

EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO Y ECOEFICIENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL Y MODIFICADO. REVISIÓN DE LITERATURA

Jorge Hernán Gómez-Ospina¹, Santiago Herrera-Herrera², Cristian Ferney Rodríguez-Rojas³, Oscar Felipe Arbelaez-Pérez⁴

¹ Ingeniero civil. Semillero de investigación en materiales y estructuras. Universidad Cooperativa de Colombia. jorge.gomezosp@campusucc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2937-3227>

² Ingeniero Civil. Semillero de investigación en materiales y estructuras. Universidad Cooperativa de Colombia. santiago.herrerah@campusucc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5880-8964>.

³ Ingeniero Civil. Semillero de investigación en materiales y estructuras, Universidad Cooperativa de Colombia, cristianf.rodriquezr@campusucc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4237-8608>.

⁴ Doctor en Ingeniería. Profesor Titular. Grupo de investigación termomec, Universidad Nacional de Colombia, oscar.arbelaez@campusucc.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8592-5333>.

RESUMEN

El impacto ambiental negativo del CO₂ proveniente de la industria del hormigón, requiere la sustitución de los materiales tradicionales, por residuos que mejoren las propiedades mecánicas, y disminuyan la emisión del CO₂. Esta revisión de literatura, recopila la información de artículos de investigación entre 2000 y 2021. Se analizan las características de diseño, las propiedades mecánicas y las emisiones de CO₂ y la ecoeficiencia del hormigón modificado. Se encontró que el CO₂ emitido, depende del tipo de sustituto, así como de su porcentaje de sustitución, además de las condiciones de diseño de hormigón, tales como la relación agua/cemento y la resistencia a compresión. Se discuten las perspectivas frente al tema y los desafíos que enfrenta la industria del hormigón. Se espera que esta revisión motive incluir el cálculo de las emisiones y la ecoeficiencia de los hormigones como parámetro para cuantificar su impacto ambiental.

Palabras clave: Concretos modificados, Emisiones de CO₂, Ecoeficiencia, Residuos agroindustriales, Sustitutos cementantes

Recibido: 18 de febrero de 2024. Aceptado: 2 de Junio de 2024
Received: February 18, 2024. Accepted: June 2, 2024

CARBON DIOXIDE EMISSIONS AND ECO-EFFICIENCY OF TRADITIONAL AND MODIFIED CONCRETE. LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

The negative environmental impact of the CO₂ emitted from concrete manufacturing requires that traditional materials be replaced by waste that improves mechanical properties and reduces the release of CO₂. This literature review compiles information from research articles between 2000 and 2021, in which the design characteristics and the results reported on the mechanical properties and CO₂ emissions of concrete are analyzed. Likewise, the eco-efficiency of the reported mixtures was calculated. It was found that the CO₂ produced depends on the type of substitute, as well as its substitution percentage, in addition to the concrete design conditions, such as the water/cement ratio and compressive strength. Perspectives on the topic and challenges facing the concrete industry are discussed. It is expected that this review will motivate the inclusion of the calculation of emissions and eco-efficiency of concrete as a parameter to quantify its environmental impact.

Keywords: *Modified concrete, CO₂ emission, Eco-efficiency, Agro-industrial waste, Cement substitutes*

Cómo citar este artículo: J. H. Gómez-Ospina, S. Herrera-Herrera, C.F. Rodríguez-Rojas. O. Arbeláez-Pérez. "Emisiones de dióxido de carbono y ecoeficiencia del hormigón tradicional y modificado. Revisión de literatura.", *Revista Politécnica*, vol.20, no.40 pp.61-79, 2020. DOI:10.33571/rpolitec.v20n40a4

1. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia del hormigón en el desarrollo de la industria de la construcción (infraestructura de puentes, edificios, terminales aéreas y marítimas, carreteras, entre otros), este, es considerado el segundo material más utilizado después del agua, con un consumo promedio de 1 m³ por persona al año [1]. Su elevado consumo está asociado con su alto rendimiento y elevada versatilidad, así como la disponibilidad de precursores primas para su elaboración [2]. La industria del hormigón contribuye de manera significativa en el aumento del producto interno bruto y la generación de puestos de trabajo [3]. La industria del hormigón demanda alrededor del 50% de la energía mundial [4], genera 30% del volumen de residuos [5], consume 15% del uso de agua dulce [6] y emite alrededor del 33% del CO₂ a nivel mundial [7].

La composición del hormigón depende principalmente de su uso, sin embargo, los materiales precursores son entre otros, el cemento (alrededor del 15%), los agregados (finos, entre el 25% y el 30% y gruesos, entre el 75% al 70% y el agua (aproximadamente el 22%) [8]. A pesar de que el cemento solo representa alrededor del 15%, este, es el mayor emisor de CO₂, durante la preparación del hormigón, generando un impacto ambiental negativo en lo relacionado con esta industria [9]. El cemento es un material aglutinante de alta energía incorporada, con una emisión de dióxido de carbono, que oscila entre los 0.66 Ton y 0.82 Ton de CO₂ emitido por cada tonelada elaborada, esta emisión representa aproximadamente del 6% al 7% de las emisiones antropogénicas de CO₂ [10].

Como estrategia amigable con el medio ambiente, se ha propuesto el uso de materiales cementantes alternativos al cemento [11], que permitan reducir el dióxido de carbono emitido y generar estrategias de aprovechamiento de diferentes subproductos de la industria y la agroindustria [12]. En general, estos residuos no cuentan con planes adecuados de eliminación y se disponen de manera inadecuada en vertederos, convirtiéndose en una preocupación ambiental creciente [13]. El aprovechamiento de materiales de desecho y subproductos de la industria tiene innumerables beneficios, entre ellos: 1) la preservación de los recursos de la naturaleza, 2) la disminución del uso de los recursos energéticos y 3) la resolución de problemas de gestión de desechos [14].

Diferentes residuos como cenizas volantes [15], [16], escoria triturada de alto horno [17], escoria de acero [18], metacaolín [19], polvo de vidrio [20], [21], y cenizas preparadas a partir de cascarilla de arroz [22], [23], cascara de huevo [24], [25], [26], bagazo de caña [27], [28], [29] cascara de palma de aceite [30], [31], [32], entre otros, han sido utilizados como materiales cementantes sustitutos del aglutinante en la producción de hormigones.

Los diferentes reportes afirman que las características del hormigón modificado dependen de la naturaleza física y química de los sustitutos, el tipo de sustituto, y su proporción de reemplazo dentro de la mezcla [33]. Se encontró que los reportes han estado centrados principalmente en el estudio de: 1) la microestructura (mediante estudios de microscopía electrónica, tanto de barrido como de transmisión), 2) de la naturaleza cristalina (por análisis de difracción de rayos X) y 3) de las propiedades físicas durante la preparación de la mezcla y, 4) de las características mecánicas después del fraguado del hormigón modificado.

Dada la importancia que tiene el uso de diferentes sustitutos del cemento, se ha reportado un aumento en la cantidad publicaciones en esta temática, los cuales, cubren información sobre las propiedades de los residuos y de los atributos contrastantes del hormigón fresco y endurecido (propiedades mecánicas y durabilidad, principalmente). La Figura 1 muestra las publicaciones asociadas con hormigones preparados con residuos.

