

A systematic review of how the use of biomass can reduce CO₂ emissions and improve sustainability in the cement industry

Mabely Yessy Cuyo Chura, Bach.¹, Betsy Tatiana Revilla Núñez, Bach.², Italo Treviño-Zevallos, Dr.³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú

U22219990@utp.edu.pe, U17303669@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe

Abstract— The cement industry, essential for urban development, faces criticism for its high energy consumption and contribution to global CO₂ emissions. This review systematizes scientific evidence on the use of biomass as a sustainable energy alternative to mitigate emissions, emphasizing technical, economic, and environmental feasibility. The PICO framework was applied to structure the analysis, focusing on clinker production, calcination, biomass use, and other decarbonization strategies. Outcomes included CO₂ reduction and improved energy efficiency. Using the PRISMA protocol, 1,246 records were screened, with 52 relevant studies selected from the past six years in Scopus. Most research was from Europe and Asia, with initial cases in America and Africa. Half the studies used industrial waste like fly ash, while agricultural residues such as rice husk and sugarcane bagasse reduced CO₂ emissions by up to 42 percent and enhanced concrete performance. Several applications also showed economic benefits, reducing costs and emissions of NOx, SOx, and particulates by up to 72 percent. Rotary kilns, pyrolysis, and direct blending were the most effective technologies. The evidence indicates that biomass use in cement production supports circular economy principles, cost savings, and emission reduction. Further research is recommended on Peruvian biomass sources like quinoa and coffee residues, and their synergy with solar energy.

Keywords-- *Cement industry, CO₂ emissions, Circular economy, Decarbonization.*

Una revisión sistemática sobre cómo el uso de biomasa puede reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la sostenibilidad en la industria cementera

Mably Yessy Cuyo Chura, Bach.¹, Betsy Tatiana Revilla Núñez, Bach.¹, Italo Treviño-Zevallos, Dr.²

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú
U22219990@utp.edu.pe, U17303669@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe

Resumen—La industria del cemento, esencial para el desarrollo urbano, recibe críticas por su elevado consumo energético y su significativa contribución a las emisiones globales de CO₂. Esta revisión sistematiza evidencia científica sobre el uso de biomasa como alternativa energética sostenible para mitigar dichas emisiones, destacando su viabilidad técnica, económica y ambiental. Se aplicó el enfoque PICO para estructurar el análisis, enfocándose en la producción de clíker, la calcinación, el uso de biomasa y otras estrategias de descarbonización. Los resultados incluyeron la reducción de CO₂ y mejoras en la eficiencia energética. Siguiendo el protocolo PRISMA, se examinaron 1,246 registros y se seleccionaron 52 estudios relevantes de los últimos seis años en Scopus. La mayoría de investigaciones se concentraron en Europa y Asia, con casos iniciales en América y África. La mitad utilizó residuos industriales como cenizas volantes, mientras que residuos agrícolas como la cáscara de arroz y el bagazo de caña lograron reducir emisiones de CO₂ hasta en un 42 % y mejorar la resistencia del concreto. También se reportaron beneficios económicos y reducciones de NO_x, SO_x y material particulado hasta en un 72 %. Las tecnologías más eficaces fueron hornos rotatorios, pirólisis y mezclado directo. Se recomienda investigar fuentes peruanas como residuos de quinua y café, y su sinergia con energía solar.

Palabras clave—Biomasa, Industria cementera, Emisiones de CO₂, Economía circular, Descarbonización.

I. INTRODUCCIÓN

La industria cementera, pese a ser el cimiento del desarrollo urbano contemporáneo, enfrenta un dilema existencial: su indispensable contribución al progreso contrasta radicalmente con su posición como uno de los sectores industriales más voraces en consumo energético y generación de contaminantes. Las cifras son elocuentes: absorbe entre 11-15% de la energía industrial global [1] y emite aproximadamente 7% del CO₂ antropogénico mundial, superando las emisiones anuales de economías enteras [2]. Este desequilibrio ha catalizado una revolución silenciosa en su modelo productivo, donde la adopción de combustibles alternativos (AF), como biomasa, combustibles derivados de residuos (RDF) o neumáticos fuera de uso (TNU), emerge como una solución dual: reducir costos operativos hasta en 30% [3] y disminuir la dependencia de combustibles fósiles.

La arquitectura misma de los hornos cementeros, con sus temperaturas superiores a 1500 °C y tiempos de residencia de hasta 10 segundos, se ha revalorizado como un escenario ideal

para la valorización energética de residuos [4]. Estas condiciones extremas no sólo garantizan la destrucción completa de compuestos orgánicos peligrosos, sino que también posicionan a la industria como un actor clave en la economía circular. Complementariamente, innovaciones técnicas como la incorporación de etapas adicionales de ciclones han demostrado optimizar la eficiencia energética al mejorar la fluidodinámica de procesos y el desempolvado de materias primas [5]. Sin embargo, el potencial de estas tecnologías choca con un contexto regulatorio y económico aún inmaduro. Mientras países como Togo ya reportan ahorros del 10% en costos operativos con la adopción de AF, su implementación global sigue siendo fragmentaria [6]. Aquí radica una paradoja: pese a disponer de soluciones técnicas viables, la industria avanza a dos velocidades, con líderes innovadores y rezagados anclados en modelos obsoletos.

El camino hacia una industria cementera sostenible está plagado de obstáculos interconectados, donde la ineficiencia energética destaca como el primero y más crítico. Estudios revelan que hasta 40% del calor generado en los procesos productivos se disipa sin aprovechamiento [7], un despilfarro que no solo incrementa costos, sino que agrava la huella ambiental. Esta pérdida es particularmente preocupante si se considera que, en paralelo, la producción de concreto sigue dependiendo en 70-75% de agregados naturales [8], ejerciendo una presión insostenible sobre ecosistemas frágiles. La integración de energías renovables, aunque teóricamente prometedora, enfrenta barreras prácticas significativas. Por un lado, la biomasa aplicada a hornos rotatorios ha demostrado reducir el consumo energético en 20% [9], pero su escalabilidad se ve limitada por la disponibilidad geográfica de materia prima y los elevados costos de logística inversa. Por otro lado, tecnologías complementarias como la energía solar asistida, clave para optimizar sistemas de recuperación de calor residual, aún permanecen en fase experimental, con escasos casos documentados de implementación exitosa [10]. Otro nudo gordiano lo constituye la resistencia al cambio tecnológico. Aunque el uso de neumáticos fuera de uso (TNU) como combustible alternativo podría reducir emisiones en 25% [6], su adopción masiva tropieza con regulaciones fragmentadas y una infraestructura de procesamiento inadecuada. Peor aún, la industria arrastra una inercia cultural: muchas plantas privilegian soluciones convencionales por sobre innovaciones

de probada eficacia, como los nanomodificadores de metacaolín que mejoran las propiedades del concreto en 14% de eficiencia termoactiva [5].

Ante este panorama complejo, la reinvenCIÓN sostenible de la industria cementera no es una opción, sino un imperativo estratégico. Soluciones como la codigestión de residuos, que ya muestra reducciones de 20-25% en emisiones [11] deben escalarse urgentemente, aprovechando el potencial sinérgico entre tecnologías. El caso del biochar derivado de desechos orgánicos es emblemático: no solo incrementa la resistencia mecánica del concreto en 15% [12], sino que simultáneamente secuestra carbono, transformando un pasivo ambiental en un activo estructural [13]. Materiales innovadores como la ceniza de sargazo, capaz de reemplazar agregados tradicionales, ilustran cómo la economía circular puede resolver problemas duales: mitigar la contaminación por algas y reducir la presión sobre recursos naturales no renovables. Paralelamente, estrategias de optimización sistémica que combinen recuperación de calor residual, energía solar y combustibles alternativos (AF) podrían mejorar la eficiencia global entre 30 % y 35 % [3], según modelos teóricos. El desafío trasciende lo técnico: requiere una gobernanza colaborativa que alinee incentivos económicos, marcos regulatorios armonizados y transferencia tecnológica sur-norte. Proyectos como la planta de Togo demuestran que, cuando estos elementos convergen, los resultados son tangibles, alcanzando ahorros superiores al 10 % en costos operativos [6]. En este contexto, la industria cementera del siglo XXI enfrenta una disyuntiva: permanecer como un alto emisor de carbono o transformarse en un laboratorio global de sostenibilidad industrial. La ventana de oportunidad está abierta, pero se estrecha rápidamente. Por ello, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de biomasa y materiales derivados de residuos en la industria cementera, evaluando su potencial para reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia energética de los procesos productivos.

