

VALORIZACIÓN BIOTECNOLÓGICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES ECUATORIANOS PARA BIOINSUMOS Y BIOPRODUCTOS: REVISIÓN APLICADA CON MATRIZ DE DECISIÓN

BIOTECHNOLOGICAL VALORIZATION OF ECUADORIAN AGROINDUSTRIAL RESIDUES FOR BIOINPUTS AND BIOPRODUCTS: AN APPLIED REVIEW WITH A DECISION MATRIX

Carlos Jamil Bastidas Sánchez¹

{cbastidass@unemi.edu.ec¹}

Fecha de recepción: 08/07/2026 / Fecha de aceptación: 13/08/2026 / Fecha de publicación: 25/08/2026

RESUMEN: La agroindustria ecuatoriana genera subproductos asociados a las cadenas de banano, cacao, arroz, caña de azúcar, maíz, cítricos y camarón, muchos de los cuales se descartan sin aprovechamiento. Estos materiales contienen fibras, carbohidratos, proteínas, compuestos fenólicos, pectinas, polisacáridos y quitina susceptibles de transformación mediante rutas biotecnológicas. Se desarrolló una investigación documental, no experimental, de alcance descriptivo-comparativo, orientada a analizar su potencial para obtener bioinsumos y bioproductos. La búsqueda reproducida en Scopus para 2022–2026 recuperó 459 resultados en la interfaz y 455 registros únicos en el archivo exportado; el corpus final integró 45 fuentes científicas seleccionadas por pertinencia y trazabilidad. La información se organizó en una matriz de decisión con cinco criterios: disponibilidad del residuo, potencial biotecnológico, diversidad de productos, aplicabilidad productiva y aporte ambiental. Los residuos se agruparon en materiales lignocelulósicos, subproductos con contenido funcional relevante y residuos acuícolas orientables hacia biopolímeros. Banano y cacao alcanzaron la mayor prioridad; caña de azúcar, camarón, cítricos y arroz también se clasificaron como de prioridad alta, mientras que maíz obtuvo prioridad media. Se concluye que los residuos agroindustriales ecuatorianos presentan un potencial de valorización diferenciado; dentro del alcance documental y de la matriz empleada, banano y cacao constituyen las alternativas iniciales más favorables, aunque su implementación debe confirmarse mediante caracterización local y evaluaciones técnicas, económicas y ambientales.

Palabras clave: *Biotecnología industrial, biomasa residual, economía circular, fermentación, biofertilizantes, sostenibilidad productiva*

¹Facultad Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0003-1018-6956>; 0997003130

ABSTRACT: Ecuadorian agroindustry generates by-products from banana, cocoa, rice, sugarcane, maize, citrus and shrimp chains, many of which are discarded without recovery. These materials contain fibers, carbohydrates, proteins, phenolic compounds, pectins, polysaccharides and chitin that can be transformed through biotechnological routes. A non-experimental documentary study with a descriptive-comparative scope was conducted to analyze their potential for producing bioinputs and bioproducts. The reproducible Scopus search for 2022–2026 retrieved 459 results in the interface and 455 unique records in the exported file; the final corpus comprised 45 scientific sources selected for relevance and traceability. The information was organized in a decision matrix using five criteria: residue availability, biotechnological potential, product diversity, productive applicability and environmental contribution. Residues were grouped into lignocellulosic materials, by-products with relevant functional content and aquaculture residues suitable for biopolymer production. Banana and cocoa achieved the highest priority; sugarcane, shrimp, citrus and rice were also classified as high priority, whereas maize obtained medium priority. It is concluded that Ecuadorian agroindustrial residues have differentiated valorization potential; within the documentary scope and the matrix applied, banana and cocoa are the most favorable initial alternatives, although their implementation requires local characterization and specific technical, economic and environmental assessments.

Keywords: *Industrial biotechnology, residual biomass, circular economy, fermentation, biofertilizers, productive sustainability*

INTRODUCCIÓN

Dentro de la estructura productiva del Ecuador, la agroindustria vinculada al banano, cacao, arroz, caña de azúcar, maíz, cítricos y camarón genera, además de sus productos comerciales, una cantidad significativa de subproductos que no ingresan a ningún canal de aprovechamiento posterior. Cáscaras, bagazos, cascarillas, pseudotallos, raquis, pulpas, mucílagos y exoesqueletos quedan fuera del producto final en cada ciclo productivo. Aunque su manejo habitual los sitúa como material de descarte, análisis fisicoquímicos de estos subproductos revelan la presencia de fibras, carbohidratos, proteínas, compuestos fenólicos, pectinas y polisacáridos cuya utilidad en procesos agrícolas e industriales ha sido confirmada en distintos estudios (1,2).

Cuando no se establece un mecanismo de recuperación, esta biomasa puede afectar los suelos y las fuentes hídricas o perderse sin que sus componentes tengan un uso posterior. El esquema lineal de extracción, procesamiento y eliminación del residuo mantiene presiones ambientales en las zonas productivas. Esta problemática ha sido descrita en literatura internacional y regional sobre residuos agroindustriales y su transformación en recursos (2–4).

La proporción y las características de los residuos varían según la cadena productiva, la fracción del material procesado y el nivel tecnológico empleado. En Ecuador se han estudiado la cascarilla de arroz, el bagazo de caña, las cáscaras de cacao y otras

biomasas; sin embargo, esos trabajos suelen analizar un residuo o una ruta de forma aislada, lo que dificulta una comparación conjunta(1–3,5,6)

Entre las alternativas documentadas para modificar esa situación, la biotecnología aplicada ha ganado relevancia porque permite, mediante procesos biológicos controlados, convertir materiales residuales en productos con aplicación concreta. Rutas como la fermentación en estado sólido, la fermentación sumergida, la hidrólisis enzimática, la digestión anaerobia y la bioconversión microbiana han mostrado capacidad para generar biofertilizantes, bioplaguicidas, enzimas, biopolímeros, bioetanol, biogás y compuestos antioxidantes a partir de distintos tipos de biomasa. La elección de una u otra ruta no responde únicamente al tipo de residuo disponible, sino que también está condicionada por su estabilidad fisicoquímica, la regularidad con que puede obtenerse y el uso previsto para el producto final (7–10).

