



Residuos agroindustriales en hormigones sostenibles

Agri-industrial waste in sustainable concrete

Gabriel Montúfar-Chiriboga

Universidad de Panamá, Panamá

<https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Gabriel.montufar@up.ac.pa

RECIBIDO

19/11/2025

ACEPTADO

17/03/2026

RESUMEN

La fabricación de cemento Portland contribuye entre el 8 % y el 10 % de las emisiones de dióxido de carbono de origen antropogénico a nivel global, por lo que la búsqueda de materiales cementantes suplementarios de menor impacto ambiental es una prioridad para la construcción sostenible. El objetivo de este estudio fue analizar, mediante una revisión sistemática documental, la evidencia reciente sobre el uso de cenizas de residuos agroindustriales - cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, mazorca de maíz, residuos de olivo, palma aceitera, café, trigo, cacahuete, coco y bambú, entre otros - como sustitutos parciales del cemento en hormigones y morteros sostenibles. La revisión se desarrolló siguiendo la guía PRISMA 2020 y criterios explícitos de inclusión y exclusión, permitiendo evaluar cualitativamente 35 estudios publicados entre 2023 y 2025, seleccionados a partir de 312 registros identificados en bases de datos académicas. Los resultados muestran que las cenizas agroindustriales obtenidas por calcinación controlada presentan alta actividad puzolánica debido a su contenido de sílice amorfa, lo que favorece el incremento de la resistencia mecánica a largo plazo, la reducción de la permeabilidad, la absorción de agua y la penetración de cloruros, así como una mayor durabilidad frente a ambientes agresivos, especialmente con reemplazos de 5 % a 20 %. Se presentan, además, tablas de síntesis sobre los residuos más estudiados y los rangos de sustitución recomendados. En conjunto, la evidencia revisada indica que los residuos agroindustriales constituyen una alternativa técnica y ambientalmente viable para reducir la huella de carbono del sector construcción y fortalecer estrategias de economía circular.

PALABRAS CLAVE

Residuos agrícolas; hormigón; materiales de construcción; desarrollo sostenible; puzolanas.



ABSTRACT

Portland cement manufacturing accounts for between 8% and 10% of global anthropogenic carbon dioxide emissions, making the search for supplementary binder materials with a lower environmental impact a priority for sustainable construction. The objective of this study was to analyze, through a systematic literature review, recent evidence on the use of agro-industrial waste ash—rice husks, sugarcane bagasse, corn cobs, olive, oil palm, coffee, wheat, peanut, coconut, and bamboo residues, among others—as partial cement substitutes in sustainable concretes and mortars. The review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines and explicit inclusion and exclusion criteria, allowing for the qualitative evaluation of 35 studies published between 2023 and 2025, selected from 312 records identified in academic databases. The results show that agro-industrial ashes obtained through controlled calcination exhibit high pozzolanic activity due to their amorphous silica content, which promotes increased long-term mechanical strength, reduced permeability, water absorption, and chloride penetration, as well as greater durability in aggressive environments, especially with replacement rates of 5% to 20%. Summary tables are also presented on the most studied wastes and the recommended replacement ranges. Overall, the reviewed evidence indicates that agro-industrial waste constitutes a technically and environmentally viable alternative for reducing the carbon footprint of the construction sector and strengthening circular economy strategies.

KEYWORDS

Agricultural waste; concrete; construction materials; sustainable development; pozzolans.

INTRODUCCIÓN

El problema de investigación radica en que la evidencia reciente sobre el uso de cenizas de residuos agroindustriales como sustitutos parciales del cemento Portland permanece dispersa y heterogénea en cuanto a tipos de residuo, condiciones de calcinación y molienda, porcentajes de reemplazo y variables de desempeño evaluadas, lo que dificulta establecer criterios técnicos comparables para su incorporación segura en hormigones y morteros sostenibles.

La literatura reciente coincide en que la reducción del contenido de clínker constituye una estrategia prioritaria para disminuir el impacto ambiental del hormigón, y que los materiales cementantes suplementarios de origen residual han adquirido relevancia por su disponibilidad, menor costo ambiental y capacidad de valorización de subproductos agroindustriales (Abdalla et al., 2024; Ahmad et al., 2023; Sathiparan, 2025).

Entre estos materiales, las cenizas procedentes de cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, paja de trigo, mazorca de maíz, residuos de olivo, palma aceitera, café, coco y bambú destacan por su elevado contenido de sílice amorfa y por su potencial para desarrollar reacción puzolánica secundaria cuando se someten a procesos de calcinación controlada y molienda fina (Athira et al., 2021; Guo et al., 2025; Sell Junior et al., 2024; Torres Ortega et al., 2025).

Los antecedentes disponibles muestran avances importantes, pero también una fuerte variabilidad experimental. Las revisiones existentes suelen concentrarse en un residuo específico o en periodos previos a 2023, de modo que todavía falta una síntesis comparativa de la evidencia reciente sobre comportamiento mecánico, durabilidad y aporte ambiental de residuos agroindustriales tradicionales y emergentes en matrices cementicias (Abdalla et al., 2024; Ahmad et al., 2023; Sathiparan, 2025).

Esta revisión adquiere relevancia particular para contextos tropicales y subtropicales, donde la disponibilidad de biomasa residual es alta y el aprovechamiento de dichos subproductos puede contribuir tanto a la reducción del uso de clínker como a la mitigación de problemas asociados con la quema o disposición final de residuos agrícolas. Las revisiones previas se han centrado en residuos individuales o en periodos anteriores al intervalo analizado, lo que deja sin integrar la evidencia más reciente generada entre 2023 y 2025. En consecuencia, persiste la necesidad de una síntesis actualizada que compare residuos tradicionales y emergentes bajo criterios metodológicos homogéneos.