II. METODOLOGÍA

Con el propósito de evaluar el papel de la biomasa como alternativa energética sostenible para la reducción de emisiones de CO₂ en la industria cementera, se desarrolló una metodología rigurosa basada en el enfoque PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultados). Este enfoque permitió estructurar la investigación de forma lógica y coherente, garantizando una búsqueda bibliográfica exhaustiva y pertinente. En primera instancia, se definieron los cuatro componentes de PICO que orientarían la revisión: población, intervención, comparación y resultados. Cada componente fue analizado en función del tema seleccionado para la revisión sistemática, lo que permitió formular preguntas específicas que guiaron de manera clara la estrategia de búsqueda. Estas preguntas, resumidas en la Tabla 1, condujeron a la siguiente pregunta central de investigación: “¿Cómo el uso de biomasa como alternativa energética sostenible contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ en la industria cementera?” Esta interrogante sintetiza el objetivo de

la revisión sistemática y establece la base metodológica para identificar, seleccionar y analizar la literatura relevante.

Tabla 1: Preguntas asociadas a los componentes PICO

CT	Presto a búsqueda
RQ1	¿Cómo se define y caracteriza la biomasa utilizada en la industria cementera, y qué tipos son más relevantes?
RQ2	¿En qué procesos específicos de la industria cementera se ha aplicado la biomasa, y qué poblaciones o contextos geográficos han sido estudiados?
RQ3	¿Qué métodos o tecnologías se han empleado para integrar la biomasa en la industria cementera, y qué eficacia han demostrado en la reducción de CO ₂ ?
RQ4	¿Qué limitaciones técnicas, económicas o ambientales se han identificado en el uso de biomasa en este sector?

Posteriormente, se dio respuesta a las preguntas planteadas en la Tabla 1, definiendo los componentes del modelo PICO. La Población se delimitó a los procesos clave de la industria cementera, específicamente la producción de clinker y la etapa de calcinación, donde el consumo energético y las emisiones de CO₂ son más relevantes. La Intervención se centró en el uso de biomasa como fuente energética, incluyendo residuos orgánicos, biocombustibles y otros materiales derivados de fuentes renovables. Para contextualizar su impacto, se estableció una Comparación con métodos tradicionales basados en combustibles fósiles, así como con otras estrategias de descarbonización, como la captura de carbono y la optimización de procesos productivos. Finalmente, los Resultados de interés se enfocaron en métricas cuantificables, como porcentajes de reducción de emisiones de CO₂ y mejoras en la eficiencia energética. Esta información se sintetizó en la Tabla 2, donde se presentan los componentes del modelo PICO y las palabras clave empleadas para la estrategia de búsqueda bibliográfica:

Tabla 2: Aplicación del modelo PICO

Modelo	Componente	Presto a búsqueda
Población	Industria cementera y la producción de cemento	cement OR "cement industry" OR "portland cement" OR concrete
Intervención	Uso de biomasa como fuente energética	reuse OR biomass OR "ORGANIC WASTE" OR bioenergy OR additives OR "heterogeneous energy"
Comparación	Fuentes energéticas tradicionales	methods OR solutions OR processes OR applications
Resultado	Reducción de emisiones de CO ₂	"co2 reduction" OR optimization OR "low carbon cement" OR "circular economy"

La construcción de esta ecuación consideró los cuatro componentes de PICO para cubrir de manera integral la temática de la revisión. La combinación de operadores booleanos permitió abarcar términos relacionados con la

industria cementera, el uso de biomasa como fuente energética, métodos de comparación con tecnologías tradicionales y resultados asociados a la descarbonización y eficiencia energética. Este enfoque garantizó que la búsqueda fuera lo suficientemente amplia para capturar la literatura relevante, pero también precisa para descartar publicaciones fuera de contexto.

A continuación, y tal como se muestra en la Fig. 1, se procedió a la selección y depuración de artículos siguiendo la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) [8]. La búsqueda inicial, centrada en la aplicación de la biomasa como alternativa energética sostenible en la industria cementera, arrojó 1 246 registros. Durante la primera revisión no se detectaron duplicados; sin embargo, varias publicaciones carecían de acceso abierto, lo que redujo el conjunto a 932 documentos aptos para análisis preliminar.

Posteriormente, se aplicaron los criterios de exclusión (CE) de forma secuencial para depurar los registros:

- CE1: Publicaciones con antigüedad mayor a seis años, lo que permitió excluir 323 artículos.
- CE2: Documentos que no correspondían a artículos científicos originales, como actas de conferencia, revisiones sistemáticas y capítulos de libros, eliminando 315 registros.
- CE3: Artículos no finalizados o en proceso de publicación, que resultaron en 18 exclusiones.
- CE4: Publicaciones en idiomas distintos al inglés, como chino, ruso, alemán y checo, que eliminaron 32 artículos.

Superada esta etapa, se realizó un segundo filtrado cualitativo, orientado a garantizar la pertinencia temática. Para ello, se revisaron los resúmenes de los artículos restantes, verificando que cumplieran simultáneamente dos condiciones:

1. Analizar procesos o tecnologías de la industria cementera.
2. Evaluar el uso de biomasa como fuente energética sostenible vinculada a la reducción de emisiones de CO₂.

Como resultado de este proceso de depuración, se obtuvo un conjunto final de 52 artículos, que constituyen la base de la revisión sistemática de literatura (RSL). Estos artículos representan el núcleo del análisis, permitiendo caracterizar el estado del arte sobre la aplicación de biomasa en la descarbonización de la industria cementera, así como identificar tendencias, limitaciones y oportunidades para la optimización energética y la reducción de emisiones.

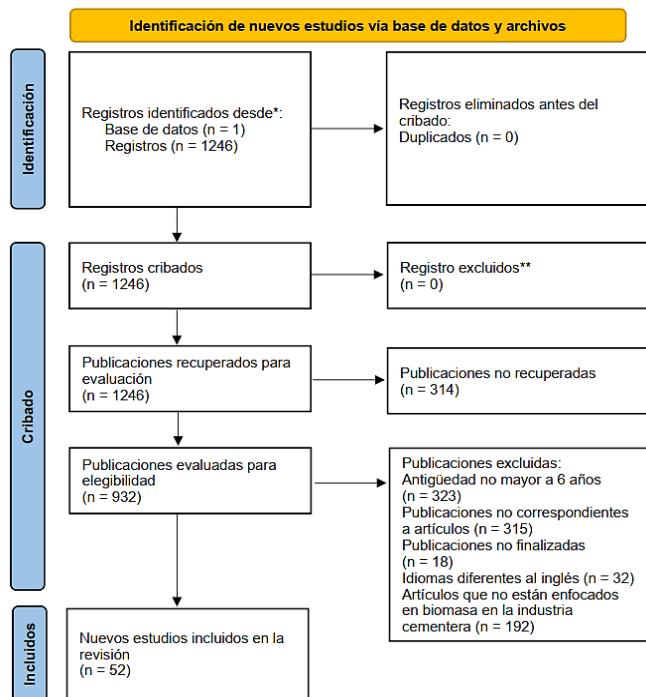


Fig. 1 Aplicación de la metodología PRISMA

III. RESULTADOS

El análisis de los estudios evidencia una marcada concentración geográfica de investigaciones en Europa, que representa aproximadamente 46 % del total. En esta región, Italia, España, Polonia y Alemania lideran el desarrollo de soluciones basadas en biomasa, impulsadas por políticas robustas de economía circular, estrategias de descarbonización industrial y el cumplimiento de directivas comunitarias orientadas a la reducción de emisiones en el sector cementero. Estas iniciativas europeas no solo promueven el uso de biomasa como sustituto parcial de combustibles fósiles, sino que también integran programas de valorización de residuos agrícolas y forestales, lo que fortalece la sostenibilidad del ciclo productivo.

