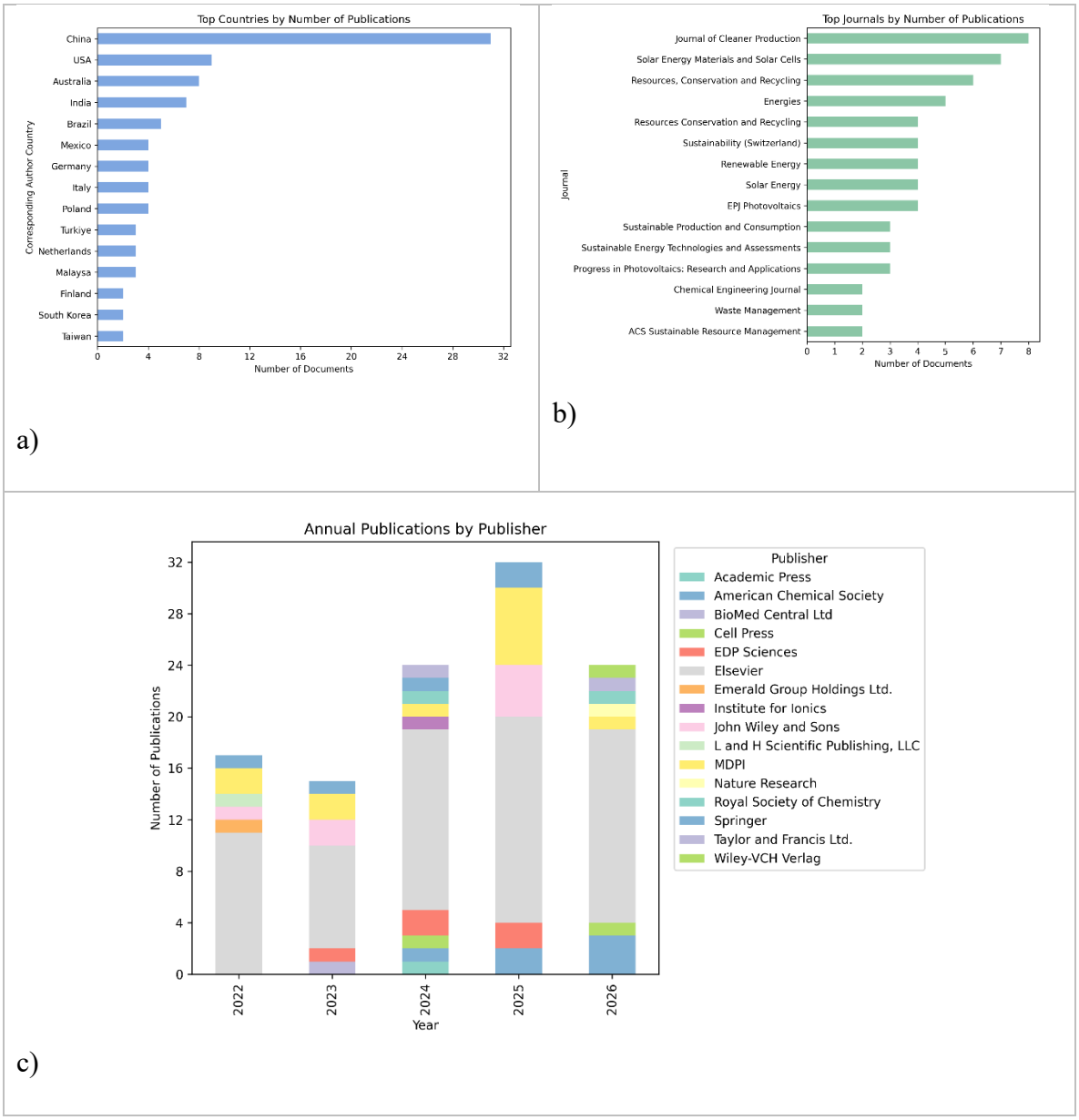
Esta distribución evidencia la participación de diferentes regiones en la investigación sobre circularidad fotovoltaica. Sin embargo, el número de publicaciones no debe interpretarse por sí solo como una medida del grado de implementación industrial de estas tecnologías.

Figura 1. Identificación de artículos de economía circular en sistemas fotovoltaicos a través de PRISMA



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Panorama bibliométrico de la investigación sobre economía circular en energía fotovoltaica. (a) producción de publicaciones por país del autor correspondiente; (b) número de estudios publicados por revista académica; (c) distribución anual de publicaciones por editor. Nota: el número total de artículos no se muestra en los gráficos, ya que se omitieron valores insignificantes para mejorar la claridad y la legibilidad.



Fuente: elaboración propia.