Los residuos no se comportan de la misma manera frente a su aprovechamiento, ya que su respuesta depende de la composición de cada uno. Materiales como el bagazo, la cascarilla, la paja y los pseudotallos, de naturaleza lignocelulósica, pueden aprovecharse como sustratos de fermentación o como fuente para la generación de energía (4,11,12). Sin embargo, usarlos directamente resulta poco eficiente debido a la recalcitrancia que caracteriza a la matriz lignocelulósica. Dentro de estos materiales, la celulosa se dispone en microfibrillas cuyas zonas cristalinas se mantienen cohesionadas por una red de puentes de hidrógeno, y todo ello queda embebido en una matriz formada por hemicelulosa y lignina. Esta organización estructural disminuye la porosidad del material y dificulta que microorganismos y enzimas hidrolíticas alcancen los enlaces glucosídicos. A esto se suma que la lignina opera como barrera física y puede propiciar que las enzimas se adsorban de forma no productiva. Por estas razones, dichas biomasas suelen necesitar pretratamientos de tipo físico, químico o biológico y una posterior hidrólisis, para que sus carbohidratos logren transformarse de manera eficiente en azúcares fermentables (1,4,11–13).

Las cáscaras de cacao y de cítricos presentan un perfil diferente: en ellas destaca la presencia de compuestos bioactivos, pectinas y fracciones antioxidantes con posibles aplicaciones farmacológicas y agroalimentarias. En el caso del mucílago de cacao, su porción soluble está compuesta sobre todo por glucosa, fructosa y sacarosa, moléculas de bajo peso molecular que levaduras y bacterias pueden asimilar sin una despolimerización extensa. Esta disponibilidad facilita la fermentación, aunque el elevado contenido de agua, el rápido deterioro microbiológico y la variabilidad de la composición pueden complicar el almacenamiento y la estandarización del proceso (14,15).

Un panorama distinto ofrece los residuos de la industria camaronera. La quitina, las proteínas y los minerales presentes en ellos permiten obtener quitosano, hidrolizados proteicos y biomateriales útiles en agricultura, alimentación y tratamiento de aguas. La quitina es un polisacárido lineal de N-acetil-D-glucosamina con enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4), elevada cristalinidad y baja solubilidad. En el exoesqueleto se encuentra asociada con proteínas y carbonato de calcio, por lo que su recuperación exige desmineralización y desproteización; posteriormente se aplica desacetilación para obtener quitosano o hidrólisis para generar oligómeros y aminoazúcares. Estos procedimientos consumen

reactivos y energía y pueden generar efluentes que deben tratarse (16–19). Así, mientras el mucílago puede emplearse como sustrato fermentativo con menor acondicionamiento, el residuo de camarón requiere separación y modificación estructural.

Ecuador presenta condiciones favorables porque varias cadenas generan subproductos durante buena parte del año y algunos residuos se concentran en empacadoras, ingenios, piladoras o plantas procesadoras. No obstante, la disponibilidad operativa no es uniforme: depende de la estacionalidad, la humedad, la dispersión territorial y la capacidad de almacenamiento. Banano y cacao ofrecen una generación relativamente regular, mientras que maíz y cítricos presentan variaciones más marcadas que deben incorporarse al dimensionamiento de los procesos (5,20–23).

El problema persiste en otro nivel. La información disponible sobre aprovechamiento de estos residuos aparece distribuida en investigaciones que abordan materiales o procesos puntuales, sin que exista todavía una síntesis que permita vincular el tipo de biomasa con la tecnología aplicable y el producto que se puede obtener. Para quienes toman decisiones en el sector productivo o diseñan líneas de investigación, esa dispersión representa un obstáculo concreto a la hora de establecer prioridades.

Partiendo de esa brecha, este trabajo sostiene que los residuos agroindustriales del Ecuador presentan un potencial de valorización biotecnológica diferenciado según su composición y las tecnologías disponibles para cada tipo de biomasa. Con ese propósito, se revisó la literatura científica disponible sobre procesos de transformación aplicables a distintos tipos de biomasa residual y se construyó una herramienta comparativa que permite relacionar cada residuo con su ruta de procesamiento y los productos que pueden obtenerse a partir de él. Los resultados buscan apoyar la identificación de alternativas prioritarias, orientar futuras líneas de investigación y aportar elementos concretos para el diseño de estrategias de economía circular dentro de la agroindustria ecuatoriana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión documental descriptiva y comparativa para identificar rutas de valorización biotecnológica aplicables a residuos de banano, cacao, arroz, caña de azúcar, maíz, cítricos y camarón. Estas cadenas se seleccionaron por su relevancia productiva, generación recurrente de subproductos y disponibilidad de evidencia científica sobre su transformación (3,5,7,16,21,22,24–30).

La búsqueda bibliográfica se actualizó y reprodujo en Scopus el 14 de julio de 2026. Se ejecutó la siguiente ecuación en los campos de título, resumen y palabras clave:

TITLE-ABS-KEY(("agro-industrial waste" OR "agroindustrial residue*" OR "agricultural by-product*" OR "residual biomass") AND (banana OR cacao OR cocoa OR rice OR sugarcane OR maize OR corn OR citrus OR shrimp) AND ("biotechnological valorization" OR bioconversion OR fermentation OR "enzymatic hydrolysis" OR biofertilizer* OR biopolymer* OR chitosan OR pectin OR bioethanol OR biogas)) AND PUBYEAR > 2021*

AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO(LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO(LANGUAGE,"Spanish"))

La búsqueda se limitó al periodo 2022-2026, a artículos originales y revisiones publicados en revistas científicas, en estado final y escritos en inglés o español. Con estos parámetros se recuperaron 459 registros.

La consulta mostró 459 resultados en la interfaz de Scopus. El CSV exportado contenía 455 títulos únicos; 454 disponían de DOI y EID, y uno carecía de ambos identificadores. La comparación por DOI, EID y título no mostró duplicados. Se excluyeron de la síntesis los documentos sin información directamente extraíble sobre composición, proceso, producto, rendimiento o aplicación, así como los temáticamente redundantes.

La comparación entre la exportación y la bibliografía identificó 16 publicaciones del corpus final procedentes de la búsqueda reproducida. Se añadieron 29 fuentes de búsquedas previas y rastreo retrospectivo para cubrir contexto ecuatoriano, análisis multicriterio y rendimientos experimentales. El corpus final reunió 45 fuentes únicas, organizadas por residuo, composición, proceso, producto, rendimiento y aplicación (1,7).