En segundo lugar se encuentra Asia, con un 27 % de participación, donde destacan las contribuciones de China, India y Arabia Saudita. En estos países, el rápido crecimiento de la industria cementera, sumado a la presión por reducir la dependencia de combustibles fósiles, ha acelerado la exploración de alternativas sostenibles, incluyendo la codigestión de biomasa y la integración de residuos agroindustriales en hornos cementeros. Estas iniciativas reflejan una estrategia doble: mejorar la eficiencia energética y cumplir con metas de transición energética frente al aumento de la demanda de cemento.

Por su parte, América Latina representa apenas 11 % de los estudios, mientras que África alcanza 8 %, lo que evidencia avances incipientes centrados principalmente en el aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales como fuente energética. Estas investigaciones se enfocan en soluciones de

abajo costo adaptadas a contextos con infraestructura industrial limitada, donde la biomasa se percibe como una vía de sustitución parcial de combustibles fósiles para reducir la huella de carbono local.

Finalmente, Oceanía con 6 % y América del Norte con apenas 2 % muestran contribuciones puntuales, aunque caracterizadas por enfoques altamente innovadores, como el uso de biomasa combinada con captura de carbono, la optimización de la combustión con sistemas híbridos y la gestión avanzada de residuos industriales. Esta distribución desigual, representada en la Fig. 2, refleja que los esfuerzos globales para integrar biomasa en la industria cementera se concentran principalmente en regiones con marcos regulatorios sólidos y estrategias de transición energética activas, mientras que otras áreas avanzan de manera lenta pero con oportunidades de crecimiento futuro.

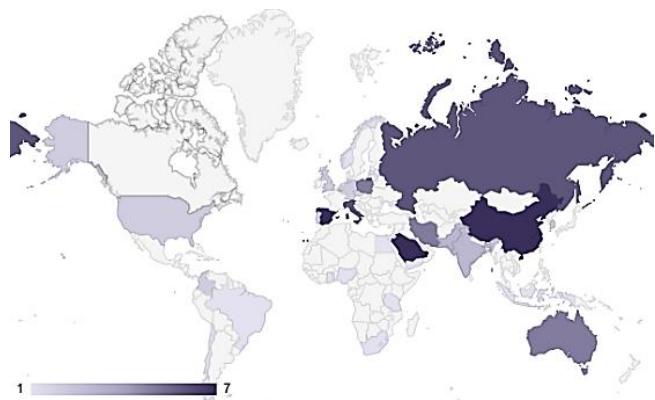


Fig. 2 Presencia de investigaciones relacionadas con la biomasa y su uso en industrias cementeras

Los estudios analizados evidencian una diversidad significativa en los tipos de biomasa utilizados, seleccionados según la disponibilidad local y las características técnicas de cada proceso. En total, se identificaron cinco categorías principales, representadas en la Fig. 3, destacando el origen agrícola como el más frecuente, con 26.9 % de las aplicaciones [4], [5], [10]–[14]. Dentro de esta categoría, la cascarilla de arroz resalta por su alto contenido de sílice (22 %) y celulosa (33 %), lo que la convierte en un material idóneo para aplicaciones cementicias debido a su capacidad para formar silicato de calcio hidratado (C-S-H), componente clave en la resistencia mecánica del cemento [8]. Otros residuos agrícolas destacados incluyen el bagazo de caña y las frondas de palma aceitera, ricos en holocelulosa ($\approx 83\%$), que no solo son aprovechados como biocombustibles sino que pueden reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 42 % cuando sustituyen combustibles fósiles [14], [20].

Los subproductos forestales, como virutas de madera y biochar, representan 15.4 % de los casos [4], [5], [15]. Un ejemplo relevante es el biocarbón derivado de *Pinus patula*, que alcanzó una eficiencia de conversión de 27.61 % en procesos de gasificación, además de mejorar la trabajabilidad de cementos para impresión 3D cuando se incorporó en proporciones de 5–

20 % en peso. Este enfoque combina la valorización energética con la optimización de propiedades funcionales del cemento, alineándose con los principios de economía circular.

En contraste, los residuos industriales concentran 50 % de las aplicaciones, con predominio de cenizas volantes y escorias como materiales de sustitución. Las cenosferas de ceniza volante (FACs), con 53.8 % de SiO₂ y 40.7 % de Al₂O₃, reemplazaron hasta 30 % de la arena en morteros, reduciendo la densidad en 15 % y mejorando el aislamiento térmico [7], [16]. Asimismo, el Tundish Deskulling Waste (TUN), un residuo de la industria siderúrgica, permitió evitar la calcinación de magnesita a 1500 °C, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂ y contribuyendo a la producción de cementos de fosfato de magnesio con un enfoque de economía circular [17].

Los orígenes urbanos, como neumáticos fuera de uso (NFU) y residuos electrónicos, representan 19.2 % de los casos [2], [5], [11], [17], [18]. En este grupo, el caucho natural presente en los NFU (20–25 %) se valorizó principalmente por su alto poder calorífico (35.86 MJ/kg), comparable al del coque de petróleo [17]. Esta valorización energética es relevante no solo por la sustitución de combustibles fósiles, sino también por la reducción del impacto ambiental asociado a la disposición final de residuos urbanos.

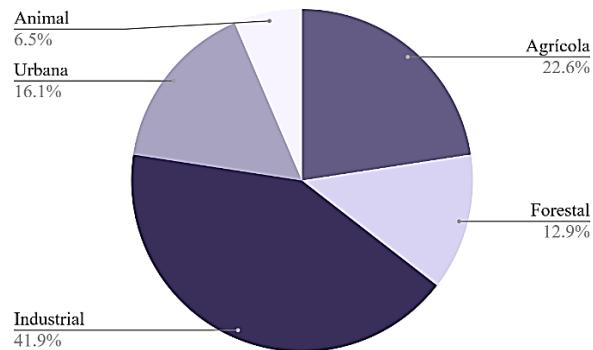


Fig. 3 Tipo de biomasa empleada como agente reductor de CO₂ en la industria cementera

La selección de biomasa en los estudios evaluados respondió a criterios técnicos, ambientales y económicos. En términos ambientales, 73 % de los trabajos priorizaron la reducción de emisiones de CO₂, destacando casos como el biochar, capaz de capturar hasta 2.5 kg de CO₂ por kg de material incorporado en hormigón [19]. La disponibilidad local fue determinante en 61.5 % de los estudios, como lo demuestra el aprovechamiento de algas *Sargassum* spp. en Brasil, cuyo secado y calcinación a 500 °C generaron carbonatos reactivos aplicables a matrices cementicias [20]. En el ámbito técnico, la reactividad puzolánica jugó un papel clave, especialmente en la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) rica en sílice amorfa, que aumentó la resistencia del concreto en 20 % al sustituir 15 % del cemento Portland [21].