Investigación sobre energía eólica

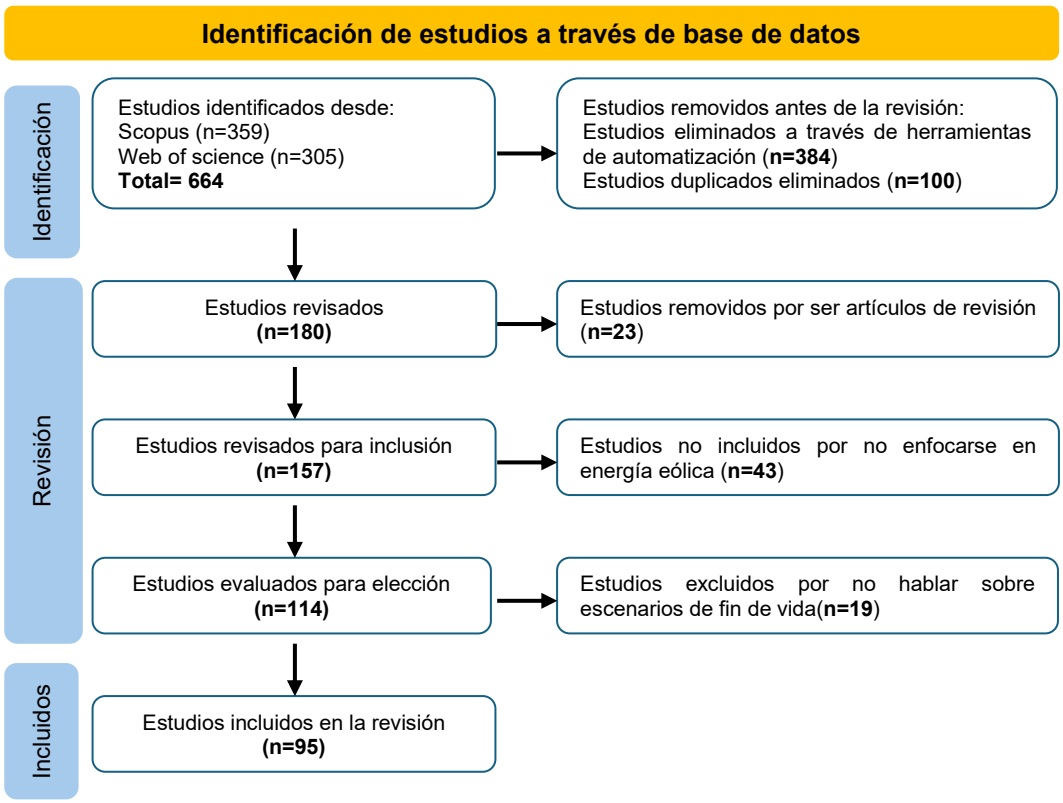
En energía eólica, el análisis bibliométrico original comprendió 95 publicaciones seleccionadas mediante PRISMA (Figura 3). Se identificaron 18 artículos en 2022, 2023 en 2024 y un máximo de 31 publicaciones en 2025. Los resultados muestran una presencia importante de

investigaciones recientes relacionadas con el reciclaje de palas, la recuperación de materiales compuestos y la evaluación de alternativas para gestionar componentes eólicos al finalizar su vida útil.

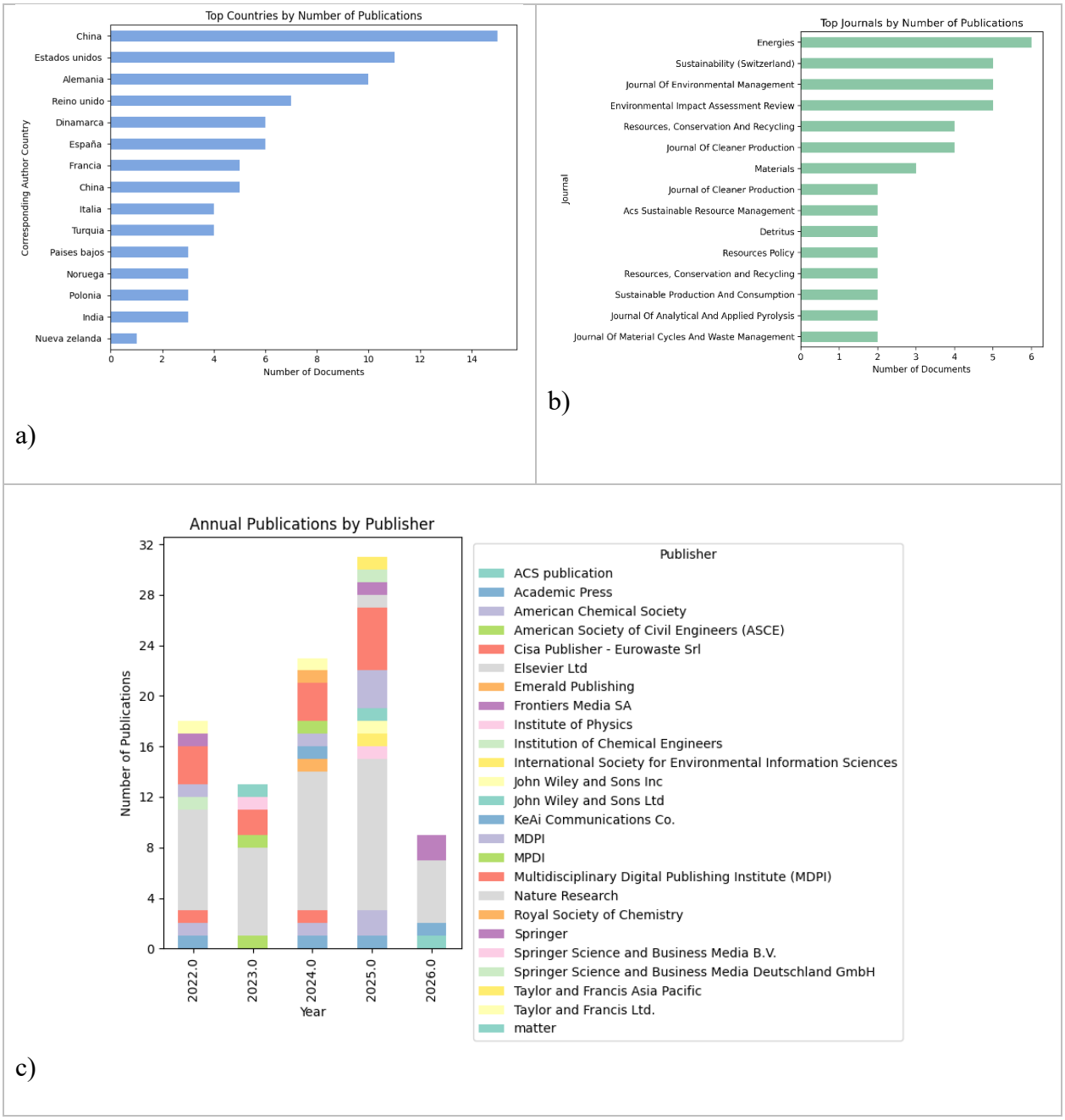
Las revistas con mayor representación fueron Resources, Conservation and Recycling, con ocho publicaciones; Sustainability, con siete; y Energies, con seis. Asimismo, las editoriales Elsevier, MDPI y Springer concentraron una parte destacada de la producción científica analizada (Figura 4). La diversidad de fuentes de publicación refleja el carácter multidisciplinario de la economía circular en energía eólica, donde convergen investigaciones sobre materiales, procesos industriales, evaluación ambiental y gestión de residuos.

