

Artículo de Investigación

Economía Circular, Valorización de Residuos y Eco materiales: Estudios de caso en Bolivia.

Circular Economy, Waste Valorization and Eco materials: Case Studies from Bolivia.

Mónica Arzabe Aranibar¹, Ligia Jacqueline Aranibar Lafuente², José Omar Arzabe Maure^{3,*}

¹ University of Western Australia, Perth, Australia; monicarzabe@gmail.com; ORCID: 0009-0001-2031-916

² Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias y Tecnología; li.aranibar@umss.edu.bo

³ Universidad Mayor de San Simón, Departamento de Química, Centro de Investigación y Tecnología de Materiales, Cochabamba, Bolivia; o.arzabe@umss.edu; ORCID: 0000-0001-9792-5920

* Correspondencia: o.arzabe@umss.edu; Tel.: 591-79950871

Resumen

La transición hacia modelos productivos sostenibles requiere estrategias que reduzcan la generación de residuos, optimicen el uso de recursos y promuevan la valorización de materiales subutilizados. En este contexto, la Economía Circular (EC) impulsa el desarrollo de tecnologías orientadas al cierre de ciclos de materiales y a la transformación de residuos en recursos con valor agregado. El presente trabajo analiza investigaciones desarrolladas en el Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITEMA) relacionadas con la obtención de eco materiales a partir de residuos. La metodología consistió en la sistematización y evaluación comparativa de casos de estudio mediante criterios de EC, considerando recuperación de recursos, sustitución de materias primas, reducción de residuos, potencial de escalamiento y oportunidades de mercado. Los casos analizados incluyen la reutilización de arcillas agotadas y residuos minerales, el reciclaje de vidrio y el aprovechamiento de pseudotallos de plátano, escamas de paiche y aguas residuales porcinas. Los resultados evidencian que estos residuos pueden transformarse en materiales con aplicaciones en biomateriales y materiales avanzados (nano celulosa, colágeno e hidroxiapatita), agricultura sostenible (estruvita), industria cerámica (wollastonita) y productos de valor agregado derivados del vidrio reciclado. Se concluye que los eco materiales desarrollados presentan potencial para integrarse en cadenas de valor circulares, contribuyendo al aprovechamiento eficiente de recursos y a la sostenibilidad productiva.

Palabras clave: Economía Circular, Eco materiales, Valorización de residuos, Recuperación de recursos, Producción sostenible, Cadenas de valor circulares

Abstract

The transition toward sustainable production models require strategies that minimize waste generation, optimize resource use, and promote the valorization of underutilized materials. Within this context, the Circular Economy fosters the development of technologies aimed at closing material loops and transforming waste into

Editor Académico: Paul Maldonado Nogales

Recibido: 14 de julio de 2026

Revisado: 23 de agosto de 2026

Aceptado: 29 de septiembre de 2026

Publicado: 7 de Octubre de 2026

Cita: M. Arzabe Aranibar, L. J. Aranibar Lafuente, and J. O. Arzabe Maure, "Economía Circular, Valorización de Residuos y Eco Materiales: Estudios de Caso en Bolivia," *Andean Journal of Engineering Sciences*, vol. 1, no. 1, 2, 2026.

Derechos de autor: © 2026 por los autores. Enviado para posible publicación de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

value-added resources. This study analyzes research conducted at the Center for Research and Technology of Materials (CITEMA, acronym derived from its Spanish name, CITEMA) focused on the production of eco-materials from waste streams. The methodology consisted of the systematization and comparative evaluation of case studies using Circular Economy criteria, including resource recovery, substitution of virgin raw materials, waste reduction, scalability potential, and market opportunities. The analyzed cases include the reuse of spent clays and mineral residues, glass recycling, and the valorization of banana pseudo stems, paiche fish scales, and swine wastewater. The results demonstrate that these waste materials can be transformed into products with applications in biomaterials and advanced materials (Nano cellulose, collagen, and hydroxyapatite), sustainable agriculture (struvite), the ceramic industry (wollastonite), and value-added products derived from recycled glass. It is concluded that the eco-materials developed exhibit significant potential for integration into circular value chains, contributing to resource efficiency, waste reduction, and the advancement of sustainable production systems.

Keywords: Circular Economy, Eco-materials, Waste Valorization, Resource Recovery, Sustainable Production, Circular Value Chains.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, el modelo económico lineal basado en la extracción de recursos, producción, consumo y disposición final de residuos ha generado importantes impactos ambientales asociados al agotamiento de recursos naturales, la acumulación de desechos y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este modelo ha demostrado limitaciones significativas para responder a los desafíos ambientales y económicos actuales, especialmente en un contexto de creciente demanda de materias primas y presión sobre los ecosistemas [1].

Como respuesta a esta problemática surge la EC, un paradigma orientado a desacoplar el crecimiento económico del consumo intensivo de recursos mediante la reducción de residuos, la reutilización de materiales, la recuperación de recursos y la regeneración de los sistemas naturales. Actualmente, la EC es reconocida como una estrategia fundamental para avanzar hacia modelos de producción y consumo sostenibles, promoviendo la conservación del valor de productos, materiales y recursos durante el mayor tiempo posible [2].

La evolución conceptual de la EC ha permitido superar enfoques centrados exclusivamente en el reciclaje para incorporar estrategias integrales de valorización, reparación, remanufactura y recuperación de materiales. En este sentido, la valorización de residuos constituye uno de los pilares fundamentales de la transición hacia sistemas productivos sostenibles, permitiendo transformar corrientes residuales en nuevas materias primas, productos de alto valor agregado y fuentes alternativas de energía [3].

La literatura sobre EC señala que los sistemas circulares pueden estructurarse en dos grandes ciclos de materiales: el ciclo biológico y el ciclo técnico. El ciclo biológico comprende materiales biodegradables capaces de reincorporarse a los procesos naturales mediante mecanismos de regeneración, compostaje o aprovechamiento biológico. Por su parte, el ciclo técnico incluye materiales no biodegradables que pueden mantenerse dentro de los sistemas productivos a través de procesos de reutilización, reciclaje, reparación o remanufactura, reduciendo la necesidad de extraer nuevas materias primas [4].

Dentro de este contexto, los ecomateriales han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para incorporar criterios de sostenibilidad durante todo su ciclo de vida. Estos materiales no solamente consideran el origen de las materias primas empleadas, sino también aspectos relacionados con la eficiencia en el uso de recursos, la reducción de impactos ambientales, la minimización de residuos y su potencial reincorporación a nuevos ciclos productivos. El desarrollo de materiales sostenibles constituye actualmente una de las principales líneas de investigación para impulsar la transición hacia economías circulares [5].

Los avances recientes en ciencia e ingeniería de materiales han permitido el aprovechamiento de residuos industriales, agroindustriales y biológicos para la producción de materiales con aplicaciones en diversos sectores económicos. La utilización de residuos como materia prima secundaria no solamente contribuye a disminuir la presión sobre los recursos naturales, sino que también favorece la generación de nuevas cadenas de valor dentro de los principios de la EC [6].

En particular, la valorización de residuos agroindustriales ha mostrado un notable crecimiento debido a la posibilidad de obtener productos de alto valor agregado como biopolímeros, nanocelulosa, fertilizantes sostenibles, biomateriales y compuestos funcionales. Estudios recientes destacan que la multi valorización de residuos permite maximizar la recuperación de recursos y mejorar simultáneamente la rentabilidad económica y ambiental de los procesos de aprovechamiento [7], [8].

Entre las aplicaciones emergentes de la EC destacan la recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita a partir de aguas residuales, considerada una de las estrategias más prometedoras para cerrar los ciclos de fósforo y nitrógeno dentro de sistemas agroalimentarios sostenibles. Asimismo, la obtención de hidroxiapatita y colágeno a partir de residuos pesqueros ha demostrado un elevado potencial para aplicaciones biomédicas, permitiendo transformar residuos biológicos en biomateriales con alto valor económico y tecnológico [9], [10], [11].