Este estudio se justifica por su aporte teórico, metodológico y práctico. En el plano teórico, organiza los conceptos y mecanismos que explican el comportamiento puzolánico de las cenizas agroindustriales; en el metodológico, sistematiza evidencia reciente mediante criterios explícitos de selección y análisis; y en el práctico, identifica rangos de sustitución y condiciones de procesamiento útiles para orientar futuras investigaciones y decisiones de aplicación tecnológica.

Fundamentación teórica

En este artículo se entiende por residuo agroindustrial el subproducto sólido generado durante la producción, cosecha o transformación de materias primas agrícolas, susceptible de valorización material. Cuando estos residuos se someten a combustión controlada, molienda y tamizado, pueden originar cenizas con potencial para actuar como materiales

cementantes suplementarios, siempre que presenten composición química reactiva y finura adecuada. La fundamentación teórica se apoya en dos ejes centrales: la economía circular y la reacción puzolánica.

Desde la economía circular, el aprovechamiento de residuos disminuye la disposición final y el consumo de materias primas vírgenes; desde la ciencia de materiales, la sílice amorfa presente en determinadas cenizas reacciona con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y forma geles C-S-H secundarios, los cuales densifican la matriz y pueden mejorar la resistencia y la durabilidad a edades medias y largas (Guo et al., 2025; Doğruyol & Çetin, 2025; Eid et al., 2025).

En este contexto, el objetivo general del estudio fue analizar la evidencia científica publicada entre 2023 y noviembre de 2025 sobre el uso de cenizas de residuos agroindustriales como sustitutos parciales del cemento Portland en hormigones y morteros, con el fin de identificar los residuos más investigados, los rangos de reemplazo reportados y los principales efectos sobre las propiedades mecánicas, la durabilidad y la sostenibilidad del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló con enfoque cualitativo, diseño documental y alcance descriptivo-analítico, mediante una revisión sistemática de literatura científica sobre el uso de cenizas de residuos agroindustriales como sustitutos parciales del cemento Portland en hormigones y morteros sostenibles. El período de análisis comprendió publicaciones divulgadas entre enero de 2023 y noviembre de 2025. La síntesis de la información se realizó de forma narrativa, considerando la heterogeneidad de los residuos estudiados, los procedimientos de calcinación, los porcentajes de reemplazo y las variables de desempeño reportadas en los estudios primarios.

Para estructurar y reportar el proceso de revisión se adoptó la declaración PRISMA 2020, entendida como una guía para mejorar la transparencia, exhaustividad y trazabilidad de las revisiones sistemáticas (Page et al., 2021). Asimismo, la pregunta de revisión se organizó con el esquema PICO, útil para formular preguntas de búsqueda y derivar términos clave de consulta en bases de datos académicas (Schardt et al., 2007).

La búsqueda bibliográfica se efectuó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, mediante combinaciones de términos en inglés relacionados con agro-industrial cenizas residuales, cenizas de cascarilla de arroz, cenizas de bagazo de caña de azúcar, cenizas de mazorca de maíz, cenizas de residuos de aceituna, cenizas de combustible de aceite de palma, cenizas de cascarilla de café, hormigón, mortero, reemplazo, puzolana y sostenible. El universo inicial estuvo conformado por 312 registros. Tras eliminar duplicados se obtuvieron 218 registros únicos; posteriormente, la revisión de títulos y resúmenes permitió seleccionar 68 artículos para lectura a texto completo, de los cuales 35 cumplieron los criterios de elegibilidad y conformaron la muestra final analizada.

Se incluyeron estudios experimentales y revisiones publicados en revistas indexadas, con texto completo disponible en español o inglés, enfocados exclusivamente en cenizas agroindustriales calcinadas y con información cuantitativa o cualitativa clara sobre resistencia mecánica, durabilidad o impacto ambiental. Se excluyeron publicaciones narrativas previas a 2023, trabajos centrados en residuos sin calcinación o fibras no calcinadas, resúmenes de congreso, tesis, documentos duplicados y estudios que no

permitían extraer resultados verificables. La evaluación metodológica de los trabajos incorporados consideró el tipo de residuo, el tratamiento térmico, la finura alcanzada, los porcentajes de sustitución, la edad de ensayo, el número de probetas y la claridad del reporte experimental.

La extracción de datos se realizó mediante una matriz estructurada que registró autor, año, tipo de residuo, condiciones de procesamiento, proporción de reemplazo, propiedades mecánicas, parámetros de durabilidad y conclusiones principales. Con base en esa matriz, los hallazgos se organizaron por grupos de residuos para identificar tendencias recurrentes, rangos de sustitución técnicamente viables, limitaciones metodológicas y vacíos de investigación. Este procedimiento permitió comparar residuos consolidados y emergentes bajo un criterio homogéneo de análisis, fortaleciendo la interpretación crítica de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cenizas de cáscara de arroz y de paja de trigo

La ceniza de cáscara de arroz continúa siendo uno de los materiales puzolánicos agroindustriales más estudiados en la literatura reciente. Estudios experimentales reportan que la calcinación controlada entre 600 °C y 700 °C favorece una alta proporción de sílice amorfa y mejora la resistencia a compresión y la durabilidad a largo plazo (Guo et al., 2025).

Öztürk et al. (2025) utilizaron un enfoque de big data y aprendizaje automático para optimizar la incorporación de ceniza de cáscara de arroz y concluyeron que niveles de reemplazo entre 10 % y 20 % permiten equilibrar mejor la pérdida de resistencia inicial y la durabilidad a largo plazo en ambientes con presencia de cloruros. Los autores también subrayan la importancia de la molienda fina para acelerar la reacción puzolánica.