La trazabilidad se verificó mediante el índice de consistencia de la fuente (ICF), definido como:

$$ICF_k = \frac{D_k + T_k + F_k + R_k + E_k}{5} \quad 1)$$

En la ecuación, D_k indicó la presencia de DOI o identificador persistente; T_k , el cumplimiento del intervalo temporal; F_k , la publicación final en una revista científica; R_k , la relación directa con el objeto estudiado; y E_k , la disponibilidad de información extraíble. Cada componente recibió 0 o 1 y se exigió $ICF_k \geq 0,80$. Cuarenta y una fuentes alcanzaron 1,00; las referencias (21,31–33) obtuvieron 0,80 por ser anteriores a 2022, pero se conservaron por sus balances cuantitativos. El ICF evaluó trazabilidad documental, no riesgo de sesgo.

La matriz de decisión incluyó cinco criterios: disponibilidad, potencial biotecnológico, diversidad de productos, aplicabilidad productiva y aporte ambiental, tomando como referencia enfoques multicriterio aplicados a residuos agrícolas (34,35). Los puntajes s_{ij} se asignaron en una escala ordinal de 1 a 3 según la Tabla 1. Ante evidencia insuficiente o contradictoria se adoptó el nivel inferior.

Tabla 1. Criterios y reglas operativas utilizadas para la matriz de decisión.

Criterio	1 = Bajo	2 = Medio	3 = Alto
Disponibilidad	Generación limitada, localizada o irregular	Generación estacional o de alcance regional	Generación continua o de alta escala, respaldada documentalmente
Potencial biotecnológico	Una ruta preliminar de aprovechamiento	Dos rutas o evidencia principalmente de laboratorio	Tres o más rutas diferenciadas, respaldadas por al menos dos fuentes
Diversidad de productos	Una familia de productos	Dos o tres familias de productos	Cuatro o más familias de productos
Aplicabilidad productiva	Una aplicación conceptual	Aplicación en dos sectores o validación de laboratorio	Aplicación documentada en tres o más sectores o evidencia piloto/productiva
Aporte ambiental	Beneficio no demostrado	Un beneficio documentado o evidencia cualitativa	Dos o más beneficios respaldados por al menos dos fuentes

Fuente: Elaboración propia con base en enfoques multicriterio y ambientales (34,35).

Para diversidad, bioetanol, biogás y bioenergía se contaron como una familia; quitina, quitosano y biomateriales derivados se agruparon como biopolímeros, evitando duplicar productos de una misma ruta.

Los puntajes se normalizaron en el intervalo de 0 a 1 mediante la expresión:

$$z_{ij} = \frac{s_{ij} - 1}{2} \quad 2)$$

No se realizaron consultas Delphi ni se aplicaron métodos estadísticos para estimar la importancia relativa de los criterios. Debido a que no existía evidencia empírica suficiente para establecer una jerarquía entre ellos, se adoptó el vector de ponderación uniforme:

$$w = (0,20; 0,20; 0,20; 0,20; 0,20) \quad 3)$$

El índice de prioridad de cada residuo se calculó mediante:

$$P_i = \sum_{j=1}^5 w_j z_{ij} \quad 4)$$

Se estableció prioridad alta cuando $P_i \geq 0,70$, equivalente a una puntuación original de 12 a 15; prioridad media cuando $0,30 \leq P_i < 0,70$, equivalente a 8-11 puntos; y prioridad baja cuando $P_i < 0,30$, equivalente a 7 puntos o menos.

La estabilidad se examinó con 10 000 iteraciones y semilla 20260714. Los pesos se generaron uniformemente entre 0,16 y 0,24 y se renormalizaron para sumar 1. El procedimiento se ejecutó en Python 3.12.13 con NumPy 2.3.5.

Finalmente, se elaboró una matriz comparativa que relacionó cada biomasa con su ruta de transformación, producto y aplicación. La prioridad se estableció a partir de la disponibilidad documentada, el potencial biotecnológico, la aplicabilidad y el aporte ambiental, dentro de una perspectiva de economía circular (1,7,34,35).

RESULTADOS

Los residuos agroindustriales analizados no siguen un mismo patrón frente a las rutas de valorización biotecnológica disponibles. Lo que determina el potencial de cada material es su composición, la regularidad con que se genera dentro de la cadena productiva y la cantidad de productos que pueden derivarse de él. Con base en esa lógica, los residuos revisados se agruparon en tres categorías: materiales lignocelulósicos, residuos con contenido funcional relevante y subproductos de origen acuícola orientables hacia biopolímeros.

Dentro del primer grupo se ubicaron el bagazo de caña, la cascarilla y paja de arroz, los pseudotallos y raquis de banano y los residuos de maíz. Todos comparten una matriz basada en celulosa, hemicelulosa y lignina, adecuada para fermentación, hidrólisis, digestión anaerobia y producción de materiales biodegradables. Su abundancia y bajo costo son ventajas, pero normalmente requieren pretratamientos para liberar azúcares fermentables y mejorar la acción enzimática o microbiana (1,4,7,11–13,30).

Los residuos de cacao y cítricos conformaron el segundo grupo. Sus cáscaras, mucílagos y albedos contienen pectinas, compuestos fenólicos, azúcares fermentables y fracciones antioxidantes que permiten obtener ingredientes funcionales y productos agroalimentarios (14,15,24,25,36,37). En Ecuador, la cáscara y el mucílago de cacao merecen atención por su disponibilidad en zonas productoras y por la evidencia sobre fermentación y bioeconomía circular (14,22,38).

El tercer grupo correspondió a residuos de camarón. La quitina, las proteínas y los minerales los orientan hacia quitosano, hidrolizados proteicos y biomateriales. Los procesos de desmineralización, desproteinización y desacetilación difieren de la fermentación energética de los materiales lignocelulósicos, y sus productos tienen aplicaciones en agricultura, alimentos y tratamiento de aguas (16–19).

Tabla 2. Rutas biotecnológicas identificadas para residuos agroindustriales ecuatorianos.