Por otra parte, la reutilización de residuos minerales e industriales para la síntesis de materiales avanzados representa una alternativa viable para reducir la extracción de recursos naturales y disminuir los impactos ambientales asociados a los procesos productivos convencionales. Materiales como la wollastonita sintética, obtenida a partir de residuos industriales ricos en calcio y sílice, así como los productos cerámicos derivados de materiales reciclados, constituyen ejemplos representativos de la aplicación de los principios de circularidad en la ingeniería de materiales [6].

A pesar del creciente número de investigaciones relacionadas con la valorización de residuos y el desarrollo de ecomateriales, gran parte de los estudios reportan casos individuales o tecnologías específicas. En consecuencia, existe una limitada integración comparativa entre diferentes estrategias de EC que permita evaluar simultáneamente el potencial de residuos biológicos e industriales para la generación de materiales sostenibles. Esta situación es particularmente evidente en América Latina, donde aún son escasos los estudios que analizan de manera integral las contribuciones de diversos ecomateriales al fortalecimiento de modelos productivos circulares.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar comparativamente seis investigaciones de valorización de residuos desarrolladas en el CITEMA de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), considerando su contribución potencial a la recuperación de recursos, sustitución de materias primas, desarrollo de ecomateriales, escalabilidad y generación de valor dentro de cadenas circulares.

2. Materiales y Métodos

2.1 Diseño de la investigación

La presente investigación corresponde a un estudio descriptivo-comparativo basado en la sistematización y análisis de casos de estudio relacionados con la valorización de residuos y el desarrollo de ecomateriales. Este tipo de enfoque resulta particularmente adecuado para evaluar experiencias de investigación y desarrollo tecnológico que involucran diferentes materiales, procesos y estrategias de EC, permitiendo identificar patrones comunes, oportunidades de escalamiento y contribuciones potenciales a la sostenibilidad industrial [12].

La metodología de sistematización constituye una herramienta ampliamente utilizada para organizar, reconstruir e interpretar experiencias de investigación, facilitando la generación de conocimiento a partir de procesos previamente desarrollados y documentados [13]. En el ámbito de la EC, este enfoque permite analizar de manera integral los mecanismos de recuperación de recursos, las estrategias de valorización implementadas y los beneficios potenciales derivados de la incorporación de residuos en nuevas cadenas productivas [14].

Asimismo, el análisis comparativo de casos constituye una metodología apropiada para examinar diferentes rutas tecnológicas de circularidad, identificar similitudes y diferencias entre los procesos de valorización y evaluar su contribución al cierre de ciclos de materiales y energía dentro de sistemas productivos sostenibles [15].

2.2 Selección de los casos de estudio

El estudio se desarrolló a partir de la sistematización de seis investigaciones ejecutadas en el CITEMA de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT) de la UMSS, Cochabamba, Bolivia.

La selección de los casos se realizó considerando criterios de relevancia científica, tecnológica y ambiental. Se incluyeron únicamente investigaciones que utilizaron residuos industriales, agroindustriales o biológicos como materia prima principal, incorporaron principios de EC mediante procesos de recuperación o valorización de residuos, dispusieron de información técnica sobre los procesos de transformación y caracterización de materiales, y presentaron potencial de aplicación industrial o generación de valor agregado.

Los casos seleccionados fueron los siguientes:

- Reutilización de arcillas agotadas provenientes del proceso de blanqueo de aceites vegetales [16].
- Obtención de nanocelulosa y almidón a partir de pseudotallos de plátano para la preparación de polímeros biodegradables [17].
- Producción de hidroxiapatita y colágeno a partir de escamas de paiche (*Arapaima gigas*) [18].
- Recuperación de estruvita a partir de aguas residuales provenientes de granjas porcinas [19].
- Síntesis de wollastonita utilizando tierras de diatomeas y polvo residual de mármol [20].
- Producción de mosaicos decorativos mediante reciclaje de vidrio [21].

La diversidad de los casos analizados permitió abarcar diferentes sectores productivos y distintos tipos de residuos, proporcionando una visión integral de las oportunidades de implementación de la EC mediante el desarrollo de ecomateriales.

2.3 Marco conceptual de evaluación basado en EC

La clasificación y evaluación de los casos de estudio se realizó utilizando como referencia el marco conceptual de la EC propuesto por la Fundación Ellen MacArthur [2], complementado con los enfoques teóricos desarrollados por Korhonen et al. [14], Geissdoerfer et al. [15] y Kirchherr et al. [22].

De acuerdo con estos enfoques, la EC busca mantener el valor de los materiales, productos y recursos durante el mayor tiempo posible dentro de los sistemas productivos mediante estrategias de reutilización, reciclaje, recuperación y regeneración. En consecuencia, cada caso fue analizado considerando su contribución a los ciclos biológicos y técnicos de la circularidad.

El ciclo biológico comprende materiales biodegradables capaces de reincorporarse a los ecosistemas mediante procesos naturales o biológicos, favoreciendo la regeneración de recursos y el aprovechamiento sostenible de biomasa residual. Por otra parte, el ciclo técnico incluye materiales que pueden mantenerse dentro de los sistemas productivos mediante procesos de reutilización, reciclaje, reparación o recuperación, reduciendo la extracción de recursos vírgenes y minimizando la generación de residuos [14], [15].

Adicionalmente, la identificación de las estrategias de circularidad implementadas en cada investigación se realizó tomando como referencia el marco de las estrategias R desarrollado por Potting et al. [23], el cual incluye acciones orientadas a reducir, reutilizar, reciclar, recuperar y revalorizar materiales dentro de las cadenas productivas.

Para los seis casos se empleó una correspondencia funcional con las estrategias pertinentes al alcance del estudio: reutilización para arcillas agotadas; reciclaje/recuperación de materiales para pseudotallo de plátano, escamas de paiche, tierras de diatomeas y mármol y vidrio reciclado; y recuperación de nutrientes para aguas residuales porcinas. Esta clasificación se utilizó como apoyo interpretativo y no como un indicador cuantitativo de circularidad.

2.4 Variables de análisis

Con el propósito de realizar una evaluación homogénea de los casos estudiados, se definieron variables de análisis relacionadas con la naturaleza de los residuos utilizados, los procesos de valorización implementados, los materiales obtenidos y sus potenciales beneficios ambientales y económicos.

La primera variable considerada fue el tipo de residuo empleado como materia prima secundaria, clasificándose en residuos industriales, agroindustriales, biológicos o urbanos. Esta clasificación permitió identificar el origen de los materiales y su posible contribución a la reducción de residuos en diferentes sectores productivos.

La segunda variable correspondió a la estrategia de valorización aplicada. Según Nesterov et al. [3], la valorización puede involucrar procesos de reciclaje, reutilización, recuperación de nutrientes, recuperación de materiales o síntesis de nuevos productos. Estas estrategias fueron identificadas para cada caso analizado.

La tercera variable fue el tipo de eco material generado, incluyendo biomateriales, fertilizantes sostenibles, materiales cerámicos, biopolímeros y materiales compuestos. Esta clasificación permitió evaluar la diversidad de aplicaciones derivadas de la valorización de residuos.

Asimismo, se consideró el beneficio ambiental potencial asociado a cada tecnología. Este criterio incluyó aspectos como la reducción de residuos enviados a disposición final, la disminución de la extracción de recursos naturales, la recuperación de nutrientes y la posible reducción de emisiones asociadas a procesos productivos convencionales [14].

Finalmente, se evaluó el potencial de valorización económica considerando la capacidad de los materiales obtenidos para incorporarse a mercados especializados o

sustituir materias primas convencionales. Para ello se empleó información reportada en literatura científica reciente y datos de mercado relacionados con hidroxiapatita, colágeno, estruvita, wollastonita, materiales cerámicos y biopolímeros [6].