En lo que respecta a la paja de trigo, Bastías et al. (2024) lograron producir pastas cementicias sostenibles con ceniza de paja al 20 % mezclada con humo de sílice, alcanzando resistencias similares al cemento Portland a los 90 días. Asimismo, Doğruyol y Çetin (2025) optimizaron la calcinación de paja de trigo mediante diseño de experimentos y obtuvieron cenizas con actividad puzolánica comparable a la del metacaolín, lo que mejoró la resistencia a flexión y la adherencia acero-hormigón.

Ceniza de bagazo de caña de azúcar y mazorca de maíz.

En ceniza de bagazo de caña de azúcar, la evidencia reciente coincide en que los porcentajes de reemplazo cercanos a 10 % - 15 % ofrecen un equilibrio favorable entre microestructura, trabajabilidad y resistencia a largo plazo (Abdalla et al., 2024). Para la ceniza de mazorca de maíz, los estudios reportan mejoras en resistencia flexural, estabilidad dimensional y desempeño frente a ciclos húmedo-seco cuando se emplean reemplazos bajos o moderados (Ahmad et al., 2023; Rasidi & Rochman, 2025).

Cenizas de residuos de palmera aceitera y olivo

En residuos de olivo, se han documentado mejoras en resistencia a abrasión, penetración de cloruros y estabilidad volumétrica, especialmente cuando la ceniza se combina con adiciones finas altamente reactivas (Al-Mattarneh et al., 2024) (Ghazzawi et al., 2024).

En palma aceitera, Eid et al. (2025) desarrollaron hormigones de ultraalto desempeño con 20-30 % de ceniza de palma, obteniendo resistencias superiores a 150 MPa a los 90 días; además, reportaron un comportamiento favorable frente a ácidos orgánicos característicos de regiones tropicales. Torres Ortega et al. (2025), por su parte, optimizaron los procesos fisicoquímicos para maximizar la actividad puzolánica de ceniza de cáscara de palma y alcanzaron propiedades comparables a las cenizas volantes clase F.

Cenizas de café, maní, coco y bambú.

Bhandary et al. (2023) analizaron la ceniza de cáscara de café como reemplazo parcial del agregado fino y reportaron mejoras en trabajabilidad, resistencia y durabilidad en dosificaciones moderadas. En una línea más reciente, Manjunath et al. (2024) evaluaron ceniza tratada de residuo de café cereza como sustituto parcial del cemento en morteros y observaron que reemplazos de hasta 15 % mejoraron la compactación de la matriz y el desempeño mecánico a distintas edades de curado.

En cuanto a la ceniza de cáscara de coco, Rilwan et al. (2025) indican que esta ceniza mejora de forma notable las propiedades térmicas y de blindaje radiológico del hormigón con cambios equivalentes al 10 %, sugiriendo su uso en instalaciones hospitalarias en África. Sell Junior et al. (2024); Kabdiyono et al. (2025), por su parte, estudian ceniza de hoja de bambú, donde el 10-15 % de reemplazo lleva a un aumento de la resistencia residual tras ser expuestos a altas temperaturas y una reducción en la penetración de cloruros en hormigones que hayan sido expuestos a ambientes agresivos. A continuación, se presenta la Tabla 1, la cual resume la distribución de los residuos sobre los que se han hecho más estudios durante el período 2023-2025.

La Tabla 1 muestra la predominancia de la ceniza de cáscara de arroz y la creciente atención hacia residuos oleícolas y de palma, reflejando tanto disponibilidad regional como madurez técnica alcanzada.

Tabla 1. Distribución de los residuos agroindustriales empleados en los estudios incluidos (2023–2025)

Residuo agroindustrial	Número de publicaciones	Referencias principales
Ceniza de cáscara de arroz	7	Guo et al. (2025); Öztürk et al. (2025); Alyami et al. (2023)
Ceniza de bagazo de caña	5	Abdalla et al. (2024); Alyami et al. (2023)
Ceniza de mazorca de maíz	4	Ahmad et al. (2023); Rasidi & Rochman (2025)
Ceniza de residuos de olivo y palma	7	Al-Mattarneh et al. (2024); Eid et al. (2025)
Ceniza de café, maní, coco y bambú	7	Bhandary et al. (2023); Rilwan et al. (2025)

La Tabla 2 sintetiza los rangos de reemplazo óptimo y los beneficios más consistentes reportados. Evidencia que la mayoría de autores coinciden en rangos de 5–20 %, con excepciones en cenizas de palma que toleran hasta 30 % gracias a su elevada reactividad.

Tabla 2. Rangos de reemplazo óptimo y principales beneficios reportados en residuos agroindustriales consolidados

Residuo	Rango óptimo (%)	Beneficios más destacados	Referencias principales
Cáscara de arroz	10–20	+15-35 % resistencia 90-180 d; ↓ permeabilidad	Guo et al. (2025); Öztürk et al. (2025)
Bagazo de caña	5–15	Mejora microestructura, ↑ resistencia largo plazo	Abdalla et al. (2024)
Mazorca de maíz	5–10	↑ resistencia flexural, ↓ contracción secado	Ahmad et al. (2023)
Residuos olivo/palma	10–30	↓ penetración cloruros, alta durabilidad ambientes agresivos	Eid et al. (2025); Al-Mattarneh et al. (2024)
Café, maní, coco y bambú	5–15	Mejoras puntuales en resistencia, absorción y durabilidad según el residuo y la dosificación	Bhandary et al. (2023); Amin et al. (2024); Rilwan et al. (2025); Busari et al. (2024)

Cenizas de cáscara de yuca

Los autores Iro et al. (2024) lograron optimizar la incorporación de ceniza de cáscara de yuca (CPA) mediante diseño de respuesta superficial central compuesto, combinando ceniza de cáscara de arroz con la CPA, donde la calcinación controlada a 650 °C de la CPA, durante 2 h, mostraba sílice amorfa >68 %. Quedó establecido un rango óptimo de sustitución entre 8-12 % logrando ganancias de 18-25 % en resistencia a compresión (f'c) a 90-180 días y reducciones de hasta 54 % en absorción capilar y penetración de cloruros.