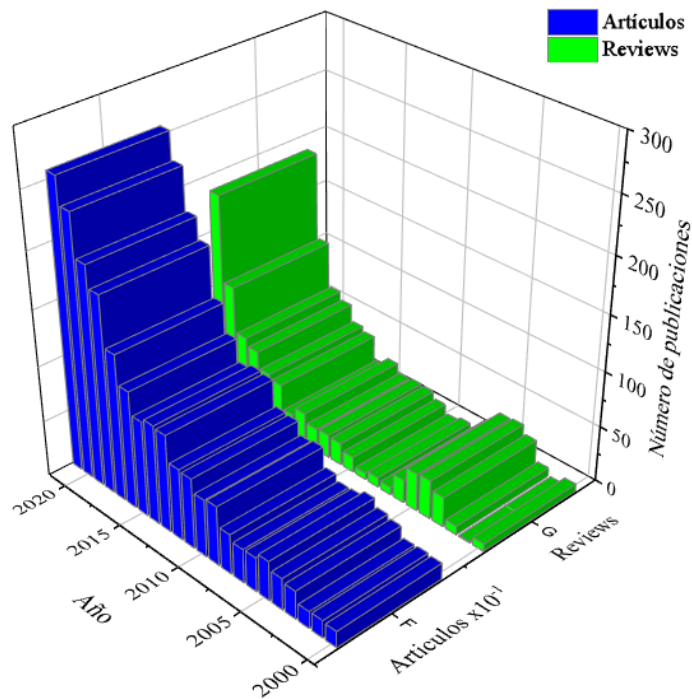


Fig. 1. Número de publicaciones en Scopus en los últimos 20 años sobre hormigones modificados

Tal como aprecia en la Figura 1, entre el año 2000 y 2021, se presenta un crecimiento en la cantidad de trabajos relacionadas con la preparación de hormigones modificados. Se encontraron un total de 11062 artículos (palabras claves: modified concrete). De la Figura 1 se aprecia que, de 148 artículos reportados en el año 2000, se pasó a publicar en promedio 1057 artículos en los últimos cinco años (2017-2021), dando cuenta de la importancia de esta temática de investigación. Asimismo, de la Figura 1 se aprecia el aumento en la cantidad de reviews (sistemáticas y del estado del arte sobre hormigones modificados), sin embargo, no se encuentran revisiones que aborden el efecto que tiene la incorporación de diferentes residuos sobre el CO₂ que se emite durante la elaboración de hormigones modificados, por tanto, se hace necesario abordar revisiones de literatura, que permitan estrechar esta brecha del conocimiento, y aportar información valiosa para futuros estudios en esta línea de investigación. En la Figura 2, se presenta de manera porcentual, el número de reportes por tipo de sustituto publicados en el año 2021.

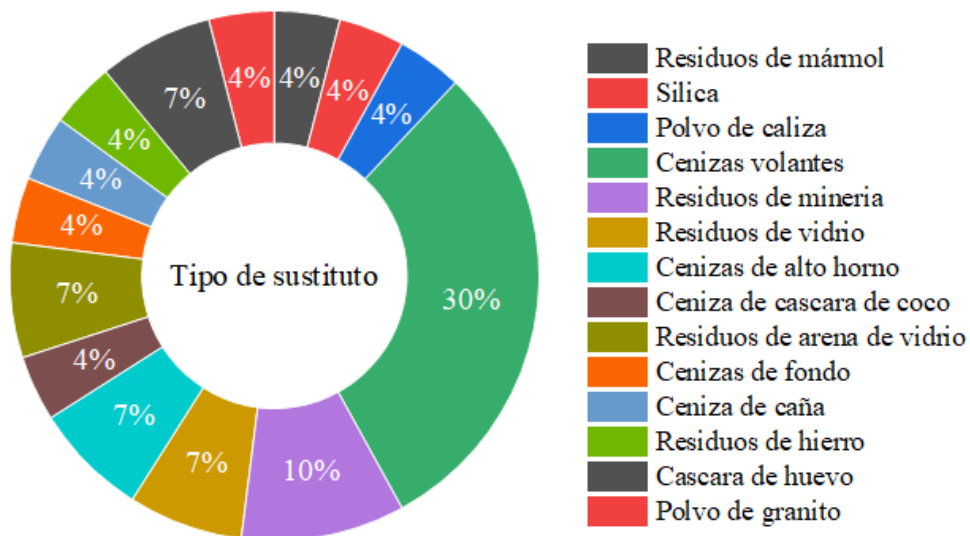


Fig. 2. Porcentaje de publicaciones sobre hormigón modificado por tipo de sustitución en 2021

De acuerdo con la Fig. 2, del número total de estudios publicados en 2021, el porcentaje más alto abordó la preparación de hormigón modificado incorporando cenizas volantes (30%), residuos de minería (10%), residuos de vidrio (7%), escoria de alto horno (7%), residuos de arena de fundición (7%) y residuos de mármol (7%), comportamiento relacionado con la naturaleza puzolánica de estos materiales [34]. Ante la urgente situación de reducir el CO₂ que se emite, es fundamental comprender el nivel de emisiones de CO₂ de los hormigones modificados. El objetivo de esta revisión es identificar la contribución de los materiales sustitutos en las emisiones de dióxido de carbono, aclarar las fuentes de emisión y los principales contribuyentes, y proporcionar una base para un mayor desarrollo de medidas de reducción efectivas.

2. METODOLOGIA

Tradicionalmente el hormigón ha sido elaborado a partir de agregados y cemento, generando elevadas emisiones de dióxido de carbono; la utilización de residuos de diversas procedencias tienen el potencial para reducir dióxido de carbono emitido, sin embargo, no se han encontrado revisiones de literatura que den cuenta del estado actual de los reportes acerca del cálculo y el análisis del CO₂ que se emite en la preparación de concretos tradicionales y modificados y de esta manera llenar el vacío existente en este tópic de investigación. Este artículo de revisión está estructurado en tres partes: La primera parte describe el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono, la segunda parte muestra los resultados encontrados por diferentes autores, en la tercera parte se discuten los resultados encontrados por los autores y se plantean las brechas de conocimiento y las áreas de investigaciones futuras en la evaluación del CO₂ emitido durante la preparación de hormigón tradicional y modificado. La presente revisión sistemática de literatura aborda los retos que enfrenta la industria del hormigón frente a la cuantificación del CO₂ total emitido, convirtiéndose en un parámetro fundamental para evaluar el impacto ambiental en la producción del hormigón.