2.5 Técnicas de caracterización de materiales

Los proyectos analizados emplearon diferentes metodologías de caracterización fisicoquímica, estructural y microestructural adaptadas a las características de cada material desarrollado.

Entre las principales técnicas utilizadas se encuentran la Difracción de Rayos X (DRX), empleada para la identificación de fases cristalinas y determinación de estructuras mineralógicas; la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), utilizada para evaluar la morfología superficial y microestructura de los materiales; el microanálisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS), utilizado para determinar la composición elemental y, cuando se acopla a MEB, referido como MEB-EDS; y la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (IRTF), aplicada para la identificación de grupos funcionales y enlaces químicos presentes en las muestras [24].

De manera complementaria, algunos estudios incorporaron análisis termogravimétricos (TGA), ensayos de biodegradabilidad, pruebas físicas y mecánicas, así como evaluaciones específicas relacionadas con las aplicaciones finales de los materiales desarrollados. Estas técnicas permitieron determinar la composición química, estabilidad térmica, propiedades estructurales y funcionalidad de los ecomateriales obtenidos, siguiendo procedimientos ampliamente aceptados en investigación de materiales avanzados, biomateriales y materiales sostenibles [5].

2.6 Análisis comparativo de la información

La información recopilada fue organizada en matrices comparativas que permitieron sistematizar los principales resultados obtenidos en cada investigación. Posteriormente, se realizó un análisis transversal considerando tres dimensiones fundamentales de la EC: la circularidad de los materiales, los beneficios ambientales derivados de la valorización de residuos y el potencial de generación de valor económico.

Este enfoque permitió identificar las contribuciones específicas de cada caso al cierre de ciclos de materiales, la recuperación de recursos y la generación de ecomateriales con potencial aplicación industrial. Asimismo, facilitó la comparación entre tecnologías basadas en residuos biológicos e industriales, proporcionando una visión integrada de las oportunidades que ofrece la EC para el desarrollo sostenible de materiales en contextos latinoamericanos.

3. Resultados

3.1 Clasificación de los casos de estudio dentro de los ciclos de EC

La sistematización de los seis casos de estudio mostrados en la Tabla 1, permitió identificar la presencia de los dos ciclos fundamentales de la EC propuestos por la Fundación Ellen MacArthur [2]: el ciclo biológico y el ciclo técnico. Los resultados muestran una distribución equilibrada entre ambas categorías, evidenciando el potencial de diferentes tipos de residuos para generar materiales de valor agregado.

Tabla 1. Clasificación de los casos de estudio según los principios de EC.

Caso de Estudio	Tipo de Residuo	Ciclo circular	Estrategia de valorización	Producto Obtenido
Arcillas agotadas	Industrial	Técnico	Reutilización y recuperación	Biodiesel y Materiales Cerámicos
Pseudotallo de plátano	Agro Industrial	Biológico	Aprovechamiento de biomasa	Nanocelulosa y biopolímeros
Escamas de paiche	Biológico	Biológico	Recuperación de biomateriales	Hidroxiapatita y colágeno
Aguas residuales porcinas	Agropecuario	Biológico	Recuperación de nutrientes	Estruvita
Tierras de diatomeas y mármol	Industrial	Técnico	Síntesis de Materiales	Wollastonita
Vidrio reciclado	Urbano	Técnico	Reciclaje	Mosaicos Decorativos

Los resultados muestran que tres investigaciones corresponden al ciclo biológico y tres al ciclo técnico, confirmando la diversidad de estrategias de circularidad implementadas. Según Geissdoerfer et al. [15], la coexistencia de ambos ciclos constituye un elemento esencial para la transición hacia sistemas productivos sostenibles.

3.2 Contribución de los ecomateriales a la recuperación de recursos

Uno de los principales objetivos de la EC consiste en mantener materiales y recursos dentro de los sistemas productivos durante el mayor tiempo posible [22]. Como se resume en la Tabla 2, los seis casos analizados demostraron diferentes niveles de recuperación de recursos y sustitución de materias primas vírgenes.

Tabla 2. Recursos recuperados y potencial de sustitución de materias primas

Caso	Recurso recuperado	Materia prima sustituida
Arcillas agotadas	Aceites residuales y minerales	Arcillas comerciales
Pseudotallo de plátano	Celulosa y almidón	Polímeros sintéticos
Escamas de paiche	Calcio biogénico y proteínas	Hidroxiapatita sintética y colágeno comercial
Aguas residuales porcinas	Fósforo y nitrógeno	Fertilizantes fosfatados
Tierras de diatomeas y mármol	Sílice y calcio residual	Wollastonita natural
Vidrio reciclado	Sílice reciclada	Arena silíceas

La recuperación de nutrientes mediante la producción de estruvita constituye una de las estrategias más relevantes desde el punto de vista de la circularidad, debido a que permite reincorporar fósforo y nitrógeno a sistemas agrícolas, contribuyendo al cierre de ciclos biogeoquímicos [3].

Las Figuras 1–4 se presentan como ejemplos representativos de los tipos de evidencia disponibles en los estudios fuente: caracterización mineralógica por DRX de estruvita, caracterización morfológica y elemental por MEB-EDS e identificación de grupos funcionales por IRTF de hidroxiapatita, y evidencia visual del producto final obtenido

mediante reciclaje de vidrio. La selección no pretende establecer una jerarquía entre los seis casos, sino ilustrar técnicas de caracterización complementarias y un ejemplo de producto terminado. No se incorporaron figuras de los restantes casos debido a la heterogeneidad y disponibilidad de los registros originales; su evaluación comparativa se sustenta en la información sistematizada en las Tablas 1–4.

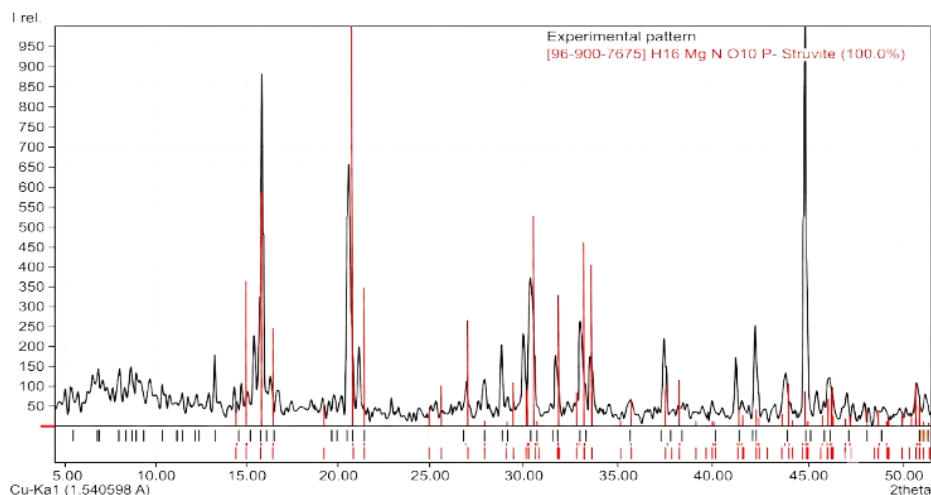


Figura 1. Caracterización mineralógica de la Estruvita obtenida a partir de aguas residuales [19].