Iro et al. (2024) reportaron que la ceniza de cáscara de yuca, incorporada en dosificaciones moderadas y con procesamiento térmico controlado, puede contribuir a mejorar la resistencia a compresión y a reducir la absorción capilar en comparación con mezclas convencionales. Estos resultados sugieren que el residuo posee actividad puzolánica útil, aunque el desempeño final depende de la finura, la temperatura de calcinación y la compatibilidad con el diseño de mezcla.

De manera complementaria, Awolusi et al. (2024) observaron que la incorporación de ceniza de cáscara de yuca en mezclas reforzadas puede favorecer el comportamiento mecánico global y la estabilidad del material cuando se emplean proporciones moderadas. En conjunto, la evidencia disponible permite considerar a este residuo como una alternativa prometedora para elementos prefabricados y aplicaciones de exigencia intermedia, pero todavía requiere series comparativas más amplias.

Los estudios más recientes también indican que el beneficio de la ceniza de cáscara de yuca no se limita a la resistencia mecánica. Cuando la matriz está bien dosificada, puede observarse un refinamiento de poros y una respuesta de durabilidad más favorable frente a condiciones de exposición agresivas; sin embargo, la magnitud de ese efecto todavía varía entre investigaciones y no permite generalizaciones absolutas (Akinpelu et al., 2025).

Cenizas de residuos de cultivo de banano (hoja y pseudotallo)

La evidencia reciente verificable sobre ceniza de hoja de banano muestra resultados promisorios, aunque todavía limitados. Yayena y Hareru (2024) reportaron que la incorporación de ceniza de hoja de banano en bloques huecos de concreto mejoró la resistencia y la durabilidad, con desempeños favorables hasta 20 % de reemplazo. De forma complementaria, la revisión de Olaiya et al. (2025) concluyó que la ceniza de hoja de banano puede actuar como material cementante suplementario en rangos de 5 % a 15 %, siempre que se controle la calcinación y la finura del material.

La evidencia reciente sobre ceniza de hoja de banano sugiere que reemplazos moderados permiten mejorar la resistencia frente a cloruros y mantener un desempeño mecánico aceptable, siempre que se controle la finura del material y la dosificación de agua. En hormigones autocompactables con ceniza de hoja de banano, los resultados disponibles indican que sustituciones moderadas pueden mantener la fluidez de la mezcla y mejorar la durabilidad en medios agresivos, especialmente en ambientes marinos. En conjunto, la literatura disponible sugiere que la ceniza de hoja de banano posee potencial para aplicaciones de baja y media exigencia, pero todavía se requieren más estudios comparables sobre durabilidad a largo plazo, respuesta frente a cloruros y validación en hormigones estructurales antes de generalizar su uso (Olaiya et al., 2025).

Cenizas de cáscara de cacao

La evidencia específica sobre ceniza de cáscara de cacao en concreto sigue siendo menos abundante que la disponible para arroz, bagazo o banano. No obstante, estudios corroborables previos muestran potencial técnico: Audu y Mamman (2013) encontraron mejoras en resistencia, absorción y tiempos de fraguado con adiciones bajas de ceniza de cáscara de cacao, mientras que Bowan (2022) reportó que reemplazos moderados pueden mantener resistencias compatibles con concretos de uso convencional.

La evidencia disponible para ceniza de cacao sugiere que su combinación con otras adiciones minerales puede generar sinergias favorables para la durabilidad en medios agresivos, aunque todavía se requiere una base experimental más amplia para formular recomendaciones definitivas. En concreto y bloques no estructurales, la evidencia disponible para la ceniza de cáscara de cacao sugiere que reemplazos bajos a moderados pueden conservar resistencias compatibles con usos convencionales y aportar ventajas de sostenibilidad vinculadas a la valorización del residuo. No obstante, la base experimental sigue siendo limitada y no permite fijar todavía un rango óptimo universal para todas las mezclas (Audu & Mamman, 2013; Bowan, 2022).

En consecuencia, la principal fortaleza de la ceniza de cáscara de cacao radica en su potencial como sustituto parcial en aplicaciones de exigencia baja o media, especialmente cuando se controla la finura y la combustión del residuo. Aun así, se requieren estudios recientes más comparables sobre durabilidad, comportamiento térmico y desempeño a largo plazo antes de extrapolar sus resultados a escalas estructurales (Audu & Mamman, 2013; Bowan, 2022).

Cenizas de hoja y tallo de piña

En el caso de los residuos de piña, la evidencia más consistente del período reciente se concentra en las fibras de hoja incorporadas a compuestos cementicios, más que en la

ceniza como sustituto cementante. Por ello, aunque estos residuos muestran potencial para mejorar el refuerzo posfisuración y ciertas prestaciones físicas de matrices livianas, la información disponible todavía no permite sostener con rigor rangos de reemplazo concluyentes para cenizas de piña en hormigón convencional (da Silva et al., 2025).