En conjunto, los resultados bibliométricos de ambas tecnologías muestran que la gestión circular de los sistemas renovables constituye un campo de investigación activo, particularmente en relación con el tratamiento de componentes al final de su vida útil. Aquí se presentan y analizan los datos relevantes, justificando las conclusiones. No se deben incluir datos individuales en bruto, excepto en estudios de caso. Se suele utilizar estadística descriptiva y/o inferencial, o incluir datos en tablas o figuras cuando es necesario.

Figura 3. Identificación de artículos de economía circular en sistemas fotovoltaicos a través de PRISMA



Fuente: elaboración propia.***Figura 4.*** Análisis bibliométrico de la investigación sobre el reciclaje de sistemas de energía eólica: (a) producción científica por país del autor de correspondencia; (b) cantidad de estudios publicados por revista académica; y (c) distribución anual de publicaciones según la editorial. Nota: en las gráficas no se presenta el total de artículos, debido a que los valores con baja representatividad fueron omitidos para facilitar una mejor claridad e interpretación visual.



Fuente: elaboración propia.

Tendencias temáticas de investigación

El análisis de los títulos de los artículos seleccionados mediante la metodología PRISMA permitió identificar varias líneas temáticas relacionadas con la economía circular en los sistemas solares fotovoltaicos durante el periodo 2022–2026 (Figura 5). Entre los términos más frecuentes destacan photovoltaic, life, cycle, assessment y recycling, lo que refleja la importancia de estudiar tanto el desempeño ambiental de esta tecnología como las alternativas para gestionar sus componentes al final de su vida útil.

Una de las líneas más representativas es la evaluación del ciclo de vida, asociada con los términos life, cycle y assessment. Estos conceptos aparecen de manera recurrente en los resultados de distintos años y permiten identificar el interés por analizar los impactos ambientales de los sistemas fotovoltaicos a lo largo de sus diferentes etapas. Este tipo de evaluación resulta relevante para comprender que la sostenibilidad de la energía solar no depende únicamente de la electricidad que genera, sino también de los recursos, materiales y procesos involucrados en la fabricación, utilización y disposición de sus componentes.

Otra línea destacada corresponde al reciclaje y la gestión de los módulos fotovoltaicos. El término recycling aparece en 5 artículos de 2022, 3 de 2023, 7 de 2024, 11 de 2025 y 11 de 2026 dentro del conjunto analizado. Asimismo, se identificaron expresiones como end of life, waste, module y panel, relacionadas con la gestión de los equipos que han llegado al final de su vida útil. Estos resultados muestran que el tratamiento de los residuos fotovoltaicos constituye un tema recurrente en la literatura revisada y subrayan la importancia de desarrollar alternativas que permitan aprovechar los componentes de los paneles retirados, en lugar de considerarlos únicamente como desechos.

La recuperación y valorización de materiales constituye otra dimensión relevante. La presencia de términos como silicon, material, recovery y glass indica que parte de la literatura aborda los materiales que integran los módulos y las posibilidades de recuperarlos mediante diferentes procesos. Esta línea es importante para la economía circular porque busca mantener los materiales en uso, reducir la pérdida de recursos y favorecer su reincorporación a nuevos procesos productivos. Además, en los títulos correspondientes a 2026 aparecen términos como reuse y upcycling, que sugieren interés en alternativas de reutilización y aprovechamiento de componentes con valor potencial.

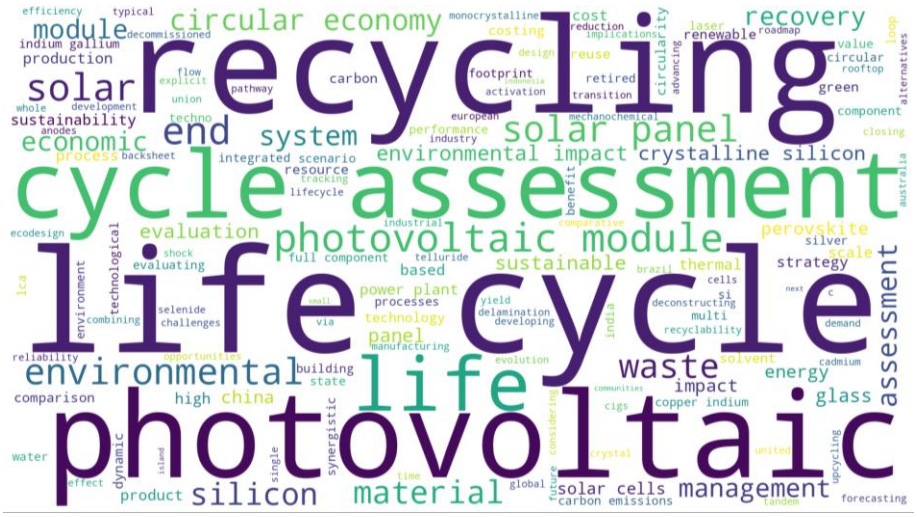
Los resultados también muestran la presencia de investigaciones relacionadas con la sostenibilidad y los impactos ambientales. La frecuencia de palabras como environmental,

impact, sustainability y carbon evidencia que la evaluación ambiental continúa formando parte de los temas abordados por los artículos seleccionados. En conjunto con los estudios sobre el ciclo de vida, estos conceptos permiten situar la economía circular dentro de una perspectiva más amplia, que considera no solo la generación de energía renovable, sino también el uso eficiente de los recursos y la gestión de los materiales a lo largo de su trayectoria.