Cadena productiva	Residuo principal	Composición predominante	Ruta biotecnológica posible	Producto esperado	Aplicación final
Banano	Pseudotallo, raquis y cáscara	Fibra, celulosa, hemicelulosa y azúcares	Fermentación, hidrólisis y digestión anaerobia	Biofertilizantes, bioetanol, biogás, fibras y biomateriales	Agricultura, energía y materiales biodegradables
Cacao	Cáscara y mucílago	Fibra, compuestos fenólicos, azúcares y pectinas	Fermentación, extracción de compuestos funcionales y bioconversión	Antioxidantes, bioinsumos, pectina y productos fermentados	Agroindustria, alimentos y agricultura
Arroz	Cascarilla y paja	Lignocelulosa, sílice y fibra	Pretratamiento, fermentación, digestión anaerobia y conversión termobiológica	Bioenergía, biochar, materiales adsorbentes y sustratos	Energía, ambiente y agricultura
Caña de azúcar	Bagazo y cachaza	Lignocelulosa, azúcares residuales y materia orgánica	Hidrólisis, fermentación y compostaje enriquecido	Bioetanol, enzimas, biofertilizantes y energía	Energía, agricultura e industria
Maíz	Rastrojos, tusa y residuos de procesamiento	Lignocelulosa y almidones residuales	Sacarificación, fermentación y compostaje	Bioetanol, ácidos orgánicos y biofertilizantes	Energía, agricultura y bioprocesos
Cítricos	Cáscara y albedo	Pectina, aceites esenciales, fibra y compuestos fenólicos	Extracción, fermentación e hidrólisis	Pectina, antioxidantes, aceites esenciales y bioetanol	Alimentos, agroindustria y bioproductos
Camarón	Exoesqueletos, cabezas y restos de procesamiento	Quitina, proteínas y minerales	Desmineralización, desproteínización, desacetilación e hidrólisis	Quitina, quitosano, hidrolizados proteicos y biomateriales	Agricultura, alimentos y tratamiento de aguas

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica (12–18,21–30,36–43).

La Tabla 2 confirma que no existe una ruta única de valorización. Banano, caña, arroz y maíz convergen en el aprovechamiento lignocelulósico; cacao y cítricos permiten

recuperar compuestos funcionales y pectinas; y camarón se orienta hacia biopolímeros. Esta diferenciación obliga a relacionar cada biomasa con el proceso que puede sostener según su composición (4,11–18,22,24,25,27–30,36–38).

Para complementar esta comparación cualitativa, se construyó un balance de masa teórico-documental por tonelada de residuo. En las rutas lignocelulósicas, la masa teórica de etanol se estimó mediante la expresión:

$$m_{\text{EtOH,teórico}} = M(0,568f_C + 0,581f_H) \quad 5)$$

donde M representa la masa seca del residuo y f_C y f_H corresponden a las fracciones másicas de celulosa y hemicelulosa. Los coeficientes 0,568 y 0,581 se obtienen al considerar la hidratación estequiométrica del glucano a glucosa (180/162) y del xilano a xilosa (150/132), seguida del rendimiento teórico de 0,511 kg de etanol por kilogramo de monosacárido. El rendimiento efectivo se expresó como:

$$m_{\text{EtOH,efectivo}} = m_{\text{EtOH,teórico}} \times \eta_p \times \eta_h \times \eta_f \quad 6)$$

donde η_p , η_h y η_f representan las eficiencias del pretratamiento, la hidrólisis y la fermentación. Para convertir la masa de etanol a volumen se utilizó una densidad de 0,789 kg L⁻¹. En el mucílago de cacao se consideró la conversión de azúcares directamente fermentables. Para pectina y quitosano se aplicó:

$$m_{\text{producto}} = M \times Y_{\text{extracción}} \quad 7)$$

Las ecuaciones se utilizaron como referencia teórica; los valores de la Tabla 3 corresponden a rendimientos documentados en las fuentes originales (14,19,20,30–33,44,45).

Debido a que las publicaciones no proporcionaron perfiles temporales equivalentes para las siete cadenas, no fue posible calcular una constante cinética común. Cuando los estudios informaron la concentración final y el tiempo de procesamiento, se calculó una productividad media mediante:

$$Q_p = \frac{C_p}{t} \quad 8)$$

En los demás casos se mantuvo el rendimiento global por unidad de residuo, sin asumir comportamientos cinéticos que no hubieran sido demostrados experimentalmente.

Tabla 3. Balances de masa y rendimientos documentales por cadena agroindustrial.

Cadena	Base del balance	Condición de procesamiento	Rendimiento documentado	Equivalente por tonelada	Principal limitación
Banano	1 t de pseudotallo seco	Sacarificación y fermentación simultánea durante aproximadamente 72 h	112 L de etanol t^{-1} ; productividad específica aproximada de $1,56 L t^{-1} h^{-1}$ (20)	112 L o 88,4 kg de etanol	La elevada humedad del pseudotallo fresco aumenta la masa transportada y la energía requerida para estabilización.
Cacao	1 t de mucílago fresco; densidad aproximada de $1 kg L^{-1}$	Fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i> a $25^{\circ}C$ durante 96 h	$71,91 g L^{-1}$ de etanol; productividad media de $0,75 g L^{-1} h^{-1}$ (14)	Aproximadamente 71,9 kg o 91 L de etanol	La concentración de azúcares cambia con la variedad, madurez y manejo poscosecha.
Arroz	1 t de paja seca	Pretratamiento combinado, hidrólisis enzimática y fermentación	214 mg de etanol g^{-1} de biomasa y eficiencia de bioconversión de 72,5 % (33)	214 kg o aproximadamente 271 L de etanol	La presencia de sílice y lignina condiciona la eficiencia del pretratamiento.
Caña de azúcar	1 t de bagazo seco	Pretratamiento ácido, hidrólisis y fermentación de azúcares C5 y C6	191,96 kg de etanol; rendimiento de fermentación de pentosas de 86,11 % (44)	243,3 L de etanol	El balance depende de la recuperación y fermentación conjunta de hexosas y pentosas.
Maíz	1 t de rastrojo seco	Pretratamiento, sacarificación y fermentación	480 $L t^{-1}$ como máximo teórico; 240 $L t^{-1}$ como estimación de proceso y 45 $L t^{-1}$ en un estudio experimental (31,45)	Entre 45 y 240 L frente a un máximo teórico de 480 L	El rendimiento cambia con el cultivar, humedad, cosecha y eficiencia de hidrólisis.

Cadena	Base del balance	Condición de procesamiento	Rendimiento documentado	Equivalente por tonelada	Principal limitación
Cítricos	1 t de cáscara seca pulverizada	Extracción ácida a 80 °C, pH 2, durante 90 min	21,63 % de pectina en cáscara de naranja y 32,53 % en cáscara de lima (32)	Entre 216 y 325 kg de pectina	El rendimiento depende de especie, madurez, secado, ácido y tiempo de extracción.
Camarón	1 t de exoesqueleto seco	Desmineralización, desproteínización y desacetilación; aproximadamente 52 h de contacto químico	13,96 % de quitosano respecto de la cáscara seca (19)	139,6 kg por tonelada seca	La especie, humedad, contenido mineral y grado de desacetilación afectan el rendimiento.