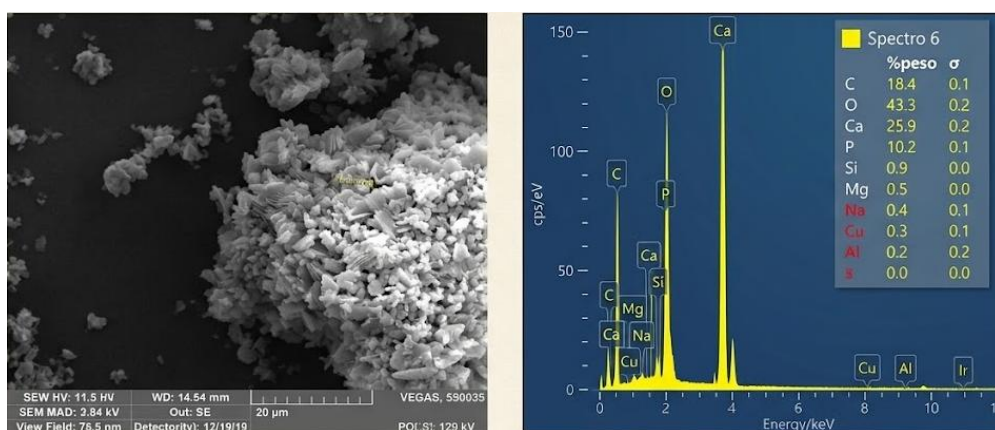


Figura 2. Micrografía con microanálisis por Espectroscopía de Energía Dispersiva de la muestra de Hidroxiapatita recuperada [18].

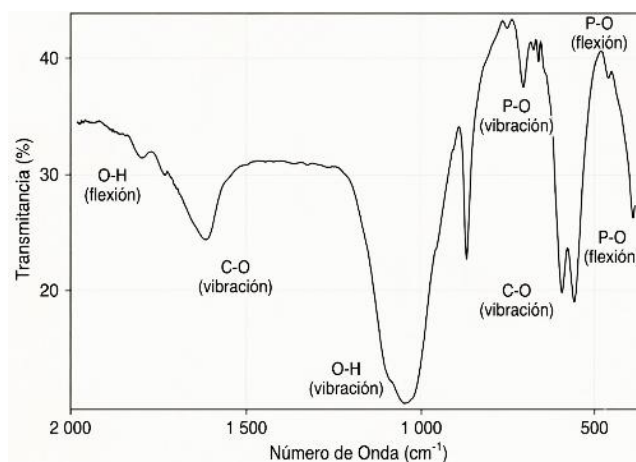


Figura 3. Espectro de IRTF de hidroxiapatita recuperada [18].



Figura 4. Mosaicos decorativos de vidrio reciclado obtenidos [21].

3.3 Evaluación comparativa del potencial de circularidad

Con base en los principios de EC propuestos por Potting et al. [23], se desarrolló la matriz comparativa presentada en la Tabla 3 considerando cinco dimensiones:

Para reducir la subjetividad de la valoración, las categorías cualitativas se asignaron a partir de la evidencia disponible en cada estudio original. Se consideró «Alta» cuando la evidencia documentaba de forma directa y consistente el cumplimiento del criterio; «Media» cuando el cumplimiento era parcial, dependía de condiciones adicionales o la evidencia era limitada; y «Baja» cuando el criterio no estaba demostrado o su contribución era marginal. En escalabilidad, además, se consideraron la madurez experimental, la complejidad del proceso y la existencia de rutas industriales análogas. Estas categorías constituyen una comparación ordinal y no sustituyen indicadores cuantitativos de circularidad.

- Reducción de residuos.
- Recuperación de recursos.
- Sustitución de materias primas.
- Potencial de escalamiento.
- Valor agregado generado.

Tabla 3. Matriz cualitativa de evaluación de circularidad

Caso	Reducción de residuos	Recuperación de recursos	Sustitución de materias primas	Escalabilidad	Valor agregado
Arcillas agotadas	Alta	Alta	Media	Media	Media
Pseudotallo de plátano	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Escamas de paiche	Alta	Alta	Alta	Media	Muy alta
Aguas residuales porcinas	Alta	Muy alta	Alta	Alta	Alta
Tierras de diatomeas y mármol	Media	Alta	Alta	Alta	Alta
Vidrio reciclado	Alta	Media	Alta	Alta	Media

La matriz cualitativa muestra un desempeño favorable de la nanocelulosa, la hidroxiapatita-colágeno y la estruvita. La nanocelulosa registra una valoración alta en las cinco dimensiones consideradas, mientras que la estruvita destaca por su muy alta escalabilidad y la ruta hidroxiapatita-colágeno por su muy alta contribución potencial a

la reducción de residuos. Estas diferencias deben interpretarse como tendencias ordinales basadas en la evidencia disponible y no como una jerarquización cuantitativa definitiva.

3.4 Potencial de valorización económica de los ecomateriales

La valorización económica constituye uno de los principales motores para la implementación de modelos de EC [14]. La Tabla 4 resume, con carácter referencial, los productos obtenidos en los casos analizados presentan aplicaciones potenciales en mercados especializados caracterizados por elevados niveles de crecimiento.

Los rangos de valor consignados corresponden a productos comparables reportados en literatura y mercados especializados; no representan precios de venta demostrados para los materiales obtenidos en CITEMA ni indicadores directos de rentabilidad industrial.

Tabla 4. Potencial económico referencial de los materiales obtenidos

Caso	Material / producto valorizado	Aplicación principal / valor de mercado referencial
Arcillas agotadas	Aceites residuales y materiales cerámicos	Uso potencial como insumo energético/químico y material cerámico; valor dependiente de calidad y mercado local
Pseudotallo de plátano	Nanocelulosa	Bioplásticos y compuestos; 2.000–10.000 USD/t
Escamas de paiche	Hidroxiapatita y colágeno	Biomateriales e ingeniería de tejidos/cosmética; HAp 150–500 USD/kg; colágeno 70–300 USD/kg
Aguas residuales porcinas	Estruvita	Fertilizantes sostenibles; 500–1.000 USD/t
Tierras de diatomeas y mármol	Wollastonita	Cerámica y construcción; 200–450 USD/t
Vidrio reciclado	Vidrio transformado	Arquitectura sostenible; valor agregado dependiente del mercado local

Los materiales con mayor potencial económico corresponden a la hidroxiapatita, el colágeno y la nanocelulosa, debido a sus aplicaciones en sectores de alto valor agregado como biomateriales, ingeniería de tejidos y materiales avanzados [9],[10].

3.5 Relación entre EC y desarrollo de ecomateriales

Los resultados evidencian que los ecomateriales constituyen mecanismos efectivos para materializar los principios de la EC. Todos los casos estudiados permitieron transformar residuos considerados de bajo valor económico en productos con aplicaciones potenciales en sectores industriales estratégicos.

La valorización de residuos agroindustriales, biológicos e industriales observada en este estudio coincide con las tendencias internacionales reportadas por Wattanakit et al. [6] y Prado-Acebo et al. [7] quienes destacan que la recuperación de materiales constituye una de las principales rutas para incrementar la sostenibilidad de los sistemas productivos y reducir la dependencia de recursos naturales no renovables.

4. Discusión

4.1 Los ecomateriales como mecanismos de implementación de la EC

Los resultados obtenidos demuestran que los ecomateriales constituyen herramientas efectivas para la implementación práctica de los principios de EC. A diferencia de enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la gestión de residuos,

los casos analizados evidencian la transformación de materiales residuales en productos con aplicaciones industriales específicas y potencial de generación de valor económico.

Esta observación coincide con lo reportado por Geissdoerfer et al. [15], quienes indican que la EC debe entenderse como un sistema regenerativo capaz de mantener el valor de productos, materiales y recursos durante el mayor tiempo posible. De manera similar, Kirchherr et al. [22] destacan que el objetivo principal de la circularidad no consiste únicamente en reducir residuos, sino en preservar el valor económico incorporado en los materiales.

En los seis casos analizados se observa que los residuos dejan de ser considerados un problema ambiental para convertirse en fuentes alternativas de materias primas secundarias. Esta transformación representa uno de los principios fundamentales de la EC y constituye una estrategia particularmente relevante para países en desarrollo que enfrentan limitaciones en el acceso a recursos tecnológicos y materias primas especializadas [14].