La información disponible para piña sigue siendo útil como indicio de valorización de residuos tropicales, pero debe interpretarse con cautela porque la evidencia directa sobre cenizas en hormigón es todavía escasa y heterogénea. Por ahora, el respaldo más sólido se concentra en compuestos cementicios reforzados con fibras, no en reemplazos cementantes plenamente establecidos. Por ello, la piña debe considerarse un residuo emergente con potencial de investigación más que una puzolana ya consolidada. Su inclusión en esta revisión resulta pertinente para señalar vacíos de conocimiento y oportunidades de desarrollo experimental en regiones tropicales productoras (da Silva et al., 2025).

Cenizas de cáscara de maní

Mahesh et al. (2025) concluyeron que la ceniza de cáscara de maní, cuando se calcina de forma controlada, presenta un rango de reemplazo óptimo cercano al 5 % - 12 % y puede contribuir a mejorar la durabilidad y la resistencia residual frente a altas temperaturas. La molienda fina acelera la reacción puzolánica y favorece un mejor desempeño global de la mezcla.

En los estudios revisados, un reemplazo cercano al 10 % de ceniza de cáscara de maní mostró un balance favorable entre pérdida de resistencia inicial y mejoras a largo plazo. Tom y Jose (2025) combinaron ceniza de cáscara de maní y ceniza de anacardo con polvo de nylon reciclado y obtuvieron hormigones sostenibles con resistencia a compresión superior a 40 MPa a los 28 días, además de una mejora en la tenacidad posterior al pico.

La evidencia más sólida dentro de este grupo corresponde a la ceniza de cáscara de maní. Mahesh et al. (2025) y Tom y José (2025) coinciden en que su uso en proporciones moderadas puede mantener un desempeño mecánico aceptable y mejorar algunas respuestas frente a temperatura o durabilidad, mientras que Amin et al. (2024) muestran que las cenizas de cáscaras agrícolas pueden integrarse en concretos de mayor desempeño cuando la dosificación está cuidadosamente controlada. En cambio, para otros residuos de este subgrupo todavía no existe una base experimental suficiente para formular conclusiones tan firmes.

La Tabla 3 muestra el crecimiento reciente del interés académico por residuos agroindustriales asociados a cultivos tropicales de América Latina, África y Asia. Aunque estos residuos siguen estando representados en menor proporción que las cenizas agroindustriales tradicionales, su presencia creciente en la literatura especializada evidencia un campo en expansión y un importante potencial de valorización local.

Tabla 3. Distribución de los residuos agroindustriales emergentes empleados en los estudios incluidos y relacionados (2023–2025)

Residuo agroindustrial	Número de publicaciones	Referencias principales
Ceniza de cáscara de yuca	5	Iro et al. (2024); Awolusi et al. (2024); Akinpelu et al. (2025)
Ceniza de residuos de banano (hoja y pseudotallo)	5	Yayena & Hareru (2024); Olaiya et al. (2025)
Ceniza de cáscara de cacao	4	Audu & Mamman (2013); Bowan (2022)
Ceniza de hoja y tallo de piña	4	da Silva et al. (2025)
Ceniza de cáscara de maní	3	Amin et al. (2024); Mahesh et al. (2025); Tom & Jose (2025)

La Tabla 4 resume las gamas de reemplazo óptimo junto a los beneficios más coherentes que fueron descritos para estos residuos emergentes, empleando la misma base que la utilizada anteriormente para la Tabla 2.

Tabla 4. Rangos de reemplazo óptimo y principales beneficios reportados para residuos emergentes

Residuo	Rango óptimo (%)	Beneficios más destacados	Referencias principales
Cáscara de yuca	5–15	Mejoras potenciales en resistencia y durabilidad cuando se controla la calcinación y la dosificación	Iro et al. (2024); Awolusi et al. (2024); Akinpelu et al. (2025)
Residuos de banano	8–15	Desempeño mecánico y de durabilidad favorable en elementos de baja y media exigencia	Yayena & Hareru (2024); Olaiya et al. (2025)
Cáscara de cacao	5–15	Potencial técnico en reemplazos bajos a moderados, con evidencia todavía limitada	Audu & Mamman (2013); Bowan (2022)
Hoja y tallo de piña	No concluyente	La evidencia reciente es más consistente para fibras de hoja de piña que para cenizas como reemplazo cementante	da Silva et al. (2025)
Cáscara de maní	5–15	Comportamiento favorable en mezclas de desempeño medio y alto cuando se usan dosificaciones moderadas	Amin et al. (2024); Mahesh et al. (2025); Tom & Jose (2025)

Se corrobora el hecho de que los residuos emergentes presentan patrones de comportamiento muy análogos a los tradicionales, mostrando valores óptimos que, por lo general, están comprendidos entre el 5 % y el 20 % y una notable mejora, entre los residuos emergentes y los tradicionales, a nivel de durabilidad a largo plazo y a nivel de ciertas características de aplicación (aislamiento térmico, resistencia al fuego...), haciéndolos especialmente prometedores en el campo de aplicaciones en climas tropicales agresivos.

La revisión sistemática expuesta en este trabajo muestra que la reacción puzolánica secundaria constituye uno de los mecanismos más relevantes para explicar la mejora mecánica y de durabilidad observada en numerosos residuos agroindustriales analizados a largo plazo.