En este sentido, este trabajo se desarrolló en cuatro etapas: La primera etapa se centró en identificar los trabajos reportados en la base de datos Scopus en el período comprendido entre 2000 y 2021 centrados en la emisión de dióxido de carbono en hormigones (concrete, carbon dioxide emissions) como palabra clave general, para la búsqueda, se utilizó el conector AND. Seguidamente, en la segunda etapa, los artículos resultantes se exploraron más en detalle utilizando palabras clave más específicas, que incluyeron: 1) cement, concrete, carbon dioxide emissions (n = 1136 artículos), 2) cement, concrete, carbon dioxide emissions wastes (n = 400 artículos) y 3) cement, concrete, carbon dioxide emissions equivalent (n = 70 artículos). A continuación, los artículos seleccionados se exploraron teniendo en cuenta las palabras clave (keywords) y el resumen (abstract). La tercera etapa se centró en los trabajos que fueron seleccionados en torno al CO₂ emitido durante la elaboración del hormigón modificado. En consecuencia, la última etapa, permitió la selección de 23 artículos de los revisados inicialmente, de estos, se extrajo el reporte del CO₂ que se emitió. Además, con los datos reportados por los autores, se calculó la ecoeficiencia (E_f), Ecuación 1, como indicador para evaluar el efecto del uso de sustitutos en el concreto sobre el beneficio ambiental.

$$E_f = \frac{E_{CO_2}}{f_c'} \quad (1)$$

Donde E_f es la ecoeficiencia (kg CO₂/ MPa), E_{CO_2} son las emisiones totales de CO₂ (kg CO₂) y f_c' es la resistencia a la compresión (MPa).

2.1 Emisiones de dióxido de carbono

Durante los últimos diez años, ha existido un interés creciente en la evaluación del desempeño medioambiental de cada una de las etapas de producción del cemento y el hormigón tanto tradicional como modificado [35]. Como se mencionó previamente, el hormigón tradicional se compone de mezcla de agregados, cemento y agua, y la cantidad de cada uno, depende de las condiciones particulares del uso final del hormigón y dado el impacto ambiental que tiene esta industria, se hace necesario el conocimiento de la cantidad de CO₂ que se genera por cada uno de los materiales y procesos de producción involucrados en la industria del hormigón [36].

Las emisiones de CO₂ totalizan la cantidad de este compuesto emitido principalmente durante las etapas de: 1) Elaboración, y 2) Transporte de los precursores tradicionales y sustitutos y 3) Fabricación del hormigón, por lo cual es necesario conocer la cantidad de dióxido emitido en cada una de las etapas [39]. La etapa de producción de las materias primas se refiere a las emisiones de CO₂ durante la producción de los principales componentes del hormigón, como cemento, agregados, agua, aditivos y sustitutos. La etapa de transporte involucra la emisión de CO₂ durante el transporte de materias primas a la planta de fabricación de hormigón. La emisión de CO₂ de la etapa de fabricación del hormigón proviene del consumo de energía in situ en la planta de producción [40].

2.2 Emisiones de CO₂ durante etapa de producción de las materias primas

Una manera general de calcular las emisiones de CO₂ que se genera durante la producción del hormigón puede calcularse tal como se muestra en la ecuación 2.

$$CO_{2m} = \sum_{i=1}^n Q_i * F_{im} \quad (2)$$

Donde CO_{2m}, describe los kgCO₂/m³ producidos durante la etapa de producción de las materias primas, Q_i detalla los kg/m³ de material utilizado y F_{im} hace alusión al factor de emisión de cada material durante la etapa de producción [41]. Los factores de emisión de cada uno de los precursores utilizados en la preparación de hormigones modificados. La tabla 1 muestra los valores de estos factores.

Tabla 1. Factores de emisión de precursores del hormigón

Material	Factor de emisión (kgCO _{2e} /kg)	Ref.
Cemento	0.83	[42]
	0.90	[43]
	0.80	[44]
	0.81	[45]
	0.79	[46]
Escoria de acero	0.0031	[47]
Sílica	0.014	[1]
Cenizas volantes	0.010	[1]
	0.027	[48]
Agregados gruesos	0.054	[49]
	0.054	[50]
Agregados finos	0.041	[48]
Agua	0.0003	[42]

2.3 Emisiones de dióxido de carbono durante la etapa de transporte

La evaluación de las emisiones de CO₂ asociadas con la etapa de transporte, totalizan la cantidad total y la carga de cada vehículo utilizado durante el transporte de materiales, así como la distancia y la eficiencia del combustible utilizado, algunos estudios incluyen los datos de velocidad de los vehículos y las condiciones de tráfico. La ecuación 3 describe de manera general, el cálculo del CO₂ producido durante la etapa de transporte [51].

$$CO_{2T} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{Lt} * \frac{d}{e} * F_{iT} \quad (3)$$

Donde CO_{2T}, representa los kilogramos de CO₂ por cada m³ generados durante la etapa de transporte, M_i denota la cantidad de material utilizados en el hormigón (kg/m³), Lt es la carga de material (toneladas), d es la distancia de transporte [km], e es la eficiencia del combustible [km/L] y F_{iT} representa el factor de emisión de CO₂ [kg-CO₂/L] del recurso energético utilizado.

2.4 Emisiones de dióxido de carbono durante la etapa de producción

El dióxido de carbono contabilizado en esta etapa tiene en cuenta la cantidad de energía utilizada para producir cada m³ de concreto, esta etapa tiene en cuenta el consumo energético de todos los equipos para la carga, el almacenamiento y el transporte in situ de los materiales, así como el consumo energético durante la preparación de la mezcla, además se incluyen los valores relacionados con la potencia, la capacidad y la cantidad total de energía eléctrica utilizada [41]. La ecuación 4 describe el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono.

$$CO_{2P} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{R} * F_{iP} \quad (4)$$

Donde CO_{2P} , representa los KgCO₂/m³ que se producen durante la etapa de preparación del hormigón, E_i denota el uso anual de energía [unidad/año], ya sea Lt/año (para el caso de la gasolina o el diesel), m³/año (para el caso del licuado de petróleo) o Kwh/año (para el caso de la energía eléctrica). R denota la producción anual de concreto [m³/año] y F_{iP} representa el factor de emisión de CO₂ [kgCO₂/unidad] del recurso energético (combustible fósil o electricidad) [51].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La tabla 2 muestra el título, propósito y resultados encontrados de los diferentes artículos.

Esta revisión de la literatura recopiló informes de diferentes autores que estimaron la emisión de CO₂ como indicador de impacto ambiental en concreto tradicional y modificado. Los resultados reportados en la Tabla 2 muestran que durante la preparación de concreto modificado, la reducción de las emisiones es más significativa cuando se reemplaza el cemento que los agregados. De hecho, la sustitución del cemento disminuye entre un 25% y un 75% de las emisiones, mientras que los áridos disminuyen entre un 4% y un 25% las emisiones. Esta tendencia está relacionada con una diferencia considerable en los factores de emisión de cada material; este factor es mayor para el cemento (0.83 kgCO₂/m³) [52], que para los agregados, reportado en 0.028 kgCO₂/m³ y 0.039 kgCO₂/m³ para los finos y los gruesos, respectivamente [53], esto evidencia que el uso de agregados tiene poca influencia en la reducción de las emisiones de carbono en el proceso de fabricación del hormigón.

La diferencia en los factores de emisión de CO₂ está asociada con la tendencia en el número de estudios científicos centrados en informar las emisiones de CO₂ en el hormigón tradicional y modificado. La Figura 3 muestra el número de artículos por tipo de precursor sustituido en la preparación de hormigones modificados.