Fuente: *Elaboración propia a partir de rendimientos experimentales y balances documentales (14,19,20,31–33,44,45).*

Los balances evidencian que un potencial estequiométrico elevado no asegura un rendimiento efectivo equivalente. En los lignocelulósicos, las pérdidas durante pretratamiento, hidrólisis y fermentación explican la distancia entre el máximo teórico y el producto recuperado. Se documentaron 112 L de etanol por tonelada seca de pseudotallo de banano, 243,3 L t⁻¹ de bagazo de caña y aproximadamente 271 L t⁻¹ de paja de arroz (20,33,44).

La diferencia fue mayor para el maíz: frente a un máximo teórico de 480 L t⁻¹ de rastrojo seco, las estimaciones de proceso y el resultado experimental revisado fueron de 240 y 45 L t⁻¹, respectivamente (31,45). Para otras cadenas, el mucílago de cacao produjo 71,91 g L⁻¹ de etanol después de 96 h; la cáscara cítrica seca permitió recuperar 216–325 kg de pectina por tonelada; y el exoesqueleto seco de camarón alcanzó 139,6 kg t⁻¹ de quitosano (14,19,32).

Para ordenar esa información y establecer prioridades, se aplicó la matriz de decisión definida en la metodología, valorando cinco criterios por residuo: disponibilidad, potencial biotecnológico, diversidad de productos, aplicabilidad productiva y aporte ambiental. Los resultados normalizados se recogen en las Tablas 4a y 4b.

Tabla 4a. Puntuación de los criterios para la priorización de residuos agroindustriales ecuatorianos.

Residuo agroindustrial	Disponibilidad	Potencial biotecnológico	Diversidad de productos	Aplicabilidad productiva	Aporte ambiental	Puntaje total
Residuos de banano	3	3	3	3	3	15
Residuos de cacao	3	3	3	3	3	15
Residuos de caña de azúcar	3	3	2	3	3	14
Residuos de camarón	3	3	2	3	3	14
Residuos cítricos	2	3	3	3	3	14
Residuos de arroz	3	2	2	3	3	13
Residuos de maíz	2	2	2	2	2	10

Fuente: Elaboración propia. Los puntajes se asignaron mediante las reglas operativas de la Tabla 1.

Tabla 4b. Índice normalizado, prioridad y fuentes de respaldo por residuo.

Residuo agroindustrial	Índice Pi	Prioridad	Fuentes de respaldo
Residuos de banano	1,00	Alta	(20,21,23,39,40)
Residuos de cacao	1,00	Alta	(14,15,22,24)
Residuos de caña de azúcar	0,90	Alta	(12,13,26,41,44)
Residuos de camarón	0,90	Alta	(16–19)
Residuos cítricos	0,90	Alta	(25,32,36–38)
Residuos de arroz	0,80	Alta	(27,33,42,43)

Residuo agroindustrial	Índice Pi	Prioridad	Fuentes de respaldo
Residuos de maíz	0,50	Media	(28–31,43,45)

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes indicadas para cada cadena

Banano y cacao encabezaron la clasificación con 15 puntos y $P_i = 1,00$. Caña de azúcar, camarón y cítricos alcanzaron 14 puntos y $P_i = 0,90$; arroz obtuvo 13 puntos y $P_i = 0,80$; y maíz se ubicó en prioridad media con 10 puntos y $P_i = 0,50$. Las puntuaciones no representan mediciones experimentales nacionales, sino una síntesis ordinal de la evidencia citada en la última columna de la Tabla 4b.

El análisis de sensibilidad mantuvo la categoría de prioridad de los siete residuos en el 100 % de las 10 000 iteraciones. Banano y cacao permanecieron en $P_i = 1,00$; caña y camarón variaron entre 0,868 y 0,926; cítricos, entre 0,871 y 0,926; arroz, entre 0,756 y 0,841; y maíz permaneció en $P_i = 0,50$. Por tanto, la clasificación fue estable frente a variaciones pequeñas de los pesos, aunque esta robustez no sustituye la validación técnica y económica.

La disponibilidad anual no equivale a una oferta mensual constante. Maíz y cítricos presentan mayor estacionalidad y dispersión; en cambio, bagazo, cascarilla de arroz y exoesqueletos de camarón suelen concentrarse en instalaciones de procesamiento. La humedad, la baja densidad aparente, la distancia de recolección y la necesidad de estabilización pueden reducir la viabilidad de una ruta técnicamente prometedora. Por ello, la matriz debe interpretarse como una priorización tecnológica inicial y no como una demostración de rentabilidad.

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la valorización biotecnológica de los residuos agroindustriales ecuatorianos no puede plantearse mediante una ruta uniforme. El potencial de cada biomasa depende de su composición, de la forma en que se genera y de la relación entre el proceso de transformación y el producto esperado. Esta interpretación coincide con estudios que señalan que los residuos adquieren valor cuando sus características químicas y estructurales se vinculan con tecnologías y aplicaciones concretas (1,2,7–9,34,35). La matriz permitió ordenar esas diferencias, aunque sus puntajes deben entenderse como una priorización documental y no como una demostración de factibilidad industrial.

El banano y el cacao alcanzaron la mayor prioridad, pero por razones distintas. Los pseudotallos, raquis y cáscaras de banano combinan disponibilidad con rutas hacia fibras, nanocelulosa, bioenergía, biofertilizantes y materiales biodegradables (20,21,23,39,40). No obstante, su estructura lignocelulósica exige acondicionamiento, pretratamiento e hidrólisis. Como referencia, una tonelada de pseudotallo seco podría generar alrededor de 112 L de etanol mediante sacarificación y fermentación simultánea

(20); esta cifra no debe aplicarse al material fresco, cuyo elevado contenido de agua incrementa las necesidades de transporte y acondicionamiento. El cacao responde a una lógica funcional: la cáscara y el mucílago contienen compuestos fenólicos, pectinas y azúcares fermentables (14,15,22,24). En el mucílago se reportaron 71,91 g L⁻¹ de etanol después de 96 h, equivalentes aproximadamente a 91 L por tonelada fresca (14). Su ventaja es la disponibilidad directa de azúcares; sus limitaciones son el deterioro microbiológico y la variabilidad de la composición.