4.2 Comparación entre los ciclos biológicos y técnicos

Los resultados muestran diferencias importantes entre los casos clasificados dentro del ciclo biológico y aquellos pertenecientes al ciclo técnico.

Los proyectos relacionados con pseudotallos de plátano, escamas de paiche y recuperación de estruvita presentan características asociadas al ciclo biológico, donde los recursos recuperados pueden reincorporarse a sistemas naturales o productivos mediante procesos regenerativos. Según la Fundación Ellen MacArthur [2], estos sistemas contribuyen directamente a la restauración de capital natural y al cierre de ciclos biogeoquímicos.

Dentro del ciclo biológico, los tres casos responden a mecanismos distintos de retención de valor. El pseudotallo de plátano permite recuperar fracciones lignocelulósicas para nanocelulosa y biopolímeros; las escamas de paiche permiten recuperar componentes minerales y proteicos para hidroxipatita y colágeno; y las aguas residuales porcinas permiten recuperar fósforo y nitrógeno como estruvita. En conjunto, representan rutas de valorización de biomasa, recuperación de biomateriales y recuperación de nutrientes, respectivamente.

Particularmente, la recuperación de estruvita presenta una relevancia estratégica debido a la creciente preocupación mundial por la disponibilidad futura de fósforo. Diversos estudios han señalado que la recuperación de fósforo desde aguas residuales representa una de las alternativas más prometedoras para garantizar la seguridad alimentaria y reducir la dependencia de reservas minerales no renovables [3], [25].

Por otra parte, los proyectos asociados al ciclo técnico demostraron una elevada capacidad para sustituir materias primas convencionales. La reutilización de arcillas agotadas, la síntesis de wollastonita a partir de residuos industriales y el reciclaje de vidrio coinciden con tendencias internacionales orientadas a reducir la extracción de minerales y promover cadenas de suministro más sostenibles [6].

En el caso de las arcillas agotadas, la circularidad se basa en recuperar aceites residuales y reincorporar la fracción mineral en aplicaciones cerámicas, evitando que un residuo del proceso de blanqueo sea destinado íntegramente a disposición final. Este caso complementa las rutas de síntesis de wollastonita y reciclaje de vidrio al mostrar una estrategia de reutilización y recuperación dentro del ciclo técnico.

Estudios recientes realizados en Europa y Asia han demostrado que la incorporación de residuos industriales ricos en calcio y sílice para la producción de materiales cerámicos avanzados puede reducir significativamente la huella ambiental asociada a la minería tradicional [26]. Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran tendencias

similares, sugiriendo que estas estrategias podrían ser adaptadas exitosamente a contextos latinoamericanos.

4.3 Comparación internacional de las tecnologías desarrolladas

La obtención de nanocelulosa a partir de pseudotallos de plátano coincide con investigaciones recientes orientadas a la valorización de residuos lignocelulósicos para la producción de biopolímeros sostenibles. Prado-Acebo et al. [7], [8] señalan que la biomasa residual agrícola constituye una de las principales fuentes de materias primas para la transición hacia una bioeconomía circular.

En términos de biodegradabilidad, los materiales desarrollados presentan ventajas comparables a las reportadas para biopolímeros obtenidos a partir de residuos agrícolas en Brasil, India y China, donde se han alcanzado niveles superiores al 80 % de degradación bajo condiciones controladas [27].

Respecto a la obtención de hidroxiapatita y colágeno a partir de escamas de paiche, los resultados muestran una elevada concordancia con investigaciones recientes desarrolladas en residuos pesqueros de tilapia, salmón y otras especies acuáticas. Patwary et al. [9] y Patil et al. [11] destacan que las escamas de pescado constituyen una fuente particularmente atractiva de hidroxiapatita debido a su elevada pureza biológica, biocompatibilidad y disponibilidad.

Asimismo, Núñez-Tapia et al. [10] reportan que la hidroxiapatita obtenida a partir de residuos pesqueros presenta propiedades estructurales y biológicas comparables a las obtenidas mediante rutas sintéticas convencionales, con menores impactos ambientales y costos potencialmente más bajos.

Por otra parte, la reutilización de arcillas agotadas provenientes del blanqueo de aceites vegetales representa una estrategia alineada con los principios de química verde y valorización de residuos industriales promovidos por Wattanakit et al. [6]. La recuperación simultánea de aceites residuales y materiales minerales permite maximizar el aprovechamiento de recursos y reducir significativamente los volúmenes de residuos generados por la industria alimentaria.

La recuperación de estruvita desde aguas residuales porcinas también es consistente con la literatura internacional sobre recuperación de fósforo y nitrógeno desde corrientes residuales [25], [28]. De manera análoga, la síntesis de wollastonita a partir de fuentes residuales de calcio y sílice se relaciona con el uso de residuos minerales en materiales cerámicos sostenibles [26], [29], mientras que el reciclaje de vidrio se alinea con estrategias de retención de valor y sustitución de materias primas minerales en materiales de construcción [30].

En conjunto, la comparación internacional indica que los seis casos estudiados se insertan en líneas tecnológicas reconocidas en la literatura, aunque presentan diferentes niveles de madurez, disponibilidad de datos y proximidad al escalamiento.

4.4 Implicaciones ambientales y económicas

Uno de los principales hallazgos del presente estudio es la convergencia entre beneficios ambientales y oportunidades económicas derivadas de la valorización de residuos.

Desde la perspectiva ambiental, todas las tecnologías evaluadas contribuyen a disminuir la cantidad de residuos destinados a disposición final y reducen la necesidad de extracción de recursos naturales. Este comportamiento coincide con los principios establecidos por Korhonen et al. [14], quienes señalan que la EC debe generar simultáneamente beneficios ambientales, económicos y sociales.

Desde la perspectiva económica, los materiales obtenidos presentan potencial de inserción en mercados de alto valor agregado. La hidroxiapatita y el colágeno poseen aplicaciones en ingeniería de tejidos, medicina regenerativa y biomateriales avanzados, sectores que presentan tasas de crecimiento superiores al promedio de la industria de materiales [9].

De manera similar, la nanocelulosa representa uno de los materiales emergentes con mayor potencial dentro de la bioeconomía, debido a sus aplicaciones en envases biodegradables, materiales compuestos y sistemas avanzados de liberación controlada [27].

La recuperación de estruvita también presenta ventajas económicas relevantes al transformar nutrientes residuales en fertilizantes de liberación lenta, permitiendo reducir la dependencia de fertilizantes convencionales derivados de recursos minerales finitos [25].

4.5 Oportunidades para la EC en países en desarrollo

Los resultados obtenidos sugieren que los países en desarrollo poseen condiciones particularmente favorables para implementar estrategias de EC basadas en la valorización de residuos.

América Latina genera anualmente millones de toneladas de residuos agroindustriales, pesqueros, forestales e industriales que actualmente presentan bajos niveles de aprovechamiento. La transformación de estos residuos en ecomateriales podría contribuir simultáneamente a la reducción de impactos ambientales, la diversificación productiva y la generación de nuevas cadenas de valor [7].

En el caso específico de Bolivia, la disponibilidad de biomasa agrícola, residuos de la industria alimentaria, recursos pesqueros amazónicos y residuos minerales ofrece oportunidades significativas para el desarrollo de procesos de valorización adaptados a las condiciones locales.

No obstante, para lograr la implementación industrial de estas tecnologías será necesario fortalecer los mecanismos de transferencia tecnológica, promover incentivos para la innovación circular y desarrollar marcos regulatorios que favorezcan el aprovechamiento sostenible de residuos, tal como recomiendan las estrategias internacionales de transición hacia la EC propuestas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [31].