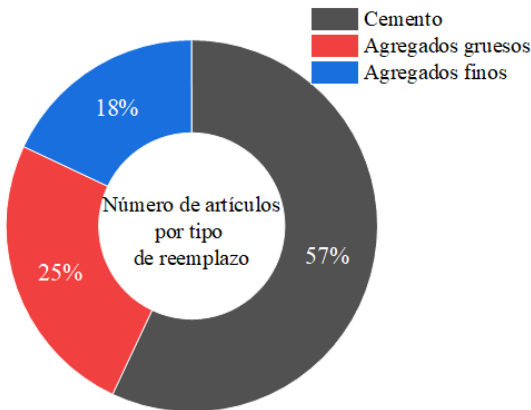


Fig. 3. Porcentaje de artículos con reportes de las emisiones de CO₂ clasificadas por tipo de material precursor.

Tabla 2. Titulo , propósito, resultados reportados y referencia, en la preparación de hormigones modificados con reportes de la emisión de CO₂.

Item	Titulo	Propósito	Resultados encontrados	Ref.
1	Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture	Se prepararon mezclas de hormigón de 25 MPa y 32 MPa con 25% de reemplazo del cemento por cenizas volantes y mezclas con reemplazo del 40% del cemento por escoria de alto horno granulada molida [42][42]	Las emisiones de CO ₂ del hormigón tradicional están entre 0,29 y 0,32 toneladas de CO ₂ -eq/m ³ . Los hormigones de 25 MPa y 32 MPa con un 25% de cenizas volantes presentaron ecoeficiencias de 10.1 y 8,5 Kg CO ₂ /MPa, respectivamente. Los hormigones de 25 MPa y 32 MPa con un 40% de escoria granulada de alto horno presentaron emisiones de CO ₂ de 9.0 y 7.8 Kg CO ₂ /MPa, respectivamente.	[48]
2	Assessment of the CO ₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system	Se evaluó el rendimiento del diseño de mezcla de hormigón de 18, 21 y 24 MPa, utilizando un algoritmo evolutivo y la emisión de CO ₂ máxima, mínima y media de cada diseño de mezcla real estándar y la cantidad óptima de emisión de CO ₂ de cada diseño.	Un aumento en la resistencia de diseño genera un incremento en las emisiones de CO ₂ . El hormigón tradicional se encontró que para resistencias de diseño de 18 Mpa, 21 Mpa y 24 Mpa, las emisiones fueron de 296, 326 y 348 KgCO ₂ /m ³ de hormigón, respectivamente. Asimismo, la sustitución de materiales cementantes permite la disminución de las emisiones de CO ₂ , los hormigones preparados con escoria de alto horno, cenizas volantes y mezcla de ambos materiales presentaron disminuciones 8.4%, 11% y 25% con respecto al hormigón de referencia (0% de sustitución), esta tendencia, es atribuida a la cantidad de cada material utilizado en la preparación de cada mezcla. La ecoeficiencia reportada fue de 11,94, 13.27 y 11.6 para los hormigones 18, 21 y 24, respectivamente.	[54]
3	Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability	Se reportó la preparación de mezclas de hormigón con incorporación individual 20% y 35% de cenizas volantes y con 35%, 50% y 80% de escoria de alto horno en reemplazo del cemento.	Se reportó que, en la producción de hormigón modificado, la reducción de las emisiones de CO ₂ es proporcional al porcentaje de sustitución del cemento. Asimismo, los autores reportaron que el tipo de sustituto cementante, influye significativamente en las emisiones de CO ₂ . Los hormigones preparados con reemplazos del 35% de escoria de alto horno y cenizas volantes presentaron reducciones en las emisiones de CO ₂ del 12.3% y del 17.7%, respectivamente, con respecto al hormigón tradicional, efecto que asociaron al menor factor de emisión de las cenizas volantes (0.004 Kg CO ₂ /Kg) en comparación con la escoria de alto horno (0,0052 Kg CO ₂ /Kg). Asimismo, el hormigón con 35%, 50% y 80% de alto horno presentó ecoeficiencias de 1.38, 1.29 y 1.13 Kg CO ₂ /MPa, respectivamente. Mientras que en el hormigón con 20% y 35% de cenizas volantes fue de 1,41 y 1,30 Kg CO ₂ /MPa, respectivamente	[55]
4	Mechanical properties, durability, and life-cycle	Se evaluaron las emisiones de CO ₂ de hormigón con reemplazos del cemento entre 45% y 75% en peso, con contenidos de caliza del 15% y 25%	El hormigón tradicional emite 569 Kg CO ₂ /m ³ . Se informó que el contenido de piedra caliza o cenizas volantes es inversamente proporcional a las emisiones de CO ₂ . La mezcla de hormigón con	[56]

	assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder	en peso y con un contenido de cenizas volantes entre el 20% y el 60% en peso con el fin de igualar la proporción de reemplazo total deseada para cada mezcla.	15% y 25% de reemplazo de piedra caliza exhibió una reducción de 14% y 23% en las emisiones de CO ₂ , respectivamente. Las mezclas de que incorporaron 30% y 50% de cenizas volantes exhibieron una reducción de emisiones de 27% y 45%, respectivamente. El hormigón tradicional presentó una ecoeficiencia de 10.6 KgCO ₂ /MPa. En las mezclas binarias con 15% y 25% de polvo de caliza y 30% y 50% de cenizas volantes 11.27, 11.91, 8.07 y 7,47 Kg CO ₂ /MPa, respectivamente.	
5	Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA	Se prepararon mezclas de hormigón a partir de residuos de arena de fundición y escoria de acero como sustitutos de los agregados y con cenizas volantes como aditivo mineral. Se midió el CO ₂ producido en estas mezclas.	Los autores reportaron que las emisiones del CO ₂ están alrededor del 75% en el caso de las cenizas volantes, 85 % para la arena de fundición y entre 65% y 95% para el caso de la escoria de acero.	[57]
6	A Life-Cycle Approach to Environmental, Mechanical, and Durability Properties of "Green" Concrete Mixes with Rice Husk Ash	Se cuantificó la cantidad de dióxido de carbono formado en el proceso de elaboración de hormigones modificados con mezclas de cenizas de cascarilla de arroz, polvo de piedra caliza y cenizas volantes como reemplazo del cemento.	Se encontró que el incremento del porcentaje de sustitución de materiales cementosos suplementarios disminuye las emisiones de CO ₂ . La mezcla con 40% de cemento, 40% de cenizas volantes, 15% de ceniza de cascarilla de arroz y 5% de polvo de piedra caliza presentó la menor emisión de dióxido de CO ₂ (284 Kg CO ₂ /m ³), correspondiente a una reducción del 48% con relación al tradicional.	[58]
7	Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete	Se estudió la preparación de mezclas de hormigón con reemplazos 0%, 50%, 60% y 70% del cemento por cenizas de combustible de aceite de palma	Se informó que cuanto mayor es el contenido de cenizas de aceite de palma combustible, mayor es la reducción de las emisiones CO ₂ . Las mezclas con 50%, 60% y 70% de ceniza demostraron una reducción de emisiones de 32%, 39% y 45%, respectivamente, en comparación con el concreto tradicional. Esta tendencia está relacionada con la dilución del cemento en las mezclas de hormigón. La ecoeficiencia del hormigón tradicional es 6,85 KgCO ₂ /Mpa, mientras que en las mezclas con 50%, 60% y 70% de cenizas de aceite de palma fueron 4.42, 3.58 y 3.77, respectivamente.	[59]
8	Mechanical and fresh properties of sustainable oil palm shell lightweight concrete incorporating palm oil fuel ash	Se evaluó la ecoeficiencia para hormigón preparado con 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de reemplazo de cemento por ceniza de aceite de palma.	Los autores informaron que la mezcla preparada con un 10% de ceniza de aceite de palma presentó la mejor ecoeficiencia. Los valores de ecoeficiencia para las mezclas, con reemplazos de 0, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% fueron 11.42, 11.76, 10.25, 10.23, 10.10 y 9.90, respectivamente	[60]