Al comparar los resultados por año, se observa que el reciclaje, la evaluación del ciclo de vida y los componentes fotovoltaicos aparecen de forma recurrente durante el periodo estudiado. En los registros de 2025 y 2026 también se identifican términos vinculados con la reutilización, la recuperación de materiales y procesos específicos de tratamiento. Sin embargo, estas diferencias deben interpretarse con cautela, ya que el número de artículos disponibles puede variar entre años y el periodo de 2026 todavía está en curso. Por ello, las frecuencias permiten reconocer temas presentes en la literatura, pero no son suficientes por sí solas para confirmar un crecimiento sostenido o la aparición de nuevas tendencias.

En conjunto, los resultados sugieren que la economía circular aplicada a la energía solar fotovoltaica se articula alrededor de tres grandes cuestiones: evaluar los impactos ambientales de los sistemas, gestionar los módulos al final de su vida útil y recuperar materiales que puedan conservar su valor. Estas líneas reflejan la importancia de complementar la transición hacia las energías renovables con estrategias que consideren todo el ciclo de vida de los equipos y contribuyan a un aprovechamiento más eficiente de los recursos.

Figura 5. Tendencias sobre artículos de economía circular en energía solar fotovoltaica 2022-2026. (a) Diagrama de nubes sobre análisis de títulos de artículos, (b) esquema de tendencias de investigación a lo largo del tiempo.



a)

b)

Fuente: elaboración propia.

Así mismo al analizar las principales líneas de investigación sobre economía circular en la energía eólica durante el periodo 2022–2026, entre los términos más frecuentes destacan wind, turbine, blade, assessment, life, cycle y recycling, lo que refleja el interés por evaluar los impactos ambientales de esta tecnología y desarrollar alternativas para el aprovechamiento de sus componentes al final de su vida útil.

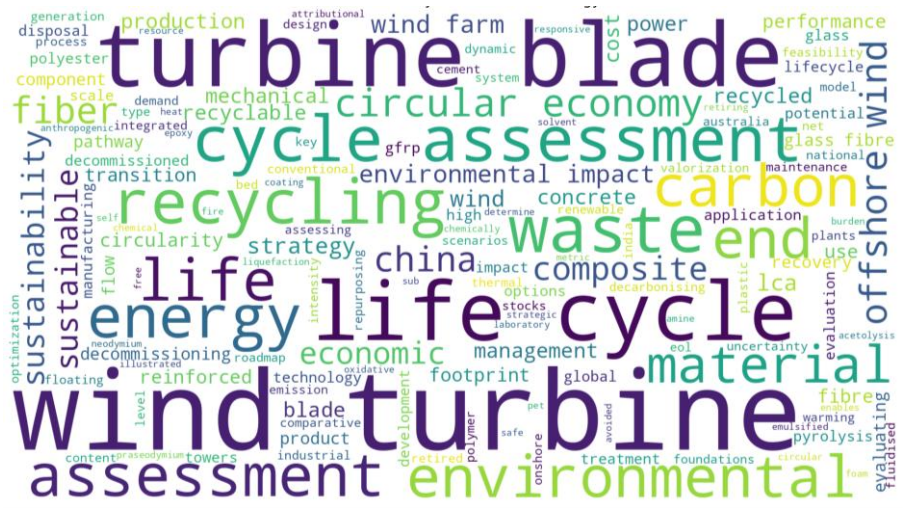
Una de las líneas más relevantes es la evaluación del ciclo de vida, enfocada en analizar los impactos ambientales asociados con la fabricación, operación y disposición de los

aerogeneradores. Asimismo, destaca el reciclaje de las palas eólicas, cuyos materiales compuestos, como las fibras de vidrio y las resinas, representan desafíos para su recuperación y aprovechamiento. La presencia de términos como waste, end-of-life, glass, fiber y recovery evidencia la atención que reciben la gestión de residuos y la recuperación de materiales dentro de la literatura analizada.

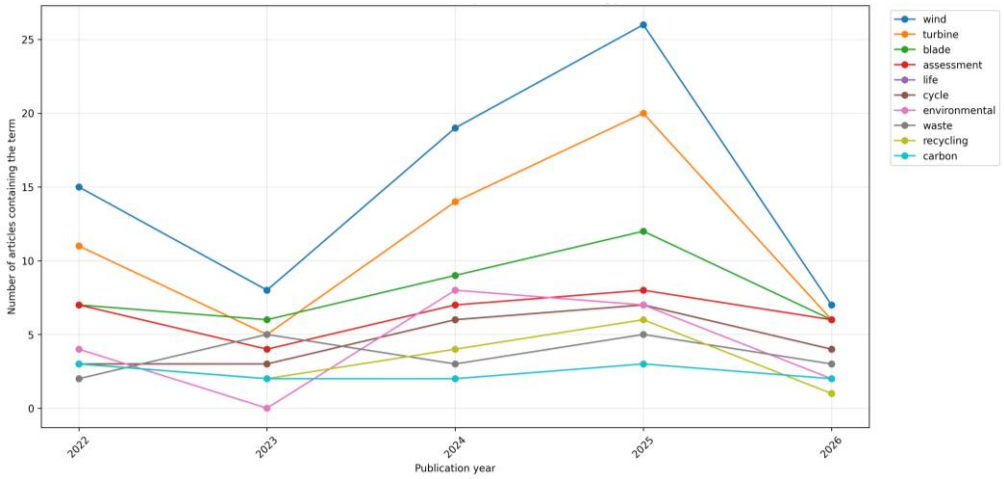
En cuanto a la evolución temporal, el término recycling aparece en 3 artículos de 2022, 2 de 2023, 4 de 2024, 6 de 2025 y 1 de 2026. Además, en 2025 se registra una mayor presencia de términos relacionados con las palas eólicas, la evaluación ambiental y la economía circular. También se identifican conceptos como repurposing, pyrolysis, decommissioning y recycled, que reflejan la diversidad de alternativas investigadas para gestionar los componentes retirados y reincorporar materiales a nuevos procesos productivos. Estas variaciones deben interpretarse considerando las diferencias en el número de artículos por año y que 2026 aún no ha concluido.