Un 38.5 % de los estudios analizaron la mejora de propiedades mecánicas. Ejemplo de ello son las fibras de poda de olivo, que incrementaron la resistencia a flexión de cementos

alcalinos en 30 % en comparación con fibras sintéticas [7]. Estos resultados confirman que la valoración de biomasa en la industria cementera no solo tiene impacto ambiental al reducir emisiones, sino también funcional, al mejorar la calidad de los materiales y su eficiencia estructural. Los estudios revisados evidencian que la biomasa aplicada en la industria cementera pasa por tratamientos previos esenciales para optimizar su desempeño energético y cementicio. Estos procesos se clasifican en cuatro categorías principales (Tabla 3), de acuerdo con la complejidad del material y los objetivos buscados. En primer lugar, los tratamientos químicos abarcaron 25 % de los casos, aplicándose principalmente a biomasas complejas con elevada significación o presencia de impurezas. Dichos tratamientos incluyen la hidrólisis alcalina (NaOH) para la extracción de sílice y celulosa, el lavado ácido (HCl/H₂SO₄) para la remoción de metales pesados, la significación hidrotérmica a 165 °C y, en algunos casos, la fermentación enzimática para mejorar la degradación de compuestos orgánicos [16], [21], [22]. En segundo lugar, los procesos térmicos, aplicados en 30 % de los estudios, son críticos para activar propiedades cementicias. Estos abarcan la pirólisis (400–800 °C), que permite obtener biochar o cenizas reactivas, la calcinación (500–700 °C) para inducir reactividad puzolánica, y la incineración controlada de residuos agrícolas (≈ 600 °C), que reduce su volumen y genera subproductos con potencial de valorización energética. El tercer grupo corresponde a los procesos mecánicos, predominantes en 35 % de los casos, valorados por su simplicidad y bajo costo. Las biomasas sometidas a este tipo de tratamiento pasan por trituración (< 2 mm) y molienda fina hasta alcanzar tamaños de nanopartículas, acompañadas de tamizado y secado a 105 °C para disminuir la humedad. Ejemplos destacados son las cenósferas, que fueron clasificadas por densidad para optimizar su comportamiento en morteros y concretos. Finalmente, los tratamientos combinados o especiales representaron 10 % de los casos, donde se aplicaron métodos como la extracción con solventes eutécticos profundos, la impregnación con SO₂ para modificar la lignina, y el cultivo controlado de microalgas destinadas a generar biomasas con propiedades cementicias específicas. Estos tratamientos previos resultan determinantes para mejorar la reactividad puzolánica, optimizar el poder calorífico y facilitar la integración de la biomasa en los procesos cementerios, contribuyendo así tanto a la reducción de emisiones de CO₂ como a la eficiencia energética.

TABLA 3: FORMA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA BIOMASA EN EL PROCESO CEMENTERO

Categoría	Descripción	Referencia
Biomasa como combustible en horno, precalcinador o calcinador	Se usó biomasa (cascarilla de arroz, neumáticos, RDF, etc.) como combustible alternativo, en hornos cementeros.	[2], [8], [18], [29], [33]

Biomasa incorporada en mezcla (mortero/concreto)	La biomasa se usó como sustituto parcial del cemento, agua o agregados en mezclas de mortero/concreto, sin intervenir en el proceso de clinkerización.	[4], [6], [7], [9], [11], [13], [14], [17], [19], [20], [21], [22], [23], [25], [26], [30], [31], [35], [38], [40], [42], [45], [46], [47], [50], [51]
Uso en materiales aislantes	Desarrollo de aislantes con biomasa, sin relación con cemento.	[3]
Sustitución en mezcla de mortero (sin uso en horno)	Se mezcló con mortero directamente como agregado o aditivo, sin intervención en el proceso cementero.	[5], [12], [15], [16], [28], [39], [52]
Aditivos u otros productos químicos externos	Biomasa usada para fabricar gluconato de sodio, plastificantes o aditivos especiales, sin pasar por horno o calcinación.	[1],[10],[34],[36]
Aplicaciones alternativas (arcilla, impresión 3D, etc.)	Biomasa o derivados usados en impresión 3D, compuestos de arcilla o como moldes de construcción, fuera del proceso cementero.	[9], [24], [27], [32], [37]
Evaluaciones o simulaciones sin uso de biomasa en horno	Estudios centrados en concreto reciclado, inteligencia artificial o geopolímeros, sin intervención en el proceso cementero.	[43],[44],[48],[49]

En contraste con lo anterior, la maquinaria utilizada para hacer posible los diversos procesos, fueron los siguientes, hornos industriales, tales como los hornos rotatorios que cumplen la función de generar combustión por sistemas de alimentación controlada e integrar la energía solar y recuperar el calor residual [4], [5], [20], [23], [24], [25]. Por otro lado, en las tecnologías que no utilizaron hornos se realizaron procesos químicos como la hidrólisis alcalina o fermentación [6], [7], [14], [16], [18], mezclas curadas a temperatura ambiente o en agua y pirolisis externa [2], [13], [14], [21], [26], [27], de igual forma en las tecnología innovadora se empleó la impresión en 3D Delta WASP 2040 Clay para arcilla reforzada con fibra 20, modelado computacional, así, por ejemplo XGBoost, ANFIS, algoritmos genéticos, sistemas híbridos, como quemadores multifuel [7], [20]. Los estudios analizados demuestran también que la incorporación de biomasa y residuos en la industria cementera genera beneficios económicos significativos, principalmente a través de la reducción de costos de producción, observada en el 80.8% de los casos analizados . Entre los ahorros más destacados se encuentran la sustitución de materias primas convencionales, como el cemento Portland, cuyos costos pueden disminuir hasta en un 6.30% al emplear ceniza de cascarilla de arroz (RHA) [26], y hasta un 59.41% en morteros al reemplazar agregados naturales con cenósferas de ceniza volante [12]. Además, el uso de combustibles derivados de residuos (RDF) permite ahorros de 7.81€/GJ en comparación con combustibles fósiles, gracias a su bajo costo e incluso precios negativos en algunos mercados [2],[18]. La valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) también reduce

los costos asociados a emisiones de CO₂, reguladas por la Directiva 2003/87/CE, al aprovechar su alto poder calorífico (35.86 MJ/kg) [18],[36].

La disponibilidad local de biomasa fue un factor determinante en el 69.2% de los estudios, facilitando su integración en procesos industriales sin incurrir en costos elevados de transporte o adquisición. Por ejemplo, en España, la abundancia de poda de olivo y cenizas de biomasa permitió su uso en cementos activados alcalinamente sin incrementar costos logísticos [21],[22] mientras que en Brasil, la proliferación de algas *Sargassum* spp. en las costas facilitó su aprovechamiento como material cementicio suplementario [15]. En países con fuerte producción agrícola, como Indonesia y Colombia, los residuos de palma aceitera y bagazo de caña demostraron ser recursos accesibles, reduciendo los costos de producción en un 0.53% y 0.47%, respectivamente, al compararse con cadenas de suministro tradicionales [14],[16]. Asimismo, la reutilización de subproductos industriales, como el Tundish Deskulling Waste (TUN) en la siderurgia, evitó costos adicionales de extracción de minerales vírgenes, promoviendo un modelo de economía circular [6].

La fig. 4 muestra, que más del 86.5% de los estudios destacaron que el uso de biomasa no solo reduce costos, sino que también mejora la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de residuos. La incorporación de biochar en hormigones, por ejemplo, no solo disminuyó la dependencia del cemento Portland, sino que también permitió la captura de carbono, con potencial para almacenar 2.5 kg de CO₂ por kg de material [5] [47]. Además, el empleo de residuos urbanos, como pintura de látex y vidrio reciclado, evitó su disposición en vertederos, generando ahorros en gestión de desechos y reduciendo el impacto ambiental [4],[7],[42]. En el ámbito energético, la co-combustión de biomasa con hidrógeno en hornos cementerios logró una reducción del 5.17% en costos operativos y un 0.9% en consumo energético [29], mientras que el uso de ceniza volante y escoria de alto horno (GGBS) disminuyó el consumo eléctrico en un 10% en plantas de concreto premezclado [52]. Estos resultados evidencian que la integración de biomasa no solo es económicamente viable, sino también clave para avanzar hacia una industria cementera más circular y baja en emisiones.