La caña y el arroz también mostraron alta prioridad, aunque su aprovechamiento está condicionado por la recalcitrancia lignocelulósica. Para el bagazo de caña se documentaron 191,96 kg de etanol por tonelada seca, equivalentes a 243,3 L, cuando se recuperan y fermentan hexosas y pentosas (44). En paja de arroz se registraron 214 mg de etanol por gramo, aproximadamente 271 L por tonelada seca, después de un pretratamiento combinado (33). Estos rendimientos evidencian el potencial de ambas cadenas, pero dependen de la eficiencia del pretratamiento, la hidrólisis, el consumo de enzimas y la capacidad microbiana para utilizar las fracciones liberadas (12,13,26,27,33,41–44).

El maíz quedó en prioridad media porque la evidencia muestra una brecha entre el potencial teórico y el rendimiento alcanzable. Para el rastrojo seco se estimó un máximo cercano a 480 L de etanol por tonelada, frente a una estimación de proceso de aproximadamente 240 L t⁻¹ y un resultado experimental de 45 L t⁻¹ (31,45). Estas diferencias responden a la composición, humedad, pretratamiento y microorganismos empleados. Aunque también existen rutas hacia biosurfactantes, materiales celulósicos y biohidrógeno (28–30,43), todavía se requiere delimitar qué residuo y proceso serían más apropiados para las condiciones ecuatorianas.

Los cítricos y el camarón demuestran que la valorización no debe limitarse a la producción de energía. La extracción ácida de cáscaras cítricas permitió recuperar entre 21,63 y 32,53 % de pectina en base seca, equivalente a 216–325 kg por tonelada (32), además de existir alternativas para aceites esenciales, envases y compuestos funcionales (25,36–38). En residuos de camarón se reportó un rendimiento de quitosano de 13,96 % respecto de la cáscara seca, equivalente a 139,6 kg por tonelada seca (19). Sin embargo, su obtención requiere desmineralización, desproteinización y desacetilación, con consumo de reactivos y generación de efluentes que deben incorporarse a la evaluación ambiental (16–19).

La matriz también mostró que la abundancia anual no equivale a disponibilidad operativa. Maíz y cítricos presentan mayor estacionalidad y dispersión, mientras que bagazo, cascarilla de arroz y exoesqueletos de camarón tienden a concentrarse en ingenios, piladoras o plantas procesadoras. La humedad, la baja densidad aparente, la distancia de recolección y la necesidad de estabilización pueden reducir el beneficio de una ruta técnicamente viable (3,5,22,23). Esta interacción explica por qué la selección debe considerar simultáneamente variables productivas, tecnológicas y ambientales, como plantean los enfoques multicriterio aplicados a residuos agrícolas (34,35).

La estabilidad observada en el análisis de sensibilidad respalda la clasificación general frente a pequeñas variaciones de los pesos, pero no elimina las limitaciones del estudio.

Los rendimientos recopilados proceden de condiciones experimentales y bases de cálculo diferentes, por lo que funcionan como órdenes de magnitud y no como predicciones industriales para Ecuador. Tampoco se evaluaron costos, disponibilidad mensual ni impactos mediante análisis de ciclo de vida. En consecuencia, banano y cacao constituyen alternativas iniciales de mayor interés, mientras que la implementación de cualquiera de las rutas deberá confirmarse con caracterización local, balances de masa, evaluación tecnoeconómica y ensayos a escala de laboratorio y piloto.

CONCLUSIONES

Los residuos agroindustriales ecuatorianos evaluados no presentan un potencial uniforme de valorización biotecnológica. Su aprovechamiento depende de la composición del material, la regularidad con que se genera, la complejidad tecnológica de la ruta de transformación y el tipo de producto final que puede obtenerse. Los residuos lignocelulósicos, como bagazo de caña, cascarilla y paja de arroz, pseudotallos y raquis de banano, muestran potencial para procesos fermentativos, bioenergía, biofertilizantes y biomateriales; sin embargo, su transformación puede requerir pretratamientos que condicionan la viabilidad técnica y económica. En cambio, los residuos de cacao y cítricos se orientan mejor hacia la recuperación de compuestos funcionales, pectinas, fracciones antioxidantes y moléculas de interés industrial. Los residuos de camarón siguen una lógica diferente, centrada en la obtención de quitina, quitosano e hidrolizados proteicos a partir del exoesqueleto.

La matriz de decisión permitió ordenar información dispersa y establecer una priorización inicial basada en criterios comparables. Banano y cacao obtuvieron los puntajes más altos, aunque por razones distintas: el banano destacó por su disponibilidad, diversidad de fracciones residuales y amplitud de rutas posibles, mientras que el cacao sobresalió por el valor funcional de sus subproductos. Caña de azúcar, camarón, cítricos y arroz también se ubicaron en alta prioridad, pero su aprovechamiento exige una selección más precisa del proceso, del producto final y de las condiciones operativas. El maíz se clasificó en prioridad media, no por ausencia de potencial, sino por la necesidad de delimitar mejor el tipo de residuo, la ruta biotecnológica y la aplicación esperada.

La valorización biotecnológica de residuos agroindustriales no debe interpretarse únicamente como una estrategia de manejo de desechos, sino como una oportunidad productiva, ambiental y tecnológica dentro de cadenas ya consolidadas en el país. No obstante, la abundancia de biomasa no garantiza por sí sola la factibilidad de aprovechamiento. La decisión sobre qué residuo priorizar debe considerar también barreras de transformación, costos de acondicionamiento, estabilidad del producto, demanda potencial y capacidades locales de procesamiento.

En este sentido, la matriz comparativa y los balances teórico-documentales construidos en el presente trabajo constituyen herramientas de orientación inicial para seleccionar residuos y rutas de valorización con mayor pertinencia para el contexto ecuatoriano. Los balances permiten establecer órdenes de magnitud para bioetanol, pectina y quitosano, pero no deben interpretarse como rendimientos obtenidos directamente en