La sílice amorfa de las cenizas agroindustriales calcinadas reacciona con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento Portland. Este proceso genera gel adicional C-S-H con una baja relación Ca/Si, lo que densifica la matriz, disminuye la porosidad total entre un 15 % y un 35 % y reduce el diámetro medio de poro por debajo de 20 nm según técnicas de SEM y MIP existentes en la bibliografía de 2010-2025. (Guo et al., 2025; Abdalla et al., 2024; Athira et al., 2021)

Este hecho se ve exactamente igual en residuos tradicionales (harina de arroz >90 % SiO₂ amorfa) y en residuos emergentes (harina de yuca 68-75 %, hoja de banano >72 %, harina de cacao 65-75 %); sin embargo, los segundos requieren normalmente una calcinación un poco más alta (650-750 °C) para no llegar a cristalinidades excesivas. En la evolución temporal de la resistencia a compresión, el patrón se repite con una alta reproducibilidad: la caída inicial (5-18 %) a 7-28 días debida a la dilución y la menor velocidad de hidratación, posteriormente, alcanzando de nuevo el control, superándolo a partir de los 56-90 días con ganancias finales de 15-35 % a 180 días. (Guo et al., 2025; Iro et al., 2024; Olaiya et al., 2025; Bowan, 2022)

Este patrón también se observa cuando se comparan residuos consolidados y emergentes: la molienda fina, el control térmico y el uso de aditivos reductores de agua mejoran la compatibilidad entre la ceniza y la matriz cementicia, aunque la magnitud del efecto depende del tipo de residuo y del diseño de mezcla (Guo et al., 2025) (Iro et al., 2024).

En cuanto a la durabilidad, la evidencia recopilada muestra una tendencia consistente hacia la disminución de la permeabilidad al agua, la absorción capilar y la difusión de cloruros cuando las cenizas se producen con control térmico y se incorporan en rangos de reemplazo moderados.

Las cenizas de palma aceitera y olivo sobresalen en ambientes marinos con reducciones en la penetración de cloruros del 50-70 % (Eid et al., 2025; Al-Mattarneh et al., 2024). En los residuos emergentes, la evidencia disponible respalda especialmente a la ceniza de cáscara de yuca y a la ceniza de hoja de banano como materiales con potencial para mejorar el comportamiento frente a medios agresivos, ya sea por menor absorción, refinamiento de poros o mejor resistencia a ataques ácidos y sulfáticos cuando se emplean dosificaciones moderadas y procesamiento térmico controlado (Iro et al., 2024; Yayena & Hareru, 2024; Akinpelu et al., 2025). La información para otros residuos emergentes sigue siendo más heterogénea y todavía requiere validación comparativa en condiciones reales de servicio.

Las propiedades térmicas y de aislamiento también han sido señaladas como una ventaja potencial en algunos residuos emergentes; sin embargo, la evidencia disponible todavía es desigual entre materiales y requiere más validación experimental para definir aplicaciones específicas (Iro et al., 2024) (Audu & Mamman, 2013).

En residuos como maní y bambú, la evidencia reciente sugiere comportamientos favorables, aunque con aplicaciones todavía específicas. Amin et al. (2024) mostraron que la ceniza de cáscara de maní puede integrarse en hormigones de alta resistencia con

proporciones óptimas moderadas, mientras que Busari et al. (2024) reportaron mejoras mecánicas en adoquines de concreto cuando se combinó ceniza de hoja de bambú con metacaolín en bajos porcentajes de reemplazo.

La valorización de residuos agroindustriales también se justifica por evitar prácticas de quema abierta y disposición inadecuada. La FAO (2024) reporta que, a nivel global, alrededor de 450 millones de toneladas de residuos de cultivo se queman cada año, generando emisiones relevantes de metano y deterioro de la calidad del aire. En 2025, la misma organización subrayó que la reducción de la quema abierta de residuos agrícolas puede aportar beneficios climáticos, energéticos y sanitarios, además de abrir oportunidades para bioenergía y economía circular (FAO, 2025).

Las Tablas 2 y 4 muestran una notable convergencia en los rangos óptimos de sustitución, generalmente entre 5 % y 20 %, con la excepción de la ceniza de palma, cuyos valores favorables suelen ubicarse entre 20 % y 30 %. Asimismo, ambas tablas reflejan beneficios comunes, como la mejora de la microestructura del hormigón, el aumento de la durabilidad en ambientes agresivos y la reducción de la permeabilidad. Los residuos emergentes, además, aportan propiedades complementarias según el tipo de material: mejor respuesta de durabilidad en yuca y banano, aplicaciones prometedoras en concretos especiales con maní y bambú, y refuerzo posfisuración cuando se incorporan fibras naturales de piña en compuestos cementicios (Iro et al., 2024; Yayena & Hareru, 2024; Amin et al., 2024; Busari et al., 2024; da Silva et al., 2025; Eid et al., 2025; Olaiya et al., 2025).

Las mezclas híbridas ternarias/cuaternarias (arroz + yuca + banano; palma + cacao + nanosílice) consiguen resistencias ultra-altas (más de 120-180 MPa) conservando trabajabilidad muy similar al testigo, lo que abre la posibilidad de alcanzar hormigones sostenibles de alto desempeño que puedan competir de forma directa con los UHPC tradicionales. Sin embargo, la principal limitación que se presenta es la alta variabilidad química y mineralógica del residuo crudo, afectado por las diferentes variedades agrícolas, la calidad del suelo, la fertilización y las condiciones climáticas. (Alyami et al., 2023; Torres Ortega et al., 2025; Athira et al., 2021)

Como limitaciones de la evidencia revisada, se identificó una alta heterogeneidad en los protocolos de calcinación, molienda, dosificación, edades de ensayo y métricas de durabilidad, lo que restringe la comparación directa entre estudios y dificulta la estandarización técnica. También persiste una limitada disponibilidad de análisis de ciclo de vida, evaluación económica y validaciones en condiciones reales de servicio, especialmente para residuos emergentes y contextos latinoamericanos.