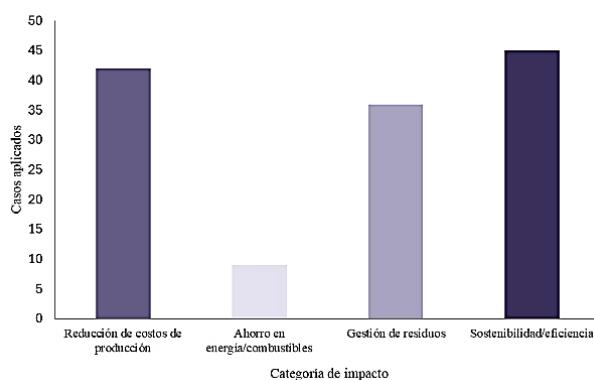


Fig. 4 Forma en la que impactó económicamente el uso de la biomasa en la industria cementera

Tal como se muestra en la Tabla 4, la implementación de la biomasa ha contribuido significativa en la reducción de emisiones de CO₂ con porcentajes que varían entre 5.8% y 73%, dependiendo de la tecnología y material empleado. Así mismo, la aplicación de otras biomasas contribuye a la causa, tales como la cascarilla de arroz que evitó el proceso de incineración; biocarbón en hormigón, capturó el CO₂, usando una carbonatación de curado, biochar, caucho reciclado y microalgas en concreto que no solo redujeron el uso energético si no que absorbieron el CO₂, ya sea por incorporación de mezclas o evitando las altas temperaturas en la calcinación.

Tabla 4: Porcentaje de reducción de CO₂

Biomasa	Reducción de CO ₂	Método Utilizado	Referencia
Mortero CRT-WG	30-40%	Uso de vidrio CRT reciclado	[4]
Cemento MPC-TUN	56%	Reducción de clinkerización	[6]
Cenizas de <i>Sargassum</i> , volante (FACs)	53.68%	Sustitución parcial de cemento	[11],[12]
Ceniza volante	19.50%	Uso como material cementicio suplementario	[13],[30]
Bagazo de caña y palma	5.82%-6.83%	Sustitución parcial de cemento	[15]
RDF y biomasa	42%	Reemplazo de petcoke	[18]
Cenizas fondo (BBA), volante (FA), laponita (LAP) y bentonita (BENT)	5.82%	Uso como material cementicio suplementario	[20],[21]
Ceniza de cascarilla de arroz (RHA)	6.30%	Uso como material cementicio suplementario	[22]
Limoncillo, palmeras datileras	30%	Sustitución parcial de cemento	[23],[25],[26]
Biochar en aditivos	10-15%	Uso como sustituto parcial de polímeros sintéticos	[32]
Geopolímeros modificados	72%	Eliminación de clinkerización	[42]
Fibras de coco	7%	Incorporación en la mezcla	[45]

Por otro lado, el 68% de los casos implementó la biomasa como un aditivo. No obstante, el 24% de casos utilizaron la biomasa como material sustituto parcial o total del coque de petróleo. Esto generó la reducción del 56% del uso del cemento Portland y otros recursos vírgenes. Por consiguiente, se reportaron mejoras en la eficiencia energética como el aprovechamiento del nivel calorífico, reducción del 5% al 10% en el uso del agua y energías, uso de materiales como cenosferas que disminuyeron el 43.2% de la densidad aplicada en el mortero y la disminución del 32% en costos energéticos por transporte, de ahí la razón de evitar el proceso de clinkerización

a 1450°C, además de del uso de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenar el calor o las fibras naturales que reducen la temperatura hasta 40°C.

La incorporación de biomasa y residuos en la industria cementera ha demostrado un impacto ambiental significativo, con un 75% de los estudios reportando reducciones del 15-40% en emisiones de NOx/SOx y material particulado al sustituir combustibles fósiles. Destacan casos como los neumáticos reciclados, con poder calorífico comparable al coque alcanzando un 35.86 MJ/kg, que además reducen emisiones tóxicas. Por otro lado, el 68% de las investigaciones evidencian avances en economía circular, evitando la quema de residuos agrícolas y desviando millones de toneladas de desechos como son las cáscaras de arroz, cenizas volantes, Sargassum hacia aplicaciones cementicias. En casos, las cenizas de bagazo redujeron el uso de cemento Portland en 25 a 50%, mientras que el vidrio de tubos CRT tratado minimizó riesgos por lixiviación de plomo. El 62% de los materiales alternativos mejoraron propiedades como la resistencia a compresión hasta +37.3% o la durabilidad. En el ámbito energético, el 55% de los casos reportan ahorros sustanciales: el biocarbón redujo la demanda de agua en mezclas entre 5 a 10%, los geopolímeros eliminaron la clinkerización a 1450°C, y las fibras naturales disminuyeron la energía incorporada en un 30 a 50%. Además, se lograron disminuciones del 40 a 60% en la extracción de recursos vírgenes, como el reemplazo de 110 kg/m³ de arena con ceniza de Sargassum, mientras que el concreto con paja o caucho mejoró su aislamiento térmico en un 20-35%.

La incorporación de biomasa en la industria cementera ha demostrado efectos significativos en las propiedades del material, con un 65% de los estudios reportando mejoras en resistencia mecánica además de un 4.9%-37.3% en compresión y durabilidad. Materiales como biocarbón, cenizas volantes y biochar han mostrado particular eficacia, mejorando la estructura interna del cemento mediante una mayor compactación y reducción de porosidad como se visualizó en el 40% de los casos. Sin embargo, un 15% de los estudios identifican efectos variables o negativos cuando se superan ciertos porcentajes de sustitución, como disminuciones en resistencia con más del 10% de biochar o pérdida de densidad en mezclas con fibras naturales.

Además de las mejoras mecánicas, el 43% de los estudios destacan optimizaciones en trabajabilidad, incluyendo mejor manejo del mortero y reducción en demanda de agua. La biomasa también ha demostrado amplios beneficios en durabilidad, particularmente contra condiciones extremas como ciclos de congelación-descongelación o exposición a químicos. No obstante, su implementación enfrenta retos importantes, el 60% de las investigaciones señalan la variabilidad en composición química como principal obstáculo, mientras que el 35% resaltan desafíos logísticos en recolección y procesamiento.

Estos factores exigen rigurosos controles de calidad y adaptaciones en las cadenas de suministro para garantizar consistencia en el material final. Para superar estas

limitaciones, el 25 % de los estudios proponen adaptaciones tecnológicas en hornos y sistemas de combustión, junto al desarrollo de aditivos especializados. Soluciones emergentes incluyen el uso de modelos predictivos en 15 % y pretratamientos de biomasa en 20 %, con el fin de optimizar su desempeño. Aunque los estudios latinoamericanos representan cerca del 11 % del total, casi ninguno aborda con detalle casos aplicados al sector cementero en países como Perú o Colombia. En Perú se desarrolló un estudio de factibilidad sobre la co-combustión de cascarilla de arroz en el horno de Cementos Pacasmayo, que propone sustituir hasta un 14 % del insumo energético con biomasa local sin comprometer la calidad del clíker [68]. En Colombia también se ha reportado el uso de lechos de biomasa en hornos cementeros, lo que indica que los casos locales pueden contribuir a la validación tecnológica y a la transferibilidad regional [68]. La mayoría de los procesos de conversión de biomasa no generaron residuos, pero otros sí, tal como se muestra en la Tabla 4, ya sea mediante la reutilización de la biomasa o a través del método de implementación empleado para generar energías limpias.