instalaciones nacionales. Los pasos siguientes deben centrarse en ensayos con residuos recolectados en Ecuador y pruebas piloto que permitan evaluar composición, humedad, rendimiento efectivo, estabilidad, escalabilidad, costos de recolección y operación, consumo de reactivos e impacto ambiental de las rutas priorizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Prado-Acebo I, Cubero-Cardoso J, Lu-Chau TA, Eibes G. Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*. 2024 Jun 30;183:42–52. doi:10.1016/j.wasman.2024.05.001
2. Bala S, Garg D, Sridhar K, Inbaraj BS, Singh R, Kamma S, et al. Transformation of Agro-Waste into Value-Added Bioproducts and Bioactive Compounds: Micro/Nano Formulations and Application in the Agri-Food-Pharma Sector. *Bioengineering*. 2023 Feb;10(2):152. doi:10.3390/bioengineering10020152
3. Weldesemayat Sileshi G, Barrios E, Lehmann J, Tubiello FN. An organic matter database (OMD): consolidating global residue data from agriculture, fisheries, forestry and related industries. *Earth System Science Data*. 2025 Feb 3;17(2):369–91. doi:10.5194/essd-17-369-2025
4. Escudero-Curiel S, Giráldez A, Pazos M, Sanromán Á. From Waste to Resource: Valorization of Lignocellulosic Agri-Food Residues through Engineered Hydrochar and Biochar for Environmental and Clean Energy Applications—A Comprehensive Review. *Foods*. 2023 Jan;12(19):3646. doi:10.3390/foods12193646
5. Bermúdez JMS, Varela GAZ, Cedeño REC, Riera MA. Estudio de residuos biomásicos agrícolas para la instalación de una biorefinería de pequeña escala. *La Granja*. 2025 Aug 26;42(2):136–53. doi:10.17163/lgr.n42.2025.09
6. Nicolás García M, Borrás Enríquez A, González Escobar J, Calva Cruz O, Pérez Pérez V, Sánchez Becerril M. Phenolic Compounds in Agro-Industrial Waste of Mango Fruit: Impact on Health and Its Prebiotic Effect – a Review. *Pol J Food Nutr Sci*. 2023 Feb 21;5–23. doi:10.31883/pjfn/159361
7. Ezeorba TPC, Okeke ES, Mayel MH, Nwuche CO, Ezike TC. Recent advances in biotechnological valorization of agro-food wastes (AFW): Optimizing integrated approaches for sustainable biorefinery and circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*. 2024 Jun 1;26:101823. doi:10.1016/j.biteb.2024.101823
8. Burbano-Cuasapud JM, Solarte-Toro JC, Restrepo-Serna DL, Cardona Alzate CA. Process Sustainability Analysis of Biorefineries to Produce Biofertilizers and Bioenergy from Biodegradable Residues. *Fermentation*. 2023 Sep;9(9):788. doi:10.3390/fermentation9090788
9. Yafetto L, Odamtten GT, Wiafe-Kwagyan M. Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: A review of the global and Ghanaian case. *Heliyon*. 2023 Apr 1;9(4):e14814. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14814
10. Sundaram T, Govindarajan RK, Vinayagam S, Krishnan V, Nagarajan S, Gnanasekaran GR, et al. Advancements in biosurfactant production using agro-industrial waste for industrial and environmental applications. *Front Microbiol*. 2024 Feb 5;15:1357302. doi:10.3389/fmicb.2024.1357302
11. Jayanthi B, Vinoth S, Hariharan M, Raja RK, Kamaraj C, Narayanan M. Valorization of agro-industry wastes for nanocellulose fabrication and its multifunctional

- applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2024 Apr 1;57:103124. doi:10.1016/j.bcab.2024.103124
12. Matsueda Y, Antunes E. A review of current technologies for the sustainable valorisation of sugarcane bagasse. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024 Dec 1;12(6):114900. doi:10.1016/j.jece.2024.114900
13. Kamboj A, Sadh PK, Yadav B, Kumari A, Kumar R, Surekha, et al. Unravelling the potential of sugarcane bagasse: An eco-friendly and inexpensive agro-industrial waste for the production of valuable products using pretreatment processes for sustainable bio-economy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024 Dec 1;12(6):114461. doi:10.1016/j.jece.2024.114461
14. Zambrano A, Cobos V, Luna T, Duarte J, Barzallo D. Optimization of Bioethanol Production from Cocoa Mucilage (*Theobroma cacao*) Using a Commercial and a Genetically Modified Strain of *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Agriculture and Biosciences*. 2026 Feb 12. doi:10.47278/journal.ijab/2026.039
15. Guzmán-Armenteros TM, Guerra LS, Ruales J, Ramos-Guerrero L. Ecuadorian Cacao Mucilage as a Novel Culture Medium Ingredient: Unveiling Its Potential for Microbial Growth and Biotechnological Applications. *Foods*. 2025 Jan;14(2):261. doi:10.3390/foods14020261
16. Pérez WA, Marín JA, López JN, Burgos MA, Rios LA. Development of a Pilot-ecofriendly Process for Chitosan Production from Waste Shrimp Shells. *Environmental Processes*. 2022 Sep 2;9(3):55. doi:10.1007/s40710-022-00605-8
17. Lakshmi DS, Ravindran L, Mary PJM, Rathika G, Sreekala MS, Munisamy S. Valorization of Crustacean Shells: Preparation, Characterization, and Chemical Modification of Nano-Chitin Biopolymer Membrane for Application in Water Purification. *Waste Biomass Valor*. 2024 Nov 1;15(11):6067–90. doi:10.1007/s12649-024-02601-5
18. Bautista-Hernández I, Gómez-García R, Martínez-Ávila GCG, Pintado M. Solid state fermentation (SSF) on marine biomasses and their by-products - a new research biorefinery frontier for the obtention of innovative and novel value-added compounds towards industrial applications. *Journal of Environmental Management*. 2026 Jun 15;410:129973. doi:10.1016/j.jenvman.2026.129973
19. Aberoumand A, Chabavi M. Extraction and Quality Control of Chitin and Chitosan from Shrimp (Vanami) *Litopenaeus Vanamei* Shells Wastes. *Natural Product Communications*. 2024 Oct 1;19(10):1934578X241291383. doi:10.1177/1934578X241291383
20. Guerrero AB, Ballesteros I, Ballesteros M. The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. *Fuel*. 2018 Feb 1;213:176–85. doi:10.1016/j.fuel.2017.10.105
21. Kumar V, Chakraborty P, Janghu P, Umesh M, Sarojini S, Pasrija R, et al. Potential of banana based cellulose materials for advanced applications: A review on properties and technical challenges. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2023 Dec 1;6:100366. doi:10.1016/j.carpta.2023.100366
22. Alava C, Moncayo S, Galarza L. Cocoa husk in the circular bioeconomy: a perspective from Ecuador and other producer countries. *Front Food Sci Technol*. 2025 Dec 18;5. doi:10.3389/frfst.2025.1726187
23. Hazarika U, Saikia P, Choudhury M, Das M. Unlocking the potential of banana peel waste – A multi-faceted review emphasizing its nutrient profile, extraction