9	The sustainability of lightweight aggregates manufactured from clay wastes for reducing the carbon footprint of structural and foundation concrete.	Los autores reportaron la preparación de hormigones con cenizas volantes y agregados livianos.	La inclusión de cenizas volantes y agregados livianos en el hormigón reduce las emisiones de dióxido de carbono 388 kgCO ₂ /m ³ (hormigón tradicional) a 298 kgCO ₂ /m ³ (hormigón modificado) equivalente a una reducción del 23%. El hormigón tradicional y con 30% de cenizas volantes presentan ecoeficiencias de 11.92 y 11.28, respectivamente.	[61]
10	Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment.	Se prepararon hormigones con mezclas de agregados reciclados, residuos de construcción y demolición y residuos de ladrillos con tamaños de 20 mm y 8 mm en reemplazo de loa agregados. Se midió el total de dióxido de carbono emitido.	El hormigón preparado con agregado de ladrillo reciclado presenta impactos de indicadores ambientales más bajos. Con una disminución del 9.6% con respecto al hormigón de referencia. Fenómeno asociado con el menor consumo energético para la producción de agregados de ladrillo en comparación con los agregados provenientes de residuos de construcción. El hormigón tradicional, con residuos de demolición y con residuos de ladrillos presentaron ecoeficiencias de 2.85, 3.44 y 1,99 KgCO ₂ /Mpa, respectivamente.	[62]
11	A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs	El objetivo de este trabajo se basó en la evaluación del CO ₂ generado en tres mezclas de hormigón: 1) tradicional, 2) 35% de cenizas volantes en reemplazo del cemento y 3) 70% de cemento que se sustituyó por escoria granulada de alto horno.	Los autores informaron que las emisiones de dióxido de carbono disminuyen hasta en un 30% con la incorporación del 35% de cenizas volantes y en un y un 60% para reemplazos de 70% escoria granulada de alto horno.	[63]
12	Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime.	Este estudio abordó los efectos de la hidratación acelerada en el hormigón preparado con la sustitución completa de agregados naturales por agregados reciclados.	Se reportó que la sustitución de áridos tradicionales por áridos reciclados reduce el CO ₂ emitido en un 2%, reducción que va en beneficio de la conservación de los	[64]
13	Assessment on engineering properties and CO ₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement.	Se evaluó la emisión de CO ₂ de hormigones preparados con ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de combustible de aceite de palma y el polvo de clínker como reemplazos del 10%, 20% y 40% de del cemento y con 100% de reemplazo de los agregados gruesos por hormigón reciclado.	Los resultados indicaron que la mezcla de hormigón con 30% de reemplazo del cemento por cascarilla de arroz presentó la tasa de emisión de CO ₂ más baja (260 kg de CO ₂ /m ³), equivalente a una reducción del 29% en comparación con la mezcla de hormigón tradicional. El hormigón preparado con 30% de ceniza de cáscara de arroz como material cementante presentó una ecoeficiencia de 7.81 KgCO ₂ /Mpa.	[65]
14	Use of recycled aggregates for low	Se prepararon mezclas de hormigón tradicional denotada CEM I y mezclas denominadas CEM II	Los autores demostraron que la reducción de las emisiones de CO ₂ en las mezclas CEM II y CEM V es proporcional a la cantidad	[66]

	carbon and cost-effective concrete construction	(65% cemento, 30% de escoria de alto horno granulada y 5% de silica fumante) y CEM V (40% Cemento, 30% escoria de alto horno granulada y 30% silica fumante) en reemplazo del cemento.	sustituída de cemento por los suplementos cementantes. Las emisiones de CO ₂ de las mezclas CEM I fueron de 154 y 177 kg CO ₂ /tonelada para hormigones de resistencia de diseño de 40 y 50 MPa, respectivamente. Las emisiones de CO ₂ de las mezclas CEM II oscilaron entre 89 y 113, lo que equivale a reducciones del 42% y el 36%, mientras que las emisiones de CO ₂ de las mezclas CEM V oscilaron entre 74 y 78 kg CO ₂ /tonelada, que son equivalentes a reducciones del 51% y 56% para hormigones de resistencia de diseño de 40 y 50 MPa respectivamente. La ecoeficiencia calculada de las mezclas CEM I, CEM II y CEM V fueron de 2.85, 1.61 y 1.32, respectivamente.	
15	Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete	En este trabajo, se evaluó el CO ₂ que fue emitido en la producción de hormigones elaborados con una modificación equivalente al 25%, 50%, 75% y 100% de la grava por residuos de piedra caliza. Se prepararon hormigones con dos diferentes relaciones agua cemento: 0.5 y 0.7. Se realizó el estudio comparativo con el hormigón tradicional.	Se reportó que el CO ₂ emitido disminuyen conforme incrementa el uso de agregados reciclados. Asimismo, se reportó que la mayor contribución en las emisiones, está asociada al uso del cemento. Para el caso del hormigón con una relación 0.5 agua/cemento, los valores de la ecoeficiencia fueron 10.79, 11.07, 11.33, 11.68, 11.66 para 0, 25, 50, 75 y 100% de reemplazo de agregados gruesos, respectivamente. Las ecoeficiencias de las mezclas con relación 0.7 fueron 11.16, 11.42, 11.68, 12.48 y 13.75, para 0, 25, 50, 75 y 100% de sustitución de agregados gruesos.	[67]
16	Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material	Este trabajo se centró en el diseño y en la preparación de hormigones con resistencias a compresión inferiores a 20MPa mediante la sustitución de áridos convencionales por neumáticos reusados en proporciones de 10%, 20% y 30% en volumen de los agregados finos. Se incluyó la medición del CO ₂ emitido	Se observó un aumento en la emisión de CO ₂ , cuando se utilizó agregado de caucho fino debido a la energía requerida para triturar el caucho. Sin embargo, se observó una reducción en la huella de CO ₂ para el hormigón que incorpora un contenido de caucho más grueso cuando se le contrasta con el espécimen de referencia. La ecoeficiencia del hormigón tradicional fue 0.26 KgCO ₂ /Mpa. Se observó aumentos del 12.66%, 25.42% y 39.62% en la ecoeficiencia para los hormigones preparados con 10%, 20% y 30% de reemplazo de agregados finos, respectivamente. Asimismo, se reportó que al sustituir 10%, 20% y 30% de los áridos gruesos la ecoeficiencia aumenta un 2,66%, un 5,60% y un 9,38%, respectivamente.	[68]
17	Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide	Se estimó la cantidad de dióxido de carbono producido en hormigones elaborados con una modificación del 15% de cemento por ceniza resultante del bagazo de caña utilizado en un ingenio azucarero y en una pizzería.	Con el reemplazo de 15% de cemento por ceniza de caña de cualquier origen, es posible mantener la resistencia mecánica y reducir la emisión de CO ₂ por cada m ³ de material producido.	[69]