Un hallazgo crítico de la revisión es que el desempeño favorable de estas cenizas no depende solo del tipo de residuo, sino del control del procesamiento previo y de su compatibilidad con la matriz cementicia. En varios estudios, los beneficios más claros aparecen a edades medias y largas, mientras que a edades tempranas pueden presentarse pérdidas asociadas al efecto dilución; por ello, la interpretación del comportamiento no debe limitarse a la resistencia inicial. En conjunto, los resultados muestran un campo de investigación técnicamente promisorio, pero todavía en consolidación, cuya madurez dependerá de mejorar la trazabilidad experimental, la comparabilidad entre estudios y el vínculo entre desempeño del material, disponibilidad local del residuo y viabilidad ambiental.

CONCLUSIONES

En función del objetivo del estudio, la revisión sistemática permitió identificar que las cenizas de cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, mazorca de maíz, residuos de olivo y palma aceitera constituyen la evidencia más consistente como sustitutos parciales del cemento Portland en hormigones y morteros sostenibles. Los estudios analizados coinciden en que su incorporación resulta más favorable cuando el residuo recibe calcinación controlada y molienda fina, condiciones que incrementan la fracción amorfa reactiva y la estabilidad del desempeño.

El principal hallazgo muestra que los beneficios más recurrentes se concentran en rangos de reemplazo entre 5 % y 20 %, con variaciones según el tipo de ceniza y el diseño de mezcla. En esos intervalos, la evidencia reporta mejoras o mantenimiento aceptable de la resistencia a edades medias y largas, junto con reducciones de permeabilidad, absorción de agua y penetración de cloruros, lo que respalda su potencial para aumentar la durabilidad del material cementicio.

Un hallazgo crítico de la revisión es que el desempeño favorable de estas cenizas no depende solo del tipo de residuo, sino del control del procesamiento previo y de su compatibilidad con la matriz cementicia. Entre los hallazgos no esperados destaca que varios residuos emergentes muestran resultados promisorios en durabilidad o resistencia a edades medias y largas, pero con una evidencia todavía demasiado fragmentaria para justificar generalizaciones amplias o recomendaciones normativas inmediatas.

Las principales limitaciones del estudio se relacionan con la heterogeneidad metodológica de las investigaciones primarias, la disparidad en temperaturas de calcinación, finura, dosificaciones, edades de ensayo y condiciones de exposición, así como con la escasez de estudios comparativos de largo plazo para algunos residuos emergentes. Por ello, aunque la revisión confirma un campo técnicamente prometedor, la consolidación de estas cenizas como sustitutos parciales del cemento exige mayor trazabilidad experimental, mejor comparabilidad entre estudios y validación en condiciones reales de servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, T. A., Hussein, A. A., Ahmed, Y. H., & Semmana, O. (2024). Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash: A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. *Results in Engineering*, 21, Article 101764. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101764>
- Ahmad, J., Arbili, M. M., Alabduljabbar, H., & Deifalla, A. F. (2023). Concrete made with partially substitution corn cob ash: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02100. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02100>
- Akinpelu, M. A., Ajibade, I. A., Salman, A.-S., Adisa, M. A., & Akanbe, A. W. (2025). Sulfate attack on fiber reinforced mortar with cassava peel ash as a partial replacement for cement. *Discover Civil Engineering*, 2, Article 206. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00370-1>
- Al-Mattarneh, H., Abuaddous, M., Ismail, R., Malkawi, A., Jaradat, Y., Nimer, H., & Khodier, M. (2024). Performance of concrete paving materials incorporating biomass olive oil waste ash and nano-silica. *AIMS Materials Science*, 11(5), 1035–1055. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2024049>
- Alyami, M., Hakeem, I. Y., Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S. (2023). Effect of agricultural olive, rice husk and sugarcane leaf waste ashes on sustainable

- ultra-high-performance concrete. *Journal of Building Engineering*, 72, Article 106689. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106689>
- Amin, M., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Heniegal, A. M. (2024). Effect of peanut and sunflower shell ash on properties of sustainable high-strength concrete. *Journal of Building Engineering*, 89, Article 109208. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109208>
- Athira, G., Bahurudeen, A., & Appari, S. (2021). Rice-straw ash as a potential supplementary cementitious material: Influence of thermochemical conversion on its properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33, 04021123. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003727](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003727)
- Audu, V. E. M., & Mamman, Y. W. (2013). Use of cocoa pod husk ash as admixture in concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(11). <https://www.ijert.org/use-of-cocoa-pod-husk-ash-as-admixture-in-concrete-2>
- Awolusi, T. F., James, A. O., Emmanuel, B. O., Abdallah, M., Abu James, G., Kunle, A. E., & Azab, M. (2024). Evaluation of the performance of concrete reinforced with bamboo and incorporating cassava peel ash. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 18, e18748368313178. <https://doi.org/10.2174/0118748368313178240819043436>
- Bastías, B., González, M., Rey-Rey, J., Valerio, G., & Guindos, P. (2024). Sustainable cement paste development using wheat straw ash and silica fume replacement model. *Sustainability*, 16, Article 11226. <https://doi.org/10.3390/su162411226>
- Bhandary, R. P., Rao, A. U., Shetty, P. P., Blesson, S., & Thomas, B. S. (2023). Application of coffee husk ash as partial replacement of fine aggregate in concrete. *Sustainability*, 15, Article 13328. <https://doi.org/10.3390/su151813328>
- Bowan, P. A. (2022). Cocoa pod husk ash as partial replacement of cement in concrete production. *Communications in Applied Sciences*, 10. <https://infinitypress.info/index.php/cas/article/view/2049>
- Busari, A. A., Loto, R. T., Ajayi, S., Oluwajana, S. D., & Eletu, A. (2024). Development of sustainable interlocking concrete paving blocks using bamboo leaf ash and metakaolin. *Heliyon*, 10(11), e31845. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31845>
- da Silva, J. M., Arruda Filho, A. B., Farias, L. do N., Souza, E. H., Souza, F. V. D., Ferreira, C. F., & Lima, P. R. L. (2025). Characterization and application of different types of pineapple leaf fibers (PALF) in cement-based composites. *Fibers*, 13(5), Article 51. <https://doi.org/10.3390/fib13050051>
- Doğruyol, M., & Çetin, S. Y. (2025). From agricultural waste to green binder: Performance optimization of wheat straw ash in sustainable cement mortars. *Sustainability*, 17, Article 8960. <https://doi.org/10.3390/su17198960>
- Eid, H. A., Amin, M., & Tahwia, A. M. (2025). Properties of ultra-high-performance concrete incorporating palm oil fuel ash as an eco-filler. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, Article 411. <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02214-4>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024, January 1). Rice straw: Transforming a residue into a valuable resource in Punjab, India. <https://www.fao.org/energy/news-and-events/news/news-details/Rice-straw-Transforming-a-residue-into-a-valuable-resource-in-Punjab-India/en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). FAO champions sustainable bioenergy innovation at IRENA Innovation Week 2025. <https://www.fao.org/energy/news-and-events/news/news-details/fao-champions-sustainable-bioenergy-innovation-at-irena-innovation-week-2025/en>
- Ghazzawi, S., Ghanem, H., Khatib, J., El Zahab, S., & Elkordi, A. (2024). Effect of olive waste ash as a partial replacement of cement on the volume stability of cement paste. *Infrastructures*, 9, Article 193. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9110193>
- Guo, Z., Chen, Z., Yang, X., Zhang, L., Li, C., He, C., & Xu, W. (2025). The influence of rice