Además de las limitaciones técnicas y logísticas, los estudios revisados evidencian la existencia de barreras regulatorias que restringen la adopción de biomasa en la industria cementera. En varios casos se reporta que la co-combustión con residuos, como los neumáticos fuera de uso, enfrenta regulaciones fragmentadas y marcos normativos poco claros, lo que dificulta su implementación a gran escala [6]. De manera complementaria, se resalta que la transición hacia procesos más sostenibles requiere no solo infraestructura adecuada y protocolos de tratamiento estandarizados, sino también un marco regulatorio armonizado que facilite y estimule la incorporación de combustibles alternativos en los hornos cementeros [5].

En este contexto, la literatura también enfatiza los retos de escalamiento industrial. Si bien la biomasa ha mostrado resultados positivos en estudios de laboratorio y aplicaciones piloto, trasladar estos procesos a hornos cementeros de gran capacidad requiere cadenas de suministro robustas, sistemas de homogeneización de materia prima y adaptaciones en la infraestructura de combustión. Al mismo tiempo, la variabilidad química de la biomasa, incluyendo diferencias en contenido de humedad, cenizas, lignina y sílice, constituye un desafío crítico, ya que influye directamente en la reactividad puzolánica y en la estabilidad del proceso de clinkerización. Por ello, varios autores destacan la necesidad de implementar protocolos estandarizados de caracterización y control de calidad, de modo que la biomasa pueda ser integrada de manera confiable y consistente en la producción de cemento [67].

El siguiente aspecto, trata del impacto social que tuvieron los diversos países en los que se implementó la mejora de proceso de cemento, tal como se muestra en la Fig. 5, al imprentar un proceso diverso que requirió de más personal por ello se crearon diversos puestos de trabajo para procesos de residuos agrícolas, biotecnología [2],[13],[15],[18],[33],[45] gestión de neumáticos y residuos industriales. [28],[46];

economía circular, al reducir vertederos mediante valorización de residuos agrícolas, industriales y urbanos [1],[5-8],[12],[14],[17-52]; mejora en calidad del aire/suelo al evitar quema de residuos [1],[12-18],[21-25],[33],[45],[47] y reducción de acumulación de algas en playas [12]; Materiales ecológicos más accesibles para comunidades con recursos limitados [21-26],[30-32],[42],[44-47].

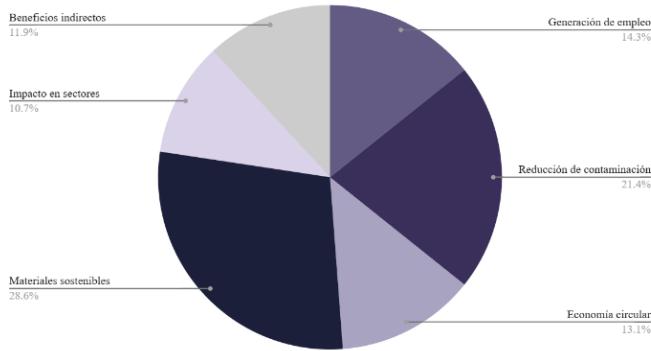


Fig. 5 Impacto social de la biomasa en los países que se implementó

IV. DISCUSIÓN

En la presente revisión sistemática de literatura se evidenció que la biomasa incorporada como ceniza tratada permite reducir hasta un 72 % las emisiones de CO₂, al tiempo que mejora la resistencia a compresión mediante el uso de biocarbón [5]. Este desempeño supera al obtenido con el agregado reciclado de concreto (RCA), cuya reducción de emisiones es gradual: 0.1913 % por cada 1 % de reemplazo con RCA grueso y 0.2418 % con RCA fino [66]. La diferencia se explica porque la biomasa permite una sustitución parcial de cemento y combustibles fósiles, disminuyendo la dependencia del proceso de clinkerización, mientras que el RCA se limita a optimizar el diseño de mezclas y mejorar el rendimiento mecánico del agregado reciclado, reduciendo la huella de carbono de manera proporcional al porcentaje de reemplazo.

Sin embargo, también se identificaron efectos adversos cuando se utilizaron cenizas de biomasa (BA) sin tratamiento previo. Su elevado contenido de SiO₂, CaO y Al₂O₃ puede incrementar el impacto ambiental y comprometer la calidad final del material cementicio [67]. Por ello, la aplicación de protocolos estandarizados de pretratamiento resulta esencial, incluyendo procesos como pirólisis, calcinación controlada, lavado ácido o hidrólisis alcalina, los cuales mejoran la reactividad puzolánica, aumentan la estabilidad térmica y reducen la formación de compuestos no deseados.

Asimismo, los resultados de la revisión muestran que la combinación de estrategias ofrece los mejores resultados en sostenibilidad. Procesos como la sustitución parcial de clinker con cenizas tratadas, el uso de biomasa como biocombustible en hornos y la optimización térmica de calcinadores contribuyen simultáneamente a reducir emisiones y mejorar propiedades mecánicas, especialmente cuando se integran con tecnologías emergentes como impresión 3D, análisis predictivo e inteligencia artificial para la optimización de mezclas [9], [24], [27], [66]. Además, la disponibilidad local de residuos

agrícolas y forestales favorece la adopción de estas estrategias bajo un enfoque de economía circular, mientras que el uso de biochar y cenizas volantes permite aprovechar pasivos ambientales y reducir la presión sobre los recursos naturales no renovables [5], [14], [20].

En conjunto, la evidencia sugiere que la biomasa tratada representa una alternativa integral para la descarbonización de la industria cementera, no solo por su capacidad de mitigación de emisiones, sino también por su aporte a la eficiencia energética y la valorización de residuos. Sin embargo, su implementación requiere infraestructura adecuada, protocolos de tratamiento estandarizados y un marco regulatorio armonizado que incentive la adopción masiva de estas soluciones sostenibles.

V. CONCLUSIONES

La revisión sistemática mostró que la incorporación de biomasa en la industria cementera permite reducir emisiones de CO₂ entre 5.8 % y 73 %, con resultados destacados en el uso de combustibles derivados de residuos y neumáticos fuera de uso. Estrategias como la co-combustión en hornos rotatorios y la sustitución parcial de agregados con cenizas de origen agrícola o marino demostraron ser especialmente eficaces, logrando reducciones adicionales de contaminantes como NO_x, SO_x y material particulado.

Los residuos agrícolas (26.9 %) y forestales (15.4 %), en particular la cascarilla de arroz, el bagazo de caña y las frondas de palma, se identificaron como biomasas con mayor potencial cementicio por su contenido de sílice, celulosa y holocelulosa, contribuyendo a la formación de C-S-H y al fortalecimiento mecánico del material. Aunque los residuos industriales representan el 50 % de las aplicaciones, su complejidad técnica y logística refuerza la necesidad de priorizar el uso de biomasa agrícola local.

Se recomienda fomentar el aprovechamiento de residuos agrícolas disponibles en países productores, como el Perú, y promover cadenas de suministro regionales bajo esquemas de economía circular. Futuras investigaciones deberían evaluar la integración con tecnologías limpias, como energía solar y captura de carbono, a fin de maximizar la eficiencia energética y avanzar en la descarbonización sostenible del sector cementero.