18	The effect of fly ash and recycled aggregate on the strength and carbon emission impact of FRCCs (fiber reinforced cementitious composites)	En este trabajo se presentó la preparación de concretos con relaciones de agua/cemento de 0.35 y 0.45 y con reemplazos del 25% y del 50% de reemplazo del cemento por cenizas volantes y arena reciclada.	La reducción en la relación agua/cemento genera un incremento del CO ₂ emitido como resultado del mayor consumo de aglutinante. Asimismo, un incremento en el porcentaje de reemplazo de cenizas volantes permite una disminución en las emisiones de CO ₂ . La mezcla con un 50% de reemplazo del cemento por cenizas volantes y una relación el agua y el cemento de 0.45 permite la mayor reducción, la cual fue del 47%.	[70]
19	Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: environmental influence of cement content	Se estimaron las emisiones de dióxido de carbono de hormigones tradicionales y con reemplazos del 50% y del 100% de los agregados naturales por agregados reciclados y reemplazo del cemento con cenizas volantes.	Las emisiones de CO ₂ del concreto tradicional estuvieron entre 323 y 332 KgCO ₂ , las cuales se redujeron en un 17% para una sustitución del 25% del cemento por cenizas volantes.	[71]
20	Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO ₂ emissions.	Este estudio exploró el efecto del reemplazo simultaneo de 0% a 100% de los agregados naturales por hormigón reciclado y agregados finos naturales por 50% de hormigón reciclado.	Los autores afirmaron que la ecoeficiencia se mejora con el uso separado o conjunto de áridos finos y gruesos reciclados. Las mezclas de hormigón con 50% de agregados reciclados presentaron la menor disminución en las emisiones de CO ₂ , dada la menor contribución de los agregados reciclados a las emisiones totales de CO ₂ y la mayor resistencia mostrada.	[72]
21	Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement.	En este trabajo se realizó la evaluación de la resistencia a compresión y del total de CO ₂ que se emite durante la preparación morteros que contiene ceniza preparada a partir de cascarilla de arroz como sustituto del 5%, 10% y 15% del cemento.	El uso de ceniza producida a partir de cascarilla de arroz dio cuenta de una disminución del CO ₂ emitido. Las mezclas preparadas con un 15% de reemplazo de cemento demostraron las menores emisiones de CO ₂ por tonelada de concreto producido, totalizando una reducción en las emisiones del 21% en comparación con el hormigón tradicional. El hormigón con adición de 0%, 5%, 10% y 15% de ceniza de cascarilla de arroz presentaron ecoeficiencias de 5.17, 4.91, 4.54 y 4.08 (kg CO ₂ /MPa).	[73]
22	Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag	Se reporta la preparación de hormigones con sustitución del 30% del cemento por mezclas de individuales de ceniza de concha de ostra (30%) y escoria de alto horno (30%) y combinaciones de 10% escoria de alto horno y 20% de ceniza concha de ostra y 20% de escoria de alto horno y 10% de ceniza concha de ostra.	Se reportó que la adición de materiales alternativos reduce significativamente las emisiones de CO ₂ . En comparación con el hormigón tradicional la incorporación individual o combinada de ceniza de concha de ostra y escoria del alto horno permitió una reducción del 30% de las emisiones de CO ₂ .	[74]

23	Carbon dioxide equivalent (CO ₂ -e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete	Los autores reportaron el CO ₂ que se genera en la preparación de hormigón tradicional y con 100% de reemplazo del cemento por ligantes geo-poliméricos.	El CO ₂ que se emite en el hormigón preparado a partir de ligantes geopoliméricos estuvo alrededor de 320 KgCO ₂ /m ³ equivalente al 81% de las emisiones del hormigón tradicional (354 KgCO ₂ /m ³).	[53]
----	---	---	---	------

Tal como se puede apreciar en la Figura 3 alrededor del 57% de los artículos incluidos en esta revisión, reportaron el CO₂ que se emite en hormigones modificados con reemplazo del cemento, mientras que solo el 18% se enfocaron en el reemplazo de la grava y 25% en el reemplazo de la arena. Asimismo, se encontró que del total de artículos reportados en la tabla 2, gran parte de ellos, alrededor del 47%, informan la preparación de hormigones con residuos inorgánicos, principalmente cenizas volantes y escorias de alto horno. Esta tendencia está asociada a una mejora sustancial de las propiedades mecánicas del hormigón modificado, así como a un mayor porcentaje de reducción de CO₂.

De la Tabla 1, se observa que cuando el 80% (entrada 11) y el 70% (entrada 3) del cemento se reemplazan por escoria de alto horno, los autores informaron los valores de reducción más altos en las emisiones de dióxido de carbono, que fueron del 70% y 60% en comparación. al hormigón tradicional. El factor de emisión de la escoria (0.0265 kg/m³) valor inferior al reportado para el cemento (0.83 kg/m³) se correlaciona con la menor emisión encontrada en los hormigones modificados con este sustituto.

A partir de los estudios presentados en la Tabla 2, se deduce que la reducción de las emisiones de dióxido de carbono depende principalmente de tres factores fundamentales: 1) Los parámetros bajo los cuales se diseña la mezcla, principalmente la proporción entre el agua y el cemento y la resistencia a compresión; 2) porcentaje de sustitución de materiales tradicionales; y 3) tipo de sustituto empleado.

En términos de condiciones de diseño, un aumento en la relación agua/cemento se relaciona con una disminución de la cantidad de CO₂ emitido. En general, la relación agua/cemento incide positivamente en el total de CO₂ emitido. Además, los hormigones que incorporan sustitutos del cemento exhibieron valores más bajos de la ecoeficiencia, lo que significa una mejor sostenibilidad. Con respecto al porcentaje de sustitución de materiales tradicionales afecta sustancialmente el CO₂ que se genera. Celik et al [56] (Entrada 4) informaron que, en concreto preparado con 30% y 50% de cenizas volantes como sustituto del aglutinante, los valores del CO₂ emitido fueron 412 y 311 kg CO₂/m³, respectivamente. Estos autores informaron que el concreto preparado con 15% y 25% de piedra caliza en reemplazo del cemento demostró valores de emisión de 487 y 434 kg CO₂/m³, respectivamente. Se ha informado que el hormigón con reemplazos del 50%, 60% y 70% del cemento con cenizas de combustible de aceite de palma (Entrada 7) presentó valores de emisión de 310, 280 y 250 kg de CO₂/m³. Hu et al. (Entrada 21) informaron que el concreto modificado que reemplazó un 5%, un 10% y un 15% con ceniza de cáscara de arroz como material cementante demostró valores de emisión de dióxido de carbono de 346,22, 331,71 y 317,21 kgCO₂/tonelada de concreto, respectivamente. Alnahhal et al (Entrada 13) informaron una tendencia similar entre la cantidad de cemento sustituido y el CO₂ emitido, de hecho, el hormigón con sustituciones del 10%, 20% y 40% del cemento por ceniza preparada con cascarilla de arroz presentó emisiones de 314, 287 y 260 kgCO₂/m³ de hormigón preparado, respectivamente. Además, en el hormigón preparado con ceniza de aceite de palma como sustituto del 10%, 20% y 40% del cemento se encontraron emisiones de 315, 288 y 261 kgCO₂/m³, respectivamente. La tendencia inversa entre el porcentaje de sustitución del cemento y el dióxido de carbono emitido, se relaciona con la menor cantidad de cemento empleado, que es la principal fuente de CO₂ durante la preparación del hormigón, y con un menor factor de emisión de materiales de reemplazo, que, en todos los casos, es menor. que el del cemento, como se presenta en la tabla 1.