En conjunto, los resultados demuestran que los ecomateriales pueden desempeñar un papel fundamental como catalizadores de la transición hacia sistemas productivos más sostenibles, permitiendo avanzar simultáneamente en objetivos de sostenibilidad ambiental, competitividad económica y aprovechamiento eficiente de recursos.

5. Potencial de mercado y creación de valor en cadenas circulares

5.1 De la valorización de residuos a la creación de valor circular.

Tradicionalmente, los residuos industriales, agroindustriales y biológicos han sido considerados materiales de bajo valor económico cuya gestión implica costos asociados a transporte, tratamiento y disposición final. Sin embargo, el paradigma de la EC propone una transformación conceptual en la que los residuos dejan de ser concebidos como pasivos ambientales para convertirse en recursos capaces de generar nuevas cadenas de valor, incrementar la eficiencia en el uso de materiales y reducir la dependencia de materias primas vírgenes [15], [32].

En este contexto, el valor económico no se limita al precio de mercado de los materiales recuperados, sino que incluye beneficios asociados a la reducción de costos

operativos, la disminución de riesgos de abastecimiento, la creación de nuevos mercados, la generación de empleo y el fortalecimiento de cadenas productivas regionales [31].

De acuerdo con la OCDE [31], la transición hacia modelos circulares constituye una estrategia para incrementar la competitividad industrial mediante la mejora de la eficiencia de recursos y la utilización de materias primas secundarias, permitiendo desarrollar cadenas de suministro más resilientes frente a la volatilidad de los mercados internacionales de materias primas.

5.2 Creación de valor en cadenas biológicas circulares.

Los casos relacionados con la obtención de nanocelulosa a partir de pseudotallos de plátano, la recuperación de estruvita desde aguas residuales porcinas y la producción de hidroxiapatita y colágeno a partir de escamas de paiche muestran una elevada capacidad para generar valor mediante la reintegración de recursos biológicos en nuevas cadenas productivas.

La valorización de residuos agrícolas para la producción de nanocelulosa representa una oportunidad particularmente relevante dentro de la bioeconomía circular debido al crecimiento sostenido de la demanda de materiales biodegradables, envases sostenibles, biocompuestos y biomateriales avanzados. Diversos estudios señalan que la transformación de biomasa residual en materiales funcionales permite incrementar significativamente el valor económico de residuos agrícolas tradicionalmente subutilizados [7], [27].

De manera similar, la recuperación de colágeno e hidroxiapatita desde residuos pesqueros permite incorporar biomoléculas de alto valor agregado en sectores estratégicos como la ingeniería de tejidos, odontología, medicina regenerativa y biomateriales avanzados. Este tipo de estrategias genera valor no únicamente mediante la comercialización del producto final, sino también a través de la reducción de impactos ambientales asociados a la disposición de residuos orgánicos y la sustitución parcial de materiales obtenidos mediante procesos sintéticos más intensivos en recursos [9], [10].

Asimismo, la recuperación de fósforo y nitrógeno en forma de estruvita contribuye a la construcción de cadenas agrícolas más circulares mediante el cierre de ciclos de nutrientes. La creciente preocupación mundial por la seguridad de abastecimiento de fósforo ha convertido a las tecnologías de recuperación de nutrientes en un sector estratégico para la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria [25], [28].

5.3 Creación de valor en cadenas técnicas circulares.

Los proyectos relacionados con la reutilización de arcillas agotadas, la síntesis de wollastonita y el reciclaje de vidrio evidencian mecanismos de creación de valor asociados al ciclo técnico de la EC.

En estos casos, la generación de valor se fundamenta principalmente en la sustitución de materias primas vírgenes, la reducción de costos de extracción de recursos minerales y la incorporación de materiales secundarios dentro de procesos industriales existentes. Según Arias y Rojas [29], la utilización de residuos industriales ricos en calcio, sílice y otros compuestos minerales permite desarrollar materiales cerámicos sostenibles con propiedades comparables a las obtenidas mediante materias primas convencionales.

La síntesis de wollastonita a partir de residuos industriales representa un ejemplo particularmente relevante de simbiosis industrial, donde subproductos de diferentes cadenas productivas son integrados para generar nuevos materiales funcionales. Este tipo de estrategias constituye uno de los mecanismos más importantes para incrementar la eficiencia de recursos dentro de sistemas productivos circulares [6].

Además, el reciclaje y transformación de vidrio permite extender la vida útil de materiales ya existentes, reduciendo simultáneamente la demanda de arena silícea y la generación de residuos urbanos. Estas estrategias coinciden con los enfoques internacionales orientados a maximizar la retención de valor de los materiales durante múltiples ciclos de uso [30].

5.4 Potencial de mercado de los ecomateriales desarrollados.

Más allá de los beneficios ambientales asociados a la reducción de residuos, los materiales obtenidos presentan oportunidades de inserción en mercados con elevadas tasas de crecimiento tecnológico.

La demanda mundial de biomateriales, materiales biodegradables, fertilizantes recuperados y materiales avanzados sostenibles ha experimentado un crecimiento significativo durante la última década debido a la transición hacia modelos productivos de menor impacto ambiental. Estudios recientes destacan que los mercados vinculados a biomateriales, bioeconomía circular y valorización de residuos representan algunos de los segmentos de mayor expansión dentro de la economía verde global [33], [34].

En este contexto, los materiales desarrollados en los casos estudiados presentan oportunidades potenciales de integración en sectores relacionados con:

- Biomateriales e ingeniería de tejidos.
- Agricultura sostenible y recuperación de nutrientes.
- Materiales compuestos biodegradables.
- Industria cerámica y materiales de construcción sostenibles.
- Tecnologías de tratamiento ambiental.
- Envases biodegradables y bioeconomía circular.

La diversificación de aplicaciones constituye un factor particularmente importante debido a que incrementa la resiliencia económica de las cadenas de valor circulares y reduce la dependencia de un único mercado de destino.

5.5 Contribución de los ecomateriales a la resiliencia económica y la seguridad de recursos

Uno de los principales aportes de los modelos circulares consiste en disminuir la vulnerabilidad asociada a la dependencia de recursos externos y materias primas críticas. La OCDE [31] destaca que la circularidad puede fortalecer la seguridad de abastecimiento mediante el aprovechamiento de recursos secundarios y la reducción de riesgos asociados a interrupciones en cadenas globales de suministro.

De manera complementaria, evaluaciones recientes de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) indican que la implementación de estrategias circulares permite desplazar la creación de valor desde la extracción de recursos hacia actividades relacionadas con recuperación, reutilización, remanufactura y reciclaje avanzado, generando nuevas oportunidades económicas y fortaleciendo la competitividad industrial.

En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que la valorización de residuos mediante el desarrollo de ecomateriales no debe interpretarse únicamente como una estrategia de gestión ambiental, sino como una herramienta para construir cadenas productivas más resilientes, diversificadas y sostenibles.

5.6 Implicaciones para la transición hacia una bioeconomía circular en América Latina

La disponibilidad de residuos agroindustriales, pesqueros, forestales e industriales en América Latina ofrece condiciones favorables para el desarrollo de cadenas circulares basadas en la valorización de recursos subutilizados.

Los casos analizados muestran que materiales considerados residuos pueden convertirse en insumos para sectores de alto valor agregado, contribuyendo simultáneamente a la reducción de impactos ambientales y a la generación de nuevas oportunidades económicas. Este enfoque coincide con las tendencias internacionales que promueven la transición desde modelos lineales de extracción-consumo-disposición hacia sistemas basados en recuperación de valor, simbiosis industrial y bioeconomía circular [3], [33], [35].

Por consiguiente, la consolidación de capacidades científicas y tecnológicas para el desarrollo de ecomateriales podría desempeñar un papel estratégico en la construcción de economías más sostenibles y competitivas, particularmente en países que disponen de abundantes recursos biológicos y residuos industriales actualmente infrautilizados.