REFERENCIAS

- [1] E. Conterosito *et al.*, “Single step eco-efficient mild chemical process for the total valorisation of rice husk: a focus on the inorganics as a cement additive,” *RSC Adv*, vol. 14, no. 49, pp. 36314–36326, Nov. 2024, doi: 10.1039/d4ra05263c.
- [2] R. Roychand *et al.*, “Carbon sequestration from waste and carbon dioxide mineralisation in concrete – A stronger, sustainable and eco-friendly solution to support circular economy,” *Constr Build Mater*, vol. 379, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131221.
- [3] A. Przybek and M. Łach, “Insulating Innovative Geopolymer Foams with Natural Fibers and Phase-Change Materials—A Review of Solutions and Research Results,” *Materials*, vol. 17, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/ma17184503.

[4] W. Ahmad, V. S. S. C. S. Veeraghantla, and A. Byrne, "Advancing Sustainable Concrete Using Biochar: Experimental and Modelling Study for Mechanical Strength Evaluation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/su17062516.

[5] E. Beguedou, S. Narra, E. Afrakoma Armoor, K. Agboka, and M. K. Damgou, "Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/EN16083533.

[6] E. Aprianti, P. Shafiq, S. Bahri, and J. N. Farahani, "Supplementary cementitious materials from agricultural wastes – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 176–187, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010.

[7] H. Ali *et al.*, "Optimization of seismic performance in waste fibre reinforced concrete by TOPSIS method," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/S41598-023-35495-9.

[8] G. P. Kusuma, S. Gupta, and S. Bhattacharya, "Biochar as a sustainable carbon sink and its role in CO₂ emission mitigation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 370, p. 133481, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133481.

[9] M. Quaini, P. Tognon, and L. Rossetti, "Performance of bio-based supplementary cementitious materials for CO₂ reduction in the cement industry," *Construction and Building Materials*, vol. 409, p. 134232, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134232.

[10] A. Alfocea-Roig, A. Müller, B. Steubing, S. Huete-Hernández, J. Giro-Paloma, and J. Formosa, "Life cycle assessment of the climate change impact of magnesium phosphate cements formulated with tundish deskulling waste compared to conventional cement," *Sustain Chem Pharm*, vol. 42, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.sep.2024.101802.

[11] M. A. Gómez-Casero, L. Pérez-Villarejo, E. Castro, and D. Eliche-Quesada, "Reinforcement of alkali-activated cements based matrices using olive pruning fibres as an alternative to traditional fibres," *Sustain Chem Pharm*, vol. 37, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.sep.2024.101433.

[12] A. Mahmood *et al.*, "Preparation of Green Sustainable Cement Paste Mixture Based on Inorganic Additives: An Experimental and Modelling Approach," *Buildings*, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14071922.

[13] K. Zhu *et al.*, "One-Part Alkali-Activated Wood Biomass Binders for Cemented Paste Backfill," *Minerals*, vol. 15, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/MIN15030273.

[14] S. Taheri, X. Zhong, S. M. Clark, B. Samali, and N. Saeed, "Sustainable concrete utilizing waste latex paint," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 43, p. e01219, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01219.

[15] J. G. Villegas, G. Álvarez-López, L. Y. Jaramillo, and M. Romero-Sáez, "Supply Chain (Re)Design and Pricing for Biomass Ash Valorization as Supplementary Cementitious Materials," *Recycling*, vol. 10, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.3390/RECYCLING10020034.

[16] A. N. Beskopylny, M. Hematibahar, K. Momeni, S. A. Stel'makh, and E. M. Shcherban', "Performance Optimization of Masonry Mortar with Marble Dust, Spent Coffee Grounds, and Peanut Shell Ash," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 11, no. 3, pp. 963–987, Mar. 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-03-09.

[17] J. Hercog *et al.*, "Pilot testing and numerical simulations of the multifuel burner for the cement kiln," *Fuel*, vol. 342, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.FUEL.2023.127801.

[18] S. Moreno, M. Rosales, J. Rosales, F. Agrela, and J. L. Díaz-López, "Feasibility of Using New Sustainable Mineral Additions for the Manufacture of Eco-Cements," *Materials*, vol. 17, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.3390/MA17040777.

[19] A. Diotti, L. Cominoli, G. Plizzari, and S. Sorlini, "Experimental Evaluation of Recycled Aggregates, Washing Water and Cement Sludge Recovered from Returned Concrete," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/APP12010036.

[20] X. Y. Wang, "Optimal design of low-carbon concrete containing fly ash and limestone powder," *Ceramics - Silikaty*, vol. 66, no. 2, pp. 202–210, 2022, doi: 10.13168/CS.2022.0014.

[21] A. Alsaif and Y. M. Abbas, "Interpretable constitutive compressive stress-strain model for rubberized aggregate concrete – Integrating comprehensive empirical database and efficient XGBoost ensemble learning," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03382.

[2OK2] M. N. Amin, B. Iftikhar, K. Khan, and M. T. Qadir, "Analyzing the compressive strength, eco-strength, and cost-strength ratio of agro-waste-derived concrete using advanced machine learning methods," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 64, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1515/RAMS-2025-0091.

[23] V. Arularasi *et al.*, "Effects of Admixtures on Energy Consumption in the Process of Ready-Mixed Concrete Mixing," *Materials*, vol. 15, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/MA15124143.

[24] S. A. Eftekhar Afzali, M. A. Shayanfar, M. Ghanooni-Bagha, E. Golafshani, and T. Ngo, "The use of machine learning techniques to investigate the properties of metakaolin-based geopolymers concrete," *J Clean Prod*, vol. 446, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141305.

[25] A. Pascoal, A. Almeida, S. Capitão, and L. Picado-Santos, "Improvement of Warm-Mix Asphalt Concrete Performance with Lignin Obtained from Bioethanol Production from Forest Biomass Waste," *Materials*, vol. 16, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/MA16237339.

[26] Y. Du, A. Korjakin, M. Sinka, and I. Pundienė, "Lifecycle Assessment and Multi-Parameter Optimization of Lightweight Cement Mortar with Nano Additives," *Materials*, vol. 17, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/ma17174434.

[27] C. Allegretti *et al.*, "Towards a Complete Exploitation of Brewers' Spent Grain from a Circular Economy Perspective," *Fermentation*, vol. 8, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/fermentation8040151.

[28] S. Han *et al.*, "Sustainable Design of Self-Consolidating Green Concrete with Partial Replacements for Cement through Neural-Network and Fuzzy Technique," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/SU15064752.

[29] A. Subaie, A. Al-Brahim y K. Al-Mutairi, "Energy and emission assessment of co-processing biomass and alternative fuels in cement kilns," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 1642–1656, 2024. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.03.089.

[30] M. S. Barkhordari, D. J. Armaghani, M. M. S. Sabri, D. V. Ulrikh, and M. Ahmad, "The Efficiency of Hybrid Intelligent Models in Predicting Fiber-Reinforced Polymer Concrete Interfacial-Bond Strength," *Materials*, vol. 15, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/MA15093019.

[31] C. Xie *et al.*, "Biochar-based low-carbon cement: mechanical performance and life-cycle assessment," *Cement and Concrete Composites*, vol. 154, p. 106512, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.106512.

[32] M. Sahlani, M. E. Hermawan, I. M. Hidayatullah, S. Kartohardjono, A. R. Arevin, and H. Hermansyah, "Sodium gluconate synthesis from oil palm frond: Optimization of neutralisation and purity enhancement through low-pressure nanofiltration," *Results in Engineering*, vol. 23, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2024.102367.

[33] J. Li *et al.*, "Synergistic use of biochar and fly ash in cement-based materials: Strength and CO₂ reduction," *Journal of Cleaner Production*, vol. 427, p. 139260, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.139260.

[34] A. Sirico, P. Bernardi, C. Sciancalepore, B. Belletti, D. Milanese, and A. Malcevski, "Combined effects of biochar and recycled plastic aggregates on mechanical behavior of concrete," *Structural Concrete*, vol. 24, no. 5, pp. 6721–6737, Oct. 2023, doi: 10.1002/SUCO.202200949.