En cuanto al tipo de material de reemplazo, se informó que las emisiones de dióxido de carbono estaban directamente relacionadas con el factor de emisión de cada reemplazo. De hecho, los estudios informan que cuanto menor sea el factor de emisión del material de reemplazo, mayor será la reducción del CO₂ total emitido. Una menor emisión de dióxido de carbono en el hormigón modificado con distintos tipos de residuos afecta positivamente al medio ambiente y es una estrategia para su aprovechamiento.

4. TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS

Debido a la amplia variedad de aplicaciones y las tendencias de consumo actuales, se espera que la demanda mundial de hormigón siga creciendo. Por tanto, para la industria del hormigón, uno de los principales retos futuros será reducir el CO₂ emitido a lo largo de su ciclo de producción. Como se analiza en esta revisión, una forma de reducir las emisiones de dióxido de carbono es incorporar diferentes materiales que reemplacen los materiales tradicionales para preparar el hormigón modificado, particularmente aquellos utilizados como sustitutos del cemento, debido a su elevado factor de emisión,

el cual aporta de manera significativa en el CO₂ total producido en la elaboración del hormigón. La preparación de hormigones modificados incorporando materiales cementantes disminuye considerablemente las emisiones de CO₂, lo que tiene un impacto positivo en el medio ambiente. Se espera que futuros estudios centrados en la elaboración de hormigones modificados consideren la estimación del CO₂ emitido y este se convierta en un parámetro para evaluar el impacto ambiental de los hormigones modificados. La estimación de este parámetro, a la fecha, es aún limitada en los reportes sobre hormigones modificados. Se espera que este reporte ayude a cerrar el gap en la bibliografía actual sobre el impacto ambiental que tiene la incorporación de residuos orgánicos e inorgánicos, en la preparación de hormigones modificados.

5. DIRECCIÓN FUTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Los residuos de la industria y la agroindustria son empleados como sustitutos del cemento, los agregados finos o los agregados gruesos, estos mejoran las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, y reducen el CO₂ emitido. Estos resultados confirman que el cálculo del CO₂ que se emite es un parámetro de gran importancia para cuantificar el impacto ambiental de los hormigones modificados. Acorde a los hallazgos encontrados, se pueden hacer diferentes recomendaciones para estudios posteriores:

Se han realizado suficientes pruebas relacionadas con las propiedades mecánicas del hormigón que incorpora residuos industriales y agrícolas, pero los estudios sobre el CO₂ emitido son limitados. Se requieren estudios adicionales, como el parámetro de energía incorporada (energía/resistencia a compresión) y el parámetro de dióxido de carbono incorporado (dióxido de carbono emitido/resistencia a compresión) como indicadores principales para evaluar el efecto del uso de desechos sobre el beneficio ambiental en la producción de hormigón.

En los estudios existentes se analizan las emisiones provenientes de la producción de materiales, transporte y producción de hormigón en sitio. Sin embargo, todavía existen algunas lagunas para cuantificar las emisiones totales directas e indirectas de CO₂ que incluyen todas las actividades que ocurrieron durante la preparación del concreto. Entre los estudios revisados, ningún estudio de evaluación del ciclo de vida estimó las emisiones de todas las actividades, y la mayoría de ellos incluyeron la producción de materiales y el transporte. No se incluyeron las actividades de los trabajadores, el transporte de equipos y el consumo de energía durante el procesamiento de materiales sustitutos (procesos de calcinación, tamizado y molienda). Tal omisión es posiblemente el déficit más significativo desde la perspectiva de los límites del sistema y puede generar sesgos en los resultados y afectar el establecimiento de estrategias precisas de reducción de carbono.

La evolución de la tecnología del hormigón ha mostrado una tendencia prometedora hacia el futuro del hormigón ecológico que incorpora sustitutos del cemento. Este avance se logrará con la modificación de la química de los aglutinantes convencionales y emisiones de CO₂ más limpias en las mezclas de hormigón modificado.

En los próximos años, los cálculos del CO₂ producido serán más importantes cuando el gobierno junto con clientes proporcione incentivos para producir hormigones bajos en carbono que contribuyan de manera significativa a la reducción de este contaminante en la industria de la construcción. Estos incentivos adoptarán la forma de subvenciones, créditos de carbono y devoluciones de impuestos.

Se espera que en futuros estudios se tengan en cuenta la medición de otras emisiones generadas en la preparación de hormigones modificados con cenizas, las cuales, pueden contener altas concentraciones de dioxinas, componentes de carbono y metales pesados, entre otros, los cuales pueden conducir a una mayor contaminación ambiental y generar preocupaciones globales con respecto a la salud pública y la sostenibilidad ambiental.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión sobre el CO₂ que emite el hormigón modificado. De los resultados de la revisión, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

Los investigadores proponen la reutilización de diversos tipos de materiales de desecho como sustitutos del cemento, la arena o los áridos gruesos en la producción de hormigón. Los datos informados descubrieron que el hormigón con reemplazo de cemento emite menos CO₂ en contraste con el reemplazo de arena o grava.

La producción de CO₂ está relacionada con la proporción entre el cemento y el agua, así como del porcentaje de reposición. Los datos reportados indican que el CO₂ emitido disminuye a medida que aumenta la relación agua/cemento y disminuye la tasa de sustitución. Además, estas emisiones dependen de la naturaleza del sustituto. De hecho, un material sustituto con menor factor de emisión presenta menor emisión de CO₂.

Esta revisión proporciona información valiosa en términos de la incorporación de residuos (principalmente agroindustriales) para reemplazar el cemento, lo que crea una alternativa exitosa para eliminar este tipo de residuos que actualmente se envían a vertederos y reducir el CO₂ que se libera al ambiente.

Se espera que las futuras investigaciones centradas en la incorporación de materiales cementantes de reemplazo en la preparación del concreto incluyan no solo la medición de las descargas de CO₂ como parámetro para evaluar el impacto ambiental en la producción de concreto sustentable desde un punto de vista técnico y ambiental, sino que se incluya la medición de otros componentes incluso más contaminantes tales como dioxinas, materiales de carbono y metales pesados, lo cual permita visualizar de manera más detallada su impacto en el entorno..

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo financiero a través de INV3167. J. H. Gómez, S. Herrera, C.F. Rodríguez, agradecen al semillero de investigación en materiales y estructuras.