6. Conclusiones

El análisis de los seis casos de estudio desarrollados en el CITEMA muestra viabilidad técnica preliminar para transformar residuos industriales, agroindustriales y biológicos en ecomateriales. El análisis comparativo identifica oportunidades potenciales de recuperación de residuos y sustitución de materias primas, aunque la validación de su desempeño ambiental y económico y de escalamiento requiere estudios complementarios de ciclo de vida, costos y madurez tecnológica.

Los resultados sugieren que tanto los ciclos biológicos como los ciclos técnicos pueden ser aprovechados para recuperar materiales, nutrientes y compuestos funcionales, contribuyendo simultáneamente a la reducción de residuos, la disminución de la presión sobre recursos naturales y el fortalecimiento de sistemas productivos más eficientes en el uso de materiales.

La obtención de nanocelulosa, hidroxiapatita, colágeno y estruvita demuestra el potencial de los residuos biológicos para incorporarse a nuevas cadenas de valor asociadas a la bioeconomía circular, mientras que la reutilización de arcillas agotadas, la síntesis de wollastonita y el reciclaje de vidrio evidencian oportunidades para prolongar la permanencia de materiales dentro de ciclos técnicos mediante estrategias de reutilización, reciclaje y simbiosis industrial.

Desde una perspectiva económica, los resultados indican que la creación de valor derivada de estos procesos trasciende la comercialización de productos individuales. Los ecomateriales desarrollados poseen potencial para integrarse en cadenas circulares emergentes relacionadas con biomateriales, agricultura sostenible, materiales avanzados y tecnologías ambientales, contribuyendo a la diversificación productiva y a la generación de nuevas oportunidades de mercado.

Asimismo, el estudio sugiere que la valorización de residuos puede fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos al favorecer el uso de materias primas secundarias, reducir la dependencia de recursos vírgenes y mejorar la seguridad de abastecimiento de materiales estratégicos. Estos aspectos adquieren especial relevancia en países en desarrollo, donde la disponibilidad de residuos agroindustriales e industriales representa una oportunidad para impulsar modelos de desarrollo basados en la innovación y la sostenibilidad.

De manera integral, los casos analizados muestran que los ecomateriales no deben considerarse únicamente productos derivados de residuos, sino componentes de sistemas circulares capaces de mantener recursos en uso durante más tiempo, presentar beneficios

ambientales potenciales y crear nuevas oportunidades económicas dentro de esquemas de producción sostenibles.

Finalmente, los resultados sugieren que la articulación entre ciencia de materiales, valorización de residuos y EC puede constituir una herramienta estratégica para avanzar hacia modelos de bioeconomía circular en América Latina, contribuyendo simultáneamente a los objetivos de sostenibilidad ambiental, competitividad industrial y desarrollo regional.

6.1 Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos permiten evidenciar el potencial de la valorización de residuos para el desarrollo de ecomateriales dentro del marco de la EC, es importante reconocer algunas limitaciones inherentes al alcance de la presente investigación.

En primer lugar, el estudio se fundamenta en la sistematización y análisis comparativo de seis investigaciones desarrolladas en un mismo centro de investigación. Aunque esta aproximación permitió realizar una evaluación homogénea bajo criterios comunes de circularidad, las conclusiones obtenidas podrían no representar la totalidad de las tecnologías de valorización de residuos actualmente desarrolladas en otros contextos geográficos, institucionales o industriales.

En segundo lugar, la evaluación económica realizada se basó principalmente en precios de referencia reportados en literatura científica, informes técnicos y mercados internacionales especializados. Por consiguiente, los valores presentados deben interpretarse como estimaciones referenciales del potencial económico de los materiales obtenidos y no como indicadores directos de rentabilidad industrial. La viabilidad económica real dependerá de factores adicionales como costos de recolección, transporte, procesamiento, consumo energético, escala de producción, logística y condiciones específicas del mercado local.

Una limitación adicional corresponde a la ausencia de estudios de escalamiento industrial para la mayoría de las tecnologías analizadas. Aunque los resultados experimentales demuestran la factibilidad técnica de los procesos desarrollados, la transición desde la escala de laboratorio hacia niveles piloto o industriales requiere evaluaciones complementarias relacionadas con estabilidad operativa, productividad, eficiencia energética y sostenibilidad económica a largo plazo.

Asimismo, el presente estudio no incorpora una evaluación completa del análisis de ciclo de vida (ACV) de los materiales obtenidos. La aplicación de metodologías de análisis de ciclo de vida permitiría cuantificar de manera más precisa los beneficios ambientales asociados a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el ahorro de recursos naturales y la disminución de impactos ambientales derivados de la disposición final de residuos. Diversos autores consideran que la integración de indicadores de ciclo de vida constituye una herramienta fundamental para validar el desempeño ambiental de tecnologías basadas en EC [14], [15].

De igual manera, no se aplicaron indicadores cuantitativos específicos de circularidad, tales como el Indicador de Circularidad de Materiales (ICM) o los Indicadores de Transición Circular (ITC). Su cálculo requiere datos homogéneos de flujos de masa, contenido virgen y reciclado, vida útil, destino al final de vida y, según el indicador, información operacional que no está disponible de manera comparable para las seis investigaciones históricas analizadas. Aplicar estos indicadores solo a una parte de los casos produciría una comparación metodológicamente asimétrica. Por ello, en el presente estudio se mantuvo una matriz ordinal con criterios explícitos, mientras que la aplicación de ICM, ITC u otras métricas cuantitativas se plantea para investigaciones futuras con datos primarios armonizados.

Finalmente, aunque el estudio aborda aspectos tecnológicos, ambientales y económicos, no se analizaron de manera detallada dimensiones sociales e institucionales asociadas a la implementación de modelos de EC. Factores como la aceptación de mercado, los marcos regulatorios, los incentivos gubernamentales, las capacidades tecnológicas locales y las dinámicas de las cadenas de suministro pueden desempeñar un papel determinante en la adopción efectiva de estas tecnologías.

En consecuencia, futuras investigaciones deberían incorporar análisis de ciclo de vida, estudios tecno económicos detallados, evaluaciones de circularidad basadas en indicadores cuantitativos y análisis de escalamiento industrial, con el propósito de fortalecer la comprensión integral de las oportunidades y desafíos asociados al desarrollo de ecomateriales a partir de residuos. Estas líneas de investigación permitirán avanzar hacia modelos de producción más sostenibles y contribuirán a la consolidación de estrategias de EC adaptadas a las condiciones productivas de América Latina y otros países en desarrollo.

Perspectivas futuras

Como líneas futuras de investigación se recomienda profundizar en la evaluación del ciclo de vida (ACV) de los materiales desarrollados, cuantificar indicadores específicos de circularidad, realizar estudios tecno económicos a escala piloto e industrial y evaluar el potencial de escalamiento de las tecnologías analizadas. Asimismo, resulta necesario fortalecer los mecanismos de transferencia tecnológica que permitan convertir los resultados de investigación en procesos productivos capaces de generar impactos económicos y ambientales medibles dentro de los marcos de la EC y la bioeconomía sostenible

Contribuciones de Autores: Conceptualización, Arzabe J.O., Aranibar L.J.; metodología, Arzabe M.; investigación, Arzabe J.O.; redacción—borrador Arzabe M., redacción - original, Arzabe J.O.; redacción—revisión y edición, Arzabe J.O. y Aranibar L.J.; Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de Disponibilidad de Datos: Todos los datos utilizados en el presente artículo están disponibles en los datos proporcionados en las referencias del presente artículo.