[35] Q. Xia and Y. Ji, "Study on Frost Resistance of Recycled Rubber Straw Concrete Using Particle Swarm Optimization Enhanced Artificial Neural Networks," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/POLYM16223191.

[36] H. A. Alqaifi *et al.*, "Efficiency of graphene-based rubberized cementitious material for thermal behavior: An experimental and theoretical approach," *Results in Engineering*, vol. 25, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104057.

[37] E. M. Golafshani, A. Behnood, T. Kim, T. Ngo, and A. Kashani, "Metaheuristic optimization based- ensemble learners for the carbonation assessment of recycled aggregate concrete," *Appl Soft Comput*, vol. 159, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.ASOC.2024.111661.

[38] E. Asadi Shamsabadi, S. Mohammadzadeh Chianeh, P. Zandifaez, and D. Dias-da-Costa, "Multi-target machine learning-assisted design of sustainable steel fibre-reinforced concrete," *Structures*, vol. 71, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2024.108036.

[39] A. N. Beskopylny *et al.*, "Structure formation, rheology and properties of sulfur concrete mixtures and sulfur concrete modified with bitumen and stone flour," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.CSCM.2024.E02917.

[40] X. Shi, J. Liu, Y. Zhang, and Z. Liu, "Biomass co-firing in cement kilns: Emission reduction and energy efficiency evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, 113238, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113238.

[41] G. H. A. Ting, Y. W. D. Tay, T. K. N. Quah, M. J. Tan, and T. N. Wong, "Sustainable Support Material for Overhang Printing in 3D Concrete Printing Technology," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/APP14177800.

[42] F. Herrera, M. Aguilar, and D. Cano, "Circular economy in cement: integrating agro-industrial residues for CO₂ mitigation," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 45, p. e01312, 2025, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01312.

[43] A. S. Balykov, T. A. Nizina, and S. V. Volodin, "Optimization of technological parameters for obtaining mineral additives based on calcined clays and carbonate rocks for cement systems," *Nanotechnologies in Construction*, vol. 14, no. 2, pp. 145–155, 2022, doi: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-145-155.

[44] K. Khan, M. A. Aziz, M. Zubair, and M. N. Amin, "Biochar Produced from Saudi Agriculture Waste as a Cement Additive for Improved Mechanical and Durability Properties—SWOT Analysis and Techno-Economic Assessment," *Materials*, vol. 15, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/MA15155345.

[45] P. Mora, A. Alarcón, L. Sánchez-Martín, and B. Llamas, "Biomass content in scrap tires and its use as sustainable energy resource: A CO₂ mitigation assessment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/SU13063500.

[46] M. Valente, M. Sambucci, A. Sibai, and E. Musacchi, "Multi-physics analysis for rubber-cement applications in building and architectural fields: A preliminary analysis," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/SU12155993.

[47] W. Schmidt *et al.*, "Sustainable circular value chains: From rural waste to feasible urban construction materials solutions," *Developments in the Built Environment*, vol. 6, May 2021, doi: 10.1016/j.dibe.2021.100047.

[48] E. M. Golafshani, A. Behnood, T. Kim, T. Ngo, and A. Kashani, "Metaheuristic optimization based- ensemble learners for the carbonation assessment of recycled aggregate concrete," *Appl Soft Comput*, vol. 159, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.ASOC.2024.111661.

[49] L. Zhang, W. Li y F. Xie, "Influence of biochar and fly ash on the mechanical properties and carbon footprint of Portland cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 422, p. 136547, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136547.

[50] S. Sanei and A. Modarres, "Optimization of asphalt cold recycling containing ordinary and waste additives based on life cycle assessment considering the road traffic level- case study: Coal preparation plant," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02239.

[51] A. Siddika, M. A. A. Mamun, R. Alyousef, and H. Mohammadhosseini, "State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete," *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol. 33, pp. 294–307, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.10.006.

[52] O. Cavalett, M. D. B. Watanabe, M. Voldsdund, S. Roussanaly, and F. Cherubini, "Paving the way for sustainable decarbonization of the European cement industry," *Nature Sustainability*, vol. 7, pp. 568–580, 2024, doi: 10.1038/s41893-024-01320-y.

[53] A. K. Quevedo Parra and M. C. Romano, "Decarbonization of cement production by electrification," *Journal of Cleaner Production*, vol. 425, 138913, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138913.

[54] M. J. B. de Moraes *et al.*, "Seaweed waste in eco-friendly construction materials: Valorization of Sargassum ash as a mineral addition in fiber cements," *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 9, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.clcb.2024.100117.

[55] Z. He *et al.*, "Utilization of agricultural biomass ash in eco-friendly cementitious composites," *Journal of Cleaner Production*, vol. 430, p. 139549, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.139549.

[56] F. Pacheco-Torgal *et al.*, "Eco-efficient cements: Potential, drawbacks and future prospects," *Construction and Building Materials*, vol. 263, 2020, 120–145.

[57] M. Ulewicz, J. Jura, and A. Gnatowski, "Cement Mortars Based on Polyamide Waste Modified with Fly Ash from Biomass Combustion—A New Material for Sustainable Construction," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16073079.

[58] L. A. Vergara, J. F. Perez, and H. A. Colorado, "3D printing of ordinary Portland cement with waste wood derived biochar obtained from gasification," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02117.

[59] H. Li, X. Wang y L. Chen, "Performance of cement composites incorporating rice husk biochar: Mechanical, thermal and environmental assessment," *Journal of Building Engineering*, vol. 95, p. 109347, 2024. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109347.

[60] S. S. Volaitiy, B. K. Aylas-Paredes, T. Han, *et al.*, "Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production," *npj Materials Sustainability*, vol. 3, art. 23, 2025, doi: 10.1038/s44296-025-00068-6.

[61] S. Moreno, M. Rosales, J. Rosales, F. Agrela, and J. L. Díaz-López, "Feasibility of Using New Sustainable Mineral Additions for the Manufacture of Eco-Cements," *Materials*, vol. 17, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.3390/ma17040777.

[62] A. N. Beskopylny *et al.*, "Structure formation, rheology and properties of sulfur concrete mixtures and sulfur concrete modified with bitumen and stone flour," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.CSCM.2024.e02917.

[63] A. S. Balykov, T. A. Nizina, and S. V. Volodin, "Optimization of technological parameters for obtaining mineral additives based on calcined clays and carbonate rocks for cement systems," *Nanotechnologies in Construction*, vol. 14, no. 2, pp. 145–155, 2022, doi: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-145-155.

[64] M. N. Amin, B. Iftikhar, K. Khan, and M. T. Qadir, "Analyzing the compressive strength, eco-strength, and cost-strength ratio of agro-waste-derived concrete using advanced machine learning methods," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 64, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1515/rams-2025-0091.

[65] E. Asadi Shamsabadi, S. Mohammadzadeh Chianeh, P. Zandifaez, and D. Dias-da-Costa, "Multi-target machine learning-assisted design of sustainable steel fibre-reinforced concrete," *Structures*, vol. 71, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2024.108036.

[66] F. Graziano *et al.*, "Concrete Mix Design of Recycled Concrete Aggregate (RCA): Analysis of Review Papers, Characteristics, Research Trends, and Underexplored Topics," *Resources 2025*, Vol. 14, Page 21, vol. 14, no. 2, p. 21, Jan. 2025, doi: 10.3390/RESOURCES14020021.

[67] R. T. Kusuma, R. B. Hiremath, P. Rajesh, B. Kumar, and S. Renukappa, "Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163, p. 112503, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112503.

[68] A. H. van den Bos, Biomass as an alternative fuel in cement Pacasmayo, Peru, eindhoven university of technology, 2016. [Online]. Available: <https://research.tue.nl/files/96894991/630673.pdf>