En conjunto, los resultados muestran que la investigación sobre economía circular en energía eólica se concentra principalmente en la evaluación de impactos ambientales, el reciclaje de palas y la recuperación y reutilización de materiales. Estos hallazgos resaltan la importancia de desarrollar estrategias que permitan reducir los residuos, aprovechar los recursos y mejorar la sostenibilidad de los sistemas eólicos a lo largo de su ciclo de vida.

Figura 6. Tendencias sobre artículos de economía circular en energía eólica 2022-2026. (a) Diagrama de nubes sobre análisis de títulos de artículos, (b) esquema de tendencias de investigación a lo largo del tiempo.



a)



b)

Fuente: elaboración propia.

Prácticas de economía circular en el sector fotovoltaico

La revisión de la literatura científica permite identificar diversas prácticas de economía circular en la industria solar fotovoltaica, que comprenden desde el diseño sostenible de los módulos hasta la implementación de tecnologías para recuperar materiales y mejorar la gestión de las cadenas de suministro (ver Tabla 1). Entre estas estrategias, el ecodiseño basado en criterios de modularidad y facilidad de reparación contribuye a prolongar la vida útil de los equipos, simplificar la sustitución de componentes y favorecer su aceptación en el mercado (Sahajwalla & Hossain, 2023). En cuanto al tratamiento de los módulos desechados, los métodos de reciclaje mecánico, térmico y químico ofrecen alternativas para recuperar materiales de valor. Particularmente, los procesos térmicos permiten retirar el encapsulante de etileno-acetato de vinilo (EVA) y facilitar la separación de metales, mientras que Europa destaca por el desarrollo de políticas orientadas a la gestión de residuos fotovoltaicos (Sivagami et al., 2024).

Desde una perspectiva ambiental, las investigaciones que emplean la evaluación del ciclo de vida señalan que el reciclaje puede contribuir a disminuir la presión sobre los recursos minerales. No obstante, en contextos como el mexicano, las actividades de transporte siguen representando una fuente importante de impactos ambientales (Daniela-Abigail et al., 2024). Paralelamente, la aplicación de estrategias 6R y modelos de programación lineal entera mixta (MILP) plantea oportunidades para mejorar la organización de las cadenas de suministro circulares, optimizar la logística y limitar la disposición de residuos en vertederos (Piedrahita et al., 2025; Yusianda, 2025).

Por otra parte, el aprovechamiento de materiales como vidrio, aluminio, silicio y plata constituye una alternativa para reducir la generación de residuos y recuperar valor económico. En Chile, por ejemplo, se ha estimado el potencial económico asociado con la recuperación de materiales procedentes de paneles fotovoltaicos que han alcanzado el final de su vida útil (Khalifa et al., 2022; S. Ozturk, 2025). A estas alternativas se suman tecnologías innovadoras, entre ellas la delaminación mecánica de módulos con PDMS y la lixiviación mediante solventes eutécticos profundos, cuyos resultados muestran eficiencias elevadas en la recuperación y reutilización de materiales, además de posibles beneficios en la reducción de la huella de carbono (Poulek et al., 2025).

Finalmente, la valorización de residuos fotovoltaicos mediante su incorporación a materiales de construcción, junto con el desarrollo de sistemas agrivoltaicos, amplía las posibilidades de aplicación de principios de economía circular en el sector. Sin embargo, para aprovechar estas oportunidades todavía es necesario superar limitaciones relacionadas con la gestión de los equipos al final de su vida útil y la disponibilidad de infraestructura especializada para su reciclaje (Krexner et al., 2025; Bulińska et al., 2025; Espinosa et al., 2026).

Tabla 1. Prácticas de economía circular en energía solar fotovoltaica.

PRÁCTICA DE ECONOMÍA CIRCULAR	***METODOLOGÍA/ TRATAMIENTO***	***HALLAZGOS***	***REFERENCIA***
Ecodiseño y Modularidad	Revisión de aspectos técnicos bajo un enfoque orientado al producto.	El diseño modular favorece el acceso a los componentes y facilita su sustitución, contribuyendo a extender la vida útil de los productos y promover su aceptación entre los consumidores.	Sahajwalla & Hossain (2023)
Reciclaje Mecánico, Térmico y Químico	Revisión sistemática de procedimientos de separación y recuperación de materiales.	La recuperación de metales de interés requiere la combinación de procesos químicos y tratamientos térmicos de entre 500 y 600 °C para retirar el encapsulante EVA. En materia normativa, Europa sobresale por sus políticas de gestión de residuos fotovoltaicos.	Sivagami et al. (2024)
Gestión de fin de vida y transporte	Análisis de ciclo de vida (ACV) mediante ReCiPe 2016,	La implementación del reciclaje puede disminuir hasta un 89 % el impacto	Daniela-Abigail et al. (2024).

	conforme a ISO 14044.	asociado con la escasez de recursos minerales. En México, el transporte representa aproximadamente el 15 % del impacto en la categoría de protección de recursos.	
Estrategias 6R (Reciclar, Recuperar, Reducir, Reutilizar, Reparar, Refinar)	Evaluación de la cadena de suministro.	Se reconocen limitaciones de infraestructura en regiones de Latinoamérica y Asia. La incorporación de las estrategias 6R se plantea como una alternativa para aprovechar mejor los recursos y disminuir el envío de residuos a vertederos.	Piedrahita et al., (2025).
Circularidad de Vidrio y Aluminio	Modelación dinámica de flujos de materiales fotovoltaicos (PV-DMFA)	La aplicación de medidas circulares, acompañada de mejoras en la confiabilidad de los sistemas, podría disminuir hasta un 50 % la intensidad de uso de materiales y la generación de residuos en Estados Unidos hacia 2100.	Khalifa et al. (2022).
Potencial de Recuperación Económica	Cuantificación de inventarios y estimación del valor comercial de los materiales recuperables.	Para Chile se estima una disponibilidad potencial de 235 000 toneladas de materiales aprovechables, equivalentes a 781 millones de dólares. La plata destaca como el material de mayor contribución económica individual, con un valor estimado de 379 millones de dólares.	Ozturk (2025).
Reciclaje de Paneles	Separación mecánica de capas a temperatura ambiente.	El empleo de cuñas de polietileno permite alcanzar eficiencias de separación del 95–98 % y recuperar para reutilización directa aproximadamente el 81 % de la masa del panel, con una reducción considerable de la huella de CO_2.	Poulek et al. (2025).
Índice de Reciclabilidad (Ecodiseño)	Evaluación multicriterio basada en el diseño para el reciclaje (DfR).	Se desarrolla un indicador de reciclabilidad orientado a respaldar políticas de la Unión Europea,	Espinosa et al. (2026).