8. REFERENCIAS

- [1] Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, 1, p. 100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>.
- [2] Marcea, R. L. and Lau, K. K. (1992). Carbon Dioxide Implications of Building Materials. *Journal of Forest Engineering*, 3(2), 37–43. <https://doi.org/10.1080/08435243.1992.10702637>.
- [3] Caldas, L. R., Saraiva, A. B., Lucena, A. F. P., Da Gloria, M. Y., Santos, A. S., and Filho, R. D. T. (2021). Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete, *Resources Conservation and Recycling*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>.
- [4] Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 390–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>.
- [5] Pomponi, F. and Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say?, *Journal of Environmental Management*, 181, 687–700. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.036>.
- [6] Baynes, T. M., Crawford, R., Schinabeck, J., Bontinck, P. A., Stephan, A., Wiedmann, T., Lenzen, M., Kenway, S., Yu, M., The, S. H., Lane, J., Geschke, A., Fry, J. and Chen, G. (2018). The Australian industrial ecology virtual laboratory and multi-scale assessment of buildings and construction, *Energy and Buildings*, 164, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.056>.
- [7] Rama Jyosyula, S. K., Surana, S. and Raju, S. (2020). Role of lightweight materials of construction on carbon dioxide emission of a reinforced concrete building, *Materials Today Proceedings*, 27, 984–990. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.294>.
- [8] Vishwakarma, V. and Ramachandran, D. (2018). Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review, *Construction and Building Materials*, 162, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174>.
- [9] Robalo, K., Costa, H., do Carmo, R. and Júlio, E. (2021). Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete, *Construction and Building Materials*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121680>.
- [10] Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S. and Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review, *Construction and Building Materials*, 74, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>.

-
- [11] Habert, G. and Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>
- [12] Raheem, A. A. and Ikotun, B. D. (2020). Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – A review, *Journal of Building Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101428>.
- [13] Scharff, H. (2014). Landfill reduction experience in The Netherlands, *Waste Management*, 34(11), 2218–2224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.019>.
- [14] Kumar, V. K., Priya, A. K., Manikandan, G., Naveen, A. S., Nitishkumar, B. and Pradeep, P. (2020). Review of materials used in light weight concrete, *Materials Today Proceedings*, 37(2), 3538–3539. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.425>
- [15] Krithika, J. and Ramesh Kumar, G. B. (2020). Influence of fly ash on concrete - A systematic review, *Materials Today Proceedings*, 33, 906–911. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.425>.
- [16] Fu, Q., Xu, W., Zhao, X., Bu, M. X., Yuan, Q. and Niu, D. (2021). The microstructure and durability of fly ash-based geopolymers concrete: A review, *Ceramics International*, 47(21), 29550–29566. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.190>.
- [17] Jiang, W., Li, X., Lv, Y., Jiang, D., Liu, Z. and He, C. (2020). Mechanical and hydration properties of low clinker cement containing high volume superfine blast furnace slag and nano silica, *Construction and Building Materials*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117683>.
- [18] Gencel, O., Karadag, O., Oren, O. H. and Bilir, T. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review, *Construction and Building Materials*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>.
- [19] Raheem, A. A., Abdulwahab, R. and Kareem, M. A. (2021). Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review, *Journal of Cleaner Production*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125852>.
- [20] Jani, Y. and Hogland, W. (Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2 (3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>.
- [21] Esmaili, J. and Oudah Al-Mwanes, A. (2021). A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement," *Materials Today Proceedings*, 42, 1958–1965. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>.
- [22] Syahida Adnan, Z., Ariffin, N. F., Syed Mohsin S. M. and Abdul Shukor Lim, N. H. (2021). Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete, *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.400>.
- [23] Depaa, R. A. B., Priyadarshini, V., Hemamalinie, A., Francis Xavier, J. and Surendrababu, K. (2020). Assessment of strength properties of concrete made with rice husk ash, *Materials Today Proceedings*, 45, 6724–6727. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.605>.
- [24] Chong, B. W., Othman, R., Ramadhansyah, P. J., Doh, S. I. and Li, X. (2019). Properties of concrete with eggshell powder: A review, *Physics and Chemistry of the Earth*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102951>.
- [25] Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K. and Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review, *Journal of Building Engineering*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101583>.
- [26] N Sathiparan, N. (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review, *Construction and Building Materials*, 293, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123465.
- [27] Jha, P., Sachan, A. K. and Singh, R. P. (2021), Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete, *Materials Today Proceedings*, 44, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.751>.
- [28] Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A. and Murugesan, R. (2018). Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete, *Construction and Building Materials*, 176, 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037>.
- [29] Torres, V., Sadique, M., Pineda, P., Bras, A., Atherton, W. and Riley, M. (2021). Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete, *Journal of Building Engineering*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102277>.
- [30] Hamada, H. M., Skariah Thomas, B., Tayeh, B., Yahaya, F. M., Muthusamy, K. and Yang, J. (2020). Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120357>.
- [31] Hamada, H. M., Thomas, B. S., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., Yang, J., Abdalla, J. A. and Hawileh, R. A. (2021). Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A

- comprehensive review, *Journal of Building Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102286>.
- [32] Thomas, B. S., Kumar, S. and Arel, H. S. (2017). Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 550–561. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.128>.
- [33] Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, Mounika, H. G., Niveditha, K. N., and Ravi. (2021). Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials, *Materials Today Proceedings*, 47, 3637–3644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.248>.
- [34] Mejia-ballesteros, J. E., Savastano, H., Fiorelli, J. and Frias, M. (2019). Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications, *Cement and Concrete Composites*, 98, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.001>.
- [35] Tayebani, B. Said, A. and Memari, A. (2023). Less carbon producing sustainable concrete from environmental and performance perspectives: A review,” *Construction and Building Materials*. 404, 133234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133234>.
- [36] Lee, S., Park, W. and Lee, H. (2013). Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment, *Energy Building*, 58, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.034>.
- [37] Asadollahfardi, G., Katebi, A., Taherian, P. and Panahandeh, A. (2021). Environmental life cycle assessment of concrete with different mixed designs, *International Journal of Construction Management*, 21(7), 665–676. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1579015>.
- [38] Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L. and Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review, *Construction and Building Materials*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>.
- [39] Sánchez, A. R., Ramos, V. C., Polo, M. S., Ramón, M. V. L. and Utrilla, J. (2021). Life cycle assessment of cement production with marble waste sludges, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010968>.
- [40] Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., and Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Construction and Building Materials*, 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>.
- [41] Hong, J., Shen, G. Q., Feng, Y., Lau, W. S. T. and Mao, C. (2015). Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: A case study in China, *Journal of Cleaner Production*, 103, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023>.
- [42] Chiaia, B., Fantilli, A. P., Guerini, A., Volpatti, G. and Zampini, D. (2014). Eco-mechanical index for structural concrete, *Construction and Building Materials*, 67(C), 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.090>.
- [43] Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., Lando, A. T. and Irmawaty, R. (2020). Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating processed waste tea ash, *Case Studies in Construction Materials*, 12. e00325. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00325>.
- [44] Monteiro, H., Moura, B. and Soares, N. (2022). Advancements in nano-enabled cement and concrete: Innovative properties and environmental implications, *Journal of Building Engineering*, 56, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104736.
- [45] Huntzinger, D. N. and Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies, *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>.
- [46] Abdul-Wahab, S. A., Al-Rawas, G. A., Ali, S. and Al-Dhamri, H. (2016). Impact of the addition of oil-based mud on carbon dioxide