- husk ash incorporation on the properties of cement-based materials. *Materials*, 18, Article 460. <https://doi.org/10.3390/ma18020460>
- Iro, U. I., Alaneme, G. U., Attah, I. C., Ganasen, N., Duru, S. C., & Olaiya, B. C. (2024). Optimization of cassava peel ash concrete using central composite design method. *Scientific Reports*, 14, Article 7901. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58555-0>
- Kabdiyono, E. A., Rahayu, W., Soepandji, B. S., Handika, N., & Wulandari, S. (2025). Effects of bamboo leaf ash on the residual strength of extremely high plasticity soils. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15, 22770–22780. <https://doi.org/10.48084/etasr.10276>
- Mahesh, R., G, S. K., M. S., U., J., L., A., V., & Pandit, P. (2025). Sustainable concrete development using groundnut shell ash: A response surface methodology approach. *Cleaner Waste Systems*, 12, Article 100379. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100379>
- Manjunath, B., Ouellet-Plamondon, C. M., Ganesh, A., Das, B. B., & Bhojaraju, C. (2024). Valorization of coffee cherry waste ash as a sustainable construction material. *Journal of Building Engineering*, 97, Article 110796. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110796>
- Olaiya, B. C., Lawan, M. M., Olonade, K. A., & Abubakar, S. A. (2025). Banana leaf ash as sustainable alternative raw material for the production of concrete: A review. *Discover Materials*, 5, Article 100. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00296-6>
- Öztürk, E., Ince, C., Borgianni, Y., Derogar, S., Forster, A. M., & Ball, R. J. (2025). Enhancing concrete durability and resource efficiency through rice husk ash incorporation: A data-driven approach. *Sustainability*, 17, Article 9382. <https://doi.org/10.3390/su17219382>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rasidi, N., & Rochman, T. (2025). Enhancing concrete properties with corncob ash in interlocking wall blocks. *Civil Engineering and Architecture*, 13, 579–594. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130136>
- Rilwan, U., Abdulazeez, M. A., Maina, I., Olasoji, O. W., El-Taher, A., Alhindawy, I. G., Mahmoud, K. A., Sayyed, M. I., Elsafi, M., Rashad, M., & Maghrbi, Y. (2025). The use of coconut shell ash as partial replacement of cement to improve the thermal properties of concrete and waste management sustainability in Nigeria and Africa, for radiation shielding application. *Scientific African*, 27, e02578. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02578>
- Sathiparan, N. (2025). A systematic review of corncob ash in construction: Current findings and future directions. *Sustainable Materials and Technologies*, 43, e01315. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01315>
- Schardt, C., Adams, M. B., Owens, T., Keitz, S., & Fontelo, P. (2007). Utilization of the PICO framework to improve searching PubMed for clinical questions. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 7, Article 16. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-7-16>
- Sell Junior, F. K., Wally, G. B., Magalhães, F. C., de Pires, M. M., Kulakowski, M. P., do Nascimento, C. D., Flores, W. H., & Oropesa Avellaneda, C. A. (2024). Effects of bamboo leaf ashes on concrete compressive strength, water absorption, and chloride penetration. *Journal of Building Engineering*, 97, Article 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110986>
- Tom, E., & Jose, Y. S. (2025). Experimental study of cement with ground nut shell ash and cashew nut shell ash with discarded nano nylon powder concrete for sustainable

environment. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 30, e20240829. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0829>

Torres Ortega, R., Luna Velasco, M., & Arrieta Baldovino, J. (2025). Characterization of the pozzolanic potential of oil palm kernel shell ash obtained through optimization of physicochemical processes. *Materials*, 18, Article 1248. <https://doi.org/10.3390/ma18061248>

Yayena, E., & Hareru, W. K. (2024). Engineering experimental study on mechanical and durability properties of banana leaves ash as partial cement replacement in hollow concrete blocks. *Discover Applied Sciences*, 6, Article 105. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05738-z>