		considerando la importancia ambiental y el valor de componentes como vidrio, aluminio, silicio y plata.	
Agrivoltaica (APV) y EoL	Evaluación prospectiva del ciclo de vida.	La integración de actividades agrícolas y generación fotovoltaica constituye una alternativa para optimizar el aprovechamiento del suelo. Sin embargo, requiere estrategias específicas para gestionar los equipos retirados y prevenir posibles efectos contaminantes.	Krexner et al. (2025).
Uso de Vidrio en Construcción	Caracterización de propiedades mecánicas y térmicas.	La incorporación de vidrio recuperado de módulos fotovoltaicos en mezclas cementicias puede favorecer la durabilidad y el aislamiento de los materiales, además de contribuir a disminuir las emisiones de carbono vinculadas con la construcción.	Bulińska et al. (2025).
Optimización MILP	Modelación matemática con programación lineal entera mixta.	Se propone un esquema de planificación para cadenas de suministro de ciclo cerrado, que permite determinar ubicaciones estratégicas de instalaciones, reducir gastos logísticos y aumentar los ingresos derivados de la recuperación de recursos.	Yusianda, T. U. (2025).

Fuente: elaboración propia.

Prácticas de economía circular en energía eólica

La Tabla 2 sintetiza distintas estrategias de economía circular destinadas a gestionar y valorizar los residuos de palas de aerogeneradores una vez concluida su vida útil. Los estudios revisados presentan diversas alternativas para disminuir los efectos ambientales derivados de la disposición de los materiales compuestos empleados en la industria eólica. Entre las opciones más relevantes se encuentran el reciclaje mecánico, químico y térmico, el coprocesamiento en

hornos cementeros, la reutilización de componentes con fines estructurales y el aprovechamiento de materiales reciclados en aplicaciones de ingeniería civil mediante procesos de upcycling.

En este contexto, varios estudios identifican el coprocesamiento en la industria del cemento como una alternativa prometedora para tratar cantidades importantes de residuos, debido a la capacidad de procesamiento de estas instalaciones y a sus posibles beneficios ambientales (Paulsen & Enevoldsen, 2021). De manera complementaria, la reutilización estructural y las estrategias dirigidas a prolongar la vida útil de las palas pueden ofrecer ventajas técnicas y ambientales frente a determinados métodos tradicionales de reciclaje (Mishnaevsky Jr, 2021).

Por su parte, las investigaciones sobre reciclaje químico y solvólisis destacan el potencial de estos procedimientos para recuperar materiales y reducir las emisiones de carbono, favoreciendo la implementación de sistemas circulares de ciclo cerrado (Muzyka et al., 2024; Shen et al., 2023). Asimismo, la incorporación de materiales reciclados y fibras naturales representa una oportunidad para reducir la huella ambiental de los sistemas eólicos y limitar la cantidad de residuos destinados a vertederos (Farazmandnia & Ilinca, 2025; Pender et al., 2024).

En conjunto, los estudios muestran que la gestión de las palas eólicas fuera de servicio no depende de una única alternativa aplicable a todos los casos. Por el contrario, avanzar hacia una economía circular en este sector requiere combinar diferentes soluciones, considerando la viabilidad tecnológica, el desempeño ambiental y el desarrollo de políticas orientadas a la sostenibilidad (Cieślewicz et al., 2025).

Tabla 2. Estrategias de economía circular en energía eólica.

PRÁCTICA DE ECONOMÍA CIRCULAR	***METODOLOGÍA/ TRATAMIENTO***	***HALLAZGOS***	***REFERENCIA***
Estrategias integradas para el fin de vida	Análisis sistémico de alternativas para la etapa final de las palas: prolongación de su vida útil, suprarreciclaje y tecnologías avanzadas de reciclaje.	No existe una solución universal. La selección exige estrategias adaptadas a cada caso, investigación interdisciplinaria y apoyo de políticas públicas.	Cieślewicz et al. (2025)
Recuperación de fibra de vidrio para cemento	Análisis de la gestión de palas fuera de servicio, considerando la	El reciclaje puede contribuir a reducir el impacto ambiental de	Bulińska et al. (2024)