Agradecimientos: A las instituciones en las que prestamos nuestros servicios y al CITEMA, dependiente del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS, por el acceso al centro y a la información disponible. Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron Chat GPT 5.5 Plus para la revisión de la gramática, ortografía y la corrección de formatos en las referencias bibliográficas, Gemini 3.5 Flash para mejorar las figuras presentadas. Todos los autores han revisado y editado el resultado y asumen plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias

- [1] Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Harvester Wheatsheaf, Hemel Hempstead, Hertfordshire, UK, 1990. 378 pp. ISBN 0-7450-0202-1/0-7450-0225-0

- [2] Ellen MacArthur Foundation. (2023). *The circular economy framework*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>
- [3] Nesterov D., Barrera-Martínez I., Martínez-Sánchez C., Sandoval-González A., Bustos E. (2024). Approaching the circular economy: Biological, physicochemical, and electrochemical mitos to valorize agro-industrial residues, wastewater, and industrial wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113335. doi: 10.1016/j.jece.2024.113335
- [4] Matiacevich S., Soto Madrid D., Gutiérrez Cutiño M. (2023) Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de desechos agroindustriales, *Revista RIVAR*, Vol. 10, nº 28, 77-100, ISSN 0719-4994 doi: 10.35588/rivar.v10i28.5343
- [5] Fratzl, P. (2023). Introduction: Sustainable materials. *Chemical Reviews*, 123(5), 1841–1842. doi: 10.1021/acs.chemrev.3c00091
- [6] Wattanakit, C., Fan, X., Mukti, R. R., & Yip, A. C. K. (2024). Green chemistry, catalysis, and waste valorization for a circular economy. *ChemPlusChem*, 89(9), doi: 10.1002/cplu.202400389
- [7] Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., & Eibes, G. (2024). Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 183, 42–52. doi: 10.1016/j.wasman.2024.05.001
- [8] J. S. de Oliveira, J. P. de Oliveira, C. P. de Oliveira, and C. M. Veloso, “Circular economy as a tool for the valorization of agro-industrial residues and the development of biodegradable and sustainable packaging: a bibliometric review from 2015 to 2024,” *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 12, Art. no. 100188, Dec. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.10.004>
- [9] Patwary M. A., Yasin M., Azam M.S., Hossain M.A., (2025), Extraction and industrial valorization of collagen, gelatin, and hydroxyapatite from freshwater fish scales: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 154, 319–333. doi: 10.1016/j.fbp.2025.10.004
- [10] Núñez-Tapia, I., Suarez R.G., Vazquez-Vazquez F.C, Bucio-Galindo L. Alvarez-Perez M.A., Gonzales-Torres M & Piña-Barba M.A. (2026). Marine waste to biomaterial: Hydroxyapatite recovered from fish scales and an approach to structural and surface characterization with cell viability assessment. *Journal of the Australian Ceramic Society*. doi: 10.1007/s41779-026-01381-6
- [11] S. Patil, S. Thanikodi, S. Palaniyappan, J. Giri, A. O. Hourani, and M. Azizi, “Sustainable synthesis of marine-derived hydroxyapatite for biomedical applications: a systematic review on extraction methods and bioactivity,” *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 11, no. 1, Art. no. 2508547, 2025, doi: 10.1080/20550340.2025.2508547.
- [12] Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Sage Publications.
- [13] Jara, O. H. (2018). *La sistematización de experiencias: práctica y teoría para otros mundos posibles*. CINDE. Bogota, Colombia
- [14] Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041
- [15] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
- [16] García Aguirre Ariel, Ramos Caballero Marcelo, 2008, *Tratamiento y uso alternativo de arcillas provenientes del Proceso de blanqueo de la empresa aceitera (IASA)*, Proyecto de grado, presentado para optar al diploma académico de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS, Cochabamba, Bolivia.
- [17] Uyardo Martín, Villazón D. Dayana, 2024, *Obtención de nanocelulosa y almidón a partir de pseudotallos de plátano para la preparación de polímeros biodegradables*. Proyecto de grado, presentado para optar al diploma académico de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS, Cochabamba, Bolivia.
- [18] Mamani Elvia, Solís Javier, Arzabe Maure José Omar, 2020, Colágeno e hidroxiapatita a partir de escamas de Paiche (Arapaima gigas) para su uso en ingeniería tisular, *Revista Bio Scientia*, Universidad Real y Pontificia, San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia.
- [19] Rojas D. Laura N., Ugarte G. Noelia, 2019, *Obtención de estruvita a partir de aguas residuales*, Proyecto de grado, presentado para optar al diploma académico de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS, Cochabamba, Bolivia.
- [20] Jiménez Vélez Sergio, Arzabe Maure José Omar, 2011, “Obtención de Wollastonita a partir de residuos industriales en la empresa Cervecería Taquiña S.A.”, *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación Aplicados al sector Productivo N° 1*, Cámara de Industrias, Cochabamba, Bolivia
- [21] Escalera Edwin, Terán Rosse Mary, Arzabe Maure José Omar, 2005, Estudio y formulación de composiciones de mosaicos a partir de residuos vítreos y óxidos metálicos, *VI Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de los Materiales*, Facultad de Ciencias y Tecnología, UMSS. Cochabamba
- [22] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005

- [23] Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>
- [24] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- [25] Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., Rabaey, K., & Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336–384. doi: 10.1080/10643389.2013.866531
- [26] Fugazzotto, M., Mazzoleni, P., Lancellotti, I., Camerini, R., Ferrari, P., Tiné, M. R., Centauro, I., Salvatici, T., & Barone, G. (2023). Industrial Ceramics: From Waste to New Resources for Eco-Sustainable Building Materials. *Minerals*, 13(6), 815. doi: 10.3390/min13060815
- [27] Sharma A, Thakur M, Bhattacharya M, Mandal T, Goswami S. (2019) Commercial application of cellulose nano-composites - A review. *Biotechnol Rep (Amst)*. Feb 15;21:e00316. doi: 10.1016/j.btre.2019.e00316
- [28] Zheng Y, Wan Y, Zhang Y, Huang J, Yang Y, Tsang DCW, Wang H, Chen H, Gao B. (2022) Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorous removal technologies. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 30;53(11):1148-1172. doi: 10.1080/10643389.2022.2128194
- [29] Arias Ocampo, M. A., y Rojas González, A. F., (2023). Alternativas de reutilización y valorización de residuos cerámicos: una revisión. *Revista EIA*, 20(40), 4018 pp. 1–19. doi: 10.24050/reia.v20i40.1680
- [30] Hernández González J. M., Mendoza Cuenca J. L., González Castillo O. F., (2022), *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*. Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925 Volumen 5 (2): e189. Abril-junio. doi: 10.37636/recit.v5n2e189
- [31] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2024). *Circular Economy Outlook 2024*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/en/topics/resource-efficiency-and-circular-economy.html><https://www.oecd.org/en/topics/resource-efficiency-and-circular-economy.html>
- [32] Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2022). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457. doi: 10.1016/j.spc.2021.02.018
- [33] Mhatre, P., Gedam, V., Unnikrishnan, S., et al. (2023). Management insights for reuse of materials in a circular built environment, *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* doi: 10.1177/0734242X231187570
- [34] Norizan MN, Shazleen SS, Alias AH, Sabaruddin FA, Asyraf MRM, Zainudin ES, Abdullah N, Samsudin MS, Kamarudin SH, Norrrahim MNF. (2022) Nano cellulose-Based Nanocomposites for Sustainable Applications: A Review. *Nanomaterials (Basel)*. Oct 5;12(19):3483. doi: 10.3390/nano12193483
- [35] Leong, H.Y., Chang, CK., Khoo, K.S. et al., (2021) Waste bio refinery towards a sustainable circular bio economy: a solution to global issues. *Biotechnol Biofuels* 14, 87. doi: 10.1186/s13068-021-01939-5

Nota del Editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales, y no de Andean Journals ni de los editores. Andean Journals y/o los editores no se responsabilizan por daños a personas o bienes derivados de ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.