- strategies, and prospective utility within the context of circular waste bioeconomy. *Applied Food Research*. 2026 Jun;6(1):101675. doi:10.1016/j.afres.2026.101675
24. Sánchez M, Laca A, Laca A, Díaz M. Cocoa Bean Shell: A By-Product with High Potential for Nutritional and Biotechnological Applications. *Antioxidants*. 2023 May;12(5):1028. doi:10.3390/antiox12051028
 25. Sharma P, Vishvakarma R, Gautam K, Vimal A, Kumar Gaur V, Farooqui A, et al. Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*. 2022 May 1;351:127064. doi:10.1016/j.biortech.2022.127064
 26. Ntunka MG, Makhathini TP, Khumalo SM, Bwapwa JK, Tshibangu MM. Recent Developments in the Valorization of Sugarcane Bagasse Biomass via Integrated Pretreatment and Fermentation Strategies. *Fermentation*. 2025 Nov;11(11):632. doi:10.3390/fermentation11110632
 27. Li Z, Zheng Z, Li H, Xu D, Li X, Xiang L, et al. Review on Rice Husk Biochar as an Adsorbent for Soil and Water Remediation. *Plants*. 2023 Jan;12(7):1524. doi:10.3390/plants12071524
 28. Nunes HMAR, Vieira IMM, Santos BLP, Silva DP, Ruzene DS. Biosurfactants produced from corncob: a bibliometric perspective of a renewable and promising substrate. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2022 Feb 1;52(2):123–34. doi:10.1080/10826068.2021.1929319 PubMed PMID: 34081569.
 29. Gutiérrez P, Aldas M, Gavilanes D, Cadena F, Valle V. Corn cob valorization: Synthesis of a polymer based on crystalline cellulose with poly(ethylene glycol) diacrylate and N-vinylcaprolactam. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025 Jul;27:101019. doi:10.1016/j.clet.2025.101019
 30. Aghaei S, Karimi Alavijeh M, Shafiei M, Karimi K. A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*. 2022 Jun 1;161:106447. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106447
 31. Mensah MB, Jumpah H, Boadi NO, Awudza JAM. Assessment of quantities and composition of corn stover in Ghana and their conversion into bioethanol. *Scientific African*. 2021 Jul;12:e00731. doi:10.1016/j.sciaf.2021.e00731
 32. Akhter MostJ, Sarkar S, Sharmin T, Mondal SC. Extraction of pectin from powdered citrus peels using various acids: An analysis contrasting orange with lime. *Applied Food Research*. 2024 Dec;4(2):100614. doi:10.1016/j.afres.2024.100614
 33. Sawhney D, Vaid S, Bangotra R, Sharma S, Dutt HC, Kapoor N, et al. Proficient bioconversion of rice straw biomass to bioethanol using a novel combinatorial pretreatment approach based on deep eutectic solvent, microwave irradiation and laccase. *Bioresour Technol*. 2023 May;375:128791. doi:10.1016/j.biortech.2023.128791 PubMed PMID: 36871702.
 34. Lombardi P, Todella E. Multi-Criteria Decision Analysis to Evaluate Sustainability and Circularity in Agricultural Waste Management. *Sustainability*. 2023 Jan;15(20):14878. doi:10.3390/su152014878
 35. Orlandella I, Fiore S. Life Cycle Assessment of the Production of Biofertilizers from Agricultural Waste. *Sustainability*. 2025 Jan;17(2):421. doi:10.3390/su17020421

36. Frosi I, Balduzzi A, Moretto G, Colombo R, Papetti A. Towards Valorization of Food-Waste-Derived Pectin: Recent Advances on Their Characterization and Application. *Molecules*. 2023 Jan;28(17):6390. doi:10.3390/molecules28176390
37. Díaz-Muñoz LL, Castañeda-Aude JE, Landín-Sandoval VJ, Lozano-Álvarez JA, Escárcega-González CE. Valorization and Harnessing Citrus Waste: Focus on Green Synthesis of Metal Nanoparticles with Antimicrobial Applications and Other Potential Uses. *Food Reviews International*. 2026 Mar 31;42(4):2116–61. doi:10.1080/87559129.2025.2541849
38. Revathi V, Bora S, Afzia N, Ghosh T. Orange peel composition, biopolymer extraction, and applications in paper and packaging sector: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2025 Feb 1;43:101908. doi:10.1016/j.scp.2025.101908
39. Fiallos-Cardenas M, Gavin C, Huilcarema-Enríquez K, Cumbicus-Bravo A, Pozo F. Innovation in obtaining bacterial nanocellulose from banana rachis: Effects of ozone treatment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025 Jun;11:101044. doi:10.1016/j.csee.2024.101044
40. Romero-Cárdenas E, Romero-Romero BR, Tapia-Núñez DW, Zúñiga-Santillán XL, Valenzuela-Cobos JD. Sustainable paper from agricultural residues: differentiating treatment effects in banana pseudostem fibers using X-STATIS multiblock analysis. *Front Sustain*. 2025 Jul 23;6:1628095. doi:10.3389/frsus.2025.1628095
41. Pérez-Contreras S, Hernández-Rosas F, Lizardi-Jiménez MA, Herrera-Corredor JA, Baltazar-Bernal O, Avalos-de la Cruz DA, et al. Sugarcane Industry By-Products: A Decade of Research Using Biotechnological Approaches. *Recycling*. 2025 Aug;10(4):154. doi:10.3390/recycling10040154
42. Liang D, Wei C, Liu D, Liu X, Xiao S, Wang Y, et al. Research Progress Review on the Activation of Bioactive Substances by Targeted Fermentation of Rice Bran. *Foods*. 2026 Jan;15(11):1881. doi:10.3390/foods15111881
43. Prado ERL, Rial RC. Biohydrogen production from residual biomass: The potential of wheat, corn, rice, and barley straw – recent advances. *Bioresource Technology*. 2025 Sep 1;432:132638. doi:10.1016/j.biortech.2025.132638
44. Dionísio SR, Santoro DCJ, Bonan CIDG, Soares LB, Biazzi LE, Rabelo SC, et al. Second-generation ethanol process for integral use of hemicellulosic and cellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. *Fuel*. 2021 Nov 1. doi:10.1016/j.fuel.2021.121290
45. Kadam KL, McMillan JD. Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production. *Bioresour Technol*. 2003 May;88(1):17–25. doi:10.1016/s0960-8524(02)00269-9 PubMed PMID: 12573559.