	recuperación de vidrio y fibras como materias primas secundarias para fabricar cemento.	estos residuos y a promover prácticas alineadas con la sostenibilidad ecológica.	
Evaluación multidimensional del reciclaje	Clasificación de las opciones según capacidad de procesamiento, costo, impacto ambiental y nivel de madurez tecnológica (TRL).	El estudio identifica el coprocesamiento en la industria cementera como la opción económica capaz de gestionar grandes volúmenes de residuos en el contexto analizado.	Paulsen y Enevoldsen (2021)
Enfoques preventivos y correctivos	Revisión de mantenimiento, reparación, reutilización, rediseño y materiales alternativos, incluidos termoplásticos y fibras naturales.	La reparación, reutilización y extensión de la vida útil de las palas pueden presentar ventajas frente a algunas alternativas de reciclaje disponibles.	Mishnaevsky (2021)
Reutilización en aplicaciones estructurales	Análisis de ciclo de vida (ACV) de 47 diseños de productos del proyecto Re-Wind, incluidas aplicaciones que sustituyen elementos de acero y concreto.	La sustitución de productos de acero muestra el mayor beneficio entre las opciones evaluadas; se estiman 342 kg de CO_2 equivalente evitados por tonelada de residuo de pala.	Nagle (2022)
Indicadores de sostenibilidad	Análisis de decisión multicriterio (MCDA) basado en 11 métricas relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.	La construcción de puentes se clasifica como la alternativa más sostenible, seguida por la fabricación de muebles.	Deeney (2021)
Reciclaje químico avanzado	Pruebas de solvólisis y licuefacción oxidativa realizadas a temperaturas de entre 100 y 350 °C.	La licuefacción oxidativa alcanzó una degradación total del polímero (TPD) de entre 72 % y 100 % en las palas evaluadas.	Muzyka et al. (2024)
Reciclaje mecánico para barras de refuerzo	Evaluación del reciclaje mecánico para sustituir barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) virgen.	Un kilogramo de barras recicladas sustituye 0,98 kg de material virgen, evita 2,4 kg de CO_2 y cuesta menos que las tarifas de vertedero.	Zhang et al. (2025)

Gestión del ciclo de vida	Revisión de métodos basados en las 3R, con atención especial a la solvólisis como vía de recuperación en circuito cerrado.	La solvólisis se plantea como una opción de alta circularidad y bajas emisiones, condicionada al desarrollo de disolventes más sostenibles.	Shen et al. (2023)
Resinas termoplásticas reciclables	Análisis de ciclo de vida que compara resinas termoestables convencionales con Elium.	Según el estudio, las palas fabricadas con Elium reducen la energía incorporada en 22,5 % y la huella de carbono en 16 %.	Farazmandnia y Ilinca (2025)
Suprarreciclaje en ingeniería civil	Exploración de técnicas para usar residuos en agregados ligeros de concreto y como refuerzo en pavimentos asfálticos.	Estas aplicaciones pueden reducir la dependencia de los vertederos y las emisiones asociadas a materiales convencionales de construcción.	Yu et al. (2025)
Reciclaje en circuito cerrado	Análisis de ciclo de vida de productos de fibra de vidrio y termoplásticos (PMMA) obtenidos de residuos de palas.	Se reportan reducciones del potencial de calentamiento global de hasta 54 % en la producción de termoplásticos y 26 % en la de vidrio.	Pender (2026)
Fibras naturales y coprocesamiento	Evaluación de fibras de lino, cáñamo y basalto mediante optimización aeroelástica y análisis de ciclo de vida.	El uso de fibras naturales puede reducir entre 6 % y 8 % el potencial de cambio climático en la etapa de la cuna a la puerta.	Pender (2024)
Comparación europea de coprocesamiento	Análisis de ciclo de vida que compara incineración y coprocesamiento en Alemania, España, Italia y los Países Bajos.	El coprocesamiento se presenta como favorable en todas las categorías evaluadas por la conservación de materias primas; la incineración se asocia con impactos ambientales negativos.	Biblioteca et al. (2026)

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

La transición hacia las energías renovables representa una oportunidad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles. Sin embargo, los resultados de esta investigación evidencian que la sostenibilidad de las tecnologías solar fotovoltaica y eólica no depende únicamente de su capacidad para generar electricidad limpia, sino también de la manera en que se gestionan los materiales y componentes a lo largo de su ciclo de vida, especialmente cuando dejan de utilizarse.

A partir de la revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2022 y 2026, se identificaron diversas prácticas de economía circular orientadas a reducir residuos, recuperar materiales y prolongar la utilidad de los componentes. Entre las principales estrategias destacan el reciclaje mecánico, térmico y químico, la reutilización, el ecodiseño y la valorización de residuos. Estas alternativas muestran que los materiales provenientes de las tecnologías renovables pueden representar recursos aprovechables en lugar de convertirse necesariamente en desechos.

Los resultados también permitieron reconocer diferencias importantes entre ambas tecnologías. En los sistemas solares fotovoltaicos, las investigaciones se concentran principalmente en la recuperación de materiales como silicio, vidrio, aluminio y plata, así como en el desarrollo de procesos que faciliten su separación y aprovechamiento. En contraste, en el sector eólico destaca el interés por el reciclaje de materiales compuestos, la recuperación de fibras y la reutilización de palas de aerogeneradores en aplicaciones estructurales y materiales de construcción. Estas diferencias evidencian que las estrategias circulares deben adaptarse a las características técnicas y materiales de cada tecnología.

Por otra parte, el análisis bibliométrico y la exploración temática permitieron identificar una actividad científica relevante en ambos sectores, particularmente en investigaciones relacionadas con reciclaje, recuperación de recursos y gestión del final de la vida útil. No obstante, la frecuencia de estos temas en las publicaciones no implica necesariamente que las soluciones propuestas hayan alcanzado una implementación industrial generalizada.

A pesar de los avances, persisten desafíos relacionados con los costos de procesamiento, la disponibilidad de infraestructura especializada, la eficiencia de los procesos de recuperación y los impactos ambientales asociados con las tecnologías de reciclaje. Asimismo, resulta

necesario fortalecer los marcos regulatorios, la planificación logística y la colaboración entre fabricantes, investigadores, empresas y autoridades para facilitar la incorporación de los materiales recuperados a nuevas cadenas productivas.

En este sentido, futuras investigaciones podrían profundizar en la evaluación ambiental y económica de las estrategias circulares, el desarrollo de materiales más fáciles de recuperar, la extensión de la vida útil de los componentes y la implementación de sistemas eficientes de recolección y tratamiento. También resulta relevante estudiar las condiciones necesarias para aplicar estas soluciones en contextos regionales como México, donde la expansión de las energías renovables plantea oportunidades para desarrollar infraestructura y capacidades de gestión circular.

En conclusión, la economía circular constituye un elemento fundamental para fortalecer la sostenibilidad de las energías solar fotovoltaica y eólica. Su aplicación requiere una visión integral que considere no solo la generación de energía, sino también el diseño, el aprovechamiento de recursos y la gestión responsable de los residuos. De esta manera, el verdadero potencial de las energías renovables podrá consolidarse mediante una transición energética que, además de producir electricidad con menores emisiones, promueva el uso eficiente de materiales y la reducción de impactos ambientales a largo plazo.

REFERENCIAS

Biblioteca, I., Tayebi, S. T., Pini, T., & Valente, M. (2026). Life-cycle assessment of wind turbine blade recycling strategies: Co-processing vs. incineration and landfilling. Sustainable Materials and Technologies, 48, e01925. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2026.e01925

Bulińska, S., Sujak, A., & Pyzalski, M. (2024). From waste to renewables: challenges and opportunities in recycling glass fibre composite products from wind turbine blades for sustainable cement production. Sustainability, 16(12), 5150. https://doi.org/10.3390/su16125150

Bulińska, S., Sujak, A., & Pyzalski, M. (2025). Sustainable management of photovoltaic waste through recycling and material use in the construction industry. Materials, 18(2), 284. https://doi.org/10.3390/ma18020284

Cieślewicz, N., Pilarski, K., & Pilarska, A. A. (2025). End-of-Life Strategies for Wind Turbines: Blade Recycling, Second-Life Applications, and Circular Economy Integration. Energies, 18(19), 5182. https://doi.org/10.3390/en18195182

Daniela-Abigail, H. L., Vega-De-Lille, M. I., Sacramento-Rivero, J. C., Ponce-Caballero, C., El-Mekaoui, A., & Navarro-Pineda, F. (2024). Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy. Renewable Energy Focus, 51, 100649.

Deeney, P., Nagle, A. J., Gough, F., & Lemmertz, H. (2021). End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices. Sustainability, 15(16). http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105642

Espinosa, N., et al. (2026). Advancing European Union Circular Economy in Product Policy Through a PV Recyclability Index. Advanced Energy Materials. https://doi.org/10.1002/aesr.202500310

Farazmandnia, N., & Ilinca, A. (2025). Recyclable wind turbine blades: A life cycle analysis. Materials, 18(16), 3762. https://doi.org/10.3390/ma18163762

Khalifa, S. A., Mastrorocco, B. V., Au, D. D., Ovaitt, S., Barnes, T. M., Carpenter, A. C., & Baxter, J. B. (2022). Dynamic material flow analysis of silicon photovoltaic modules to support a circular economy transition. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(7), 784-805. https://doi.org/10.1002/pip.3554

Krexner, T., et al. (2025). Comparison of four different end-of-life modelling approaches. https://doi.org/10.1007/s11367-025-02563-3

Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. Materials, 14(5), 1124. https://doi.org/10.3390/ma14051124

Muzyka, R., et al. (2024). Solvolysis and oxidative liquefaction of the end-of-life composite wastes as an element of the circular economy assumptions. Journal of Cleaner Production, 478, 143916. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143916

Nagle, A. J., Mullally, G., Leahy, P. G., & Dunphy, N. P. (2022). Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications. Journal of

environmental management, 302, 113994. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113994

Ozturk, S. (2025). Photovoltaic Waste Assessment and Recovery Potential. Sustainability, 17(19). https://doi.org/10.3390/su17198746

Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades. Energies, 14(14), 4247. https://doi.org/10.3390/en14144247

Pender, K., Bacharoudis, K., Romoli, F., Greaves, P., & Fuller, J. (2024). Feasibility of natural fibre usage for wind turbine blade components: a structural and environmental assessment. Sustainability, 16(13), 5533. https://doi.org/10.3390/su16135533

Pender, K., Romoli, F., & Fuller, J. (2026). Multi-lifecycle Assessment of Close-loop Recyclable Wind Turbine Blades. Materials Circular Economy, 8(1), 5. https://doi.org/10.1007/s42824-025-00211-7

Piedrahita, A., Cárdenas, L. M., & Zapata, S. (2025). Solar panel waste management: challenges, opportunities, and the path to a circular economy. Energies, 18(7), 1844. https://doi.org/10.3390/en18071844

Poulek, V., et al. (2025). Environmentally Sustainable Recycling of Photovoltaic Panels. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/18/8167.

Sahajwalla, V., & Hossain, R. (2023). Rethinking circular economy for electronics, energy storage, and solar photovoltaics with long product life cycles. Mrs Bulletin, 48(4), 375-385. https://doi.org/10.1557/s43577-023-00519-2

Shen, Y., Apraku, S. E., & Zhu, Y. (2023). Recycling and recovery of fiber-reinforced polymer composites for end-of-life wind turbine blade management. Green Chemistry, 25(23), 9644-9658. https://doi.org/10.1039/d3gc03479h

Sivagami, K., et al. (2024). Solar panel recycling from circular economy viewpoint: a review. Applied Solar Energy, 60(2), 328-345. https://doi.org/10.3103/S0003701X23601862

Yu, X., et al. (2025). Reuse of retired wind turbine blades in civil engineering. Buildings, 15(14), 2414. https://doi.org/10.3390/buildings15142414

Yusianda, T. U. (2025). Advancing Circular Economy in Solar Photovoltaic Waste Management (Tesis doctoral).

Zhang, Y., et al. (2025). Environmental and economic assessment of mechanical recycling of end-of-life wind turbine blades into rebars and comparison with conventional disposal routes. Composites Part A, 190, 108711. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108711

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.

: https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i6.411

Cómo citar este artículo (APA 7ª edición):
Torróntegui Chávez, G., Bustos Terrones , Y., & Salaiza Lizárraga, F. (2026). Economía Circular en Energías Solar Fotovoltaica y Eólica: Prácticas, Tendencias y Desafíos hacia la Sostenibilidad. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, *5*(6), 84-112. https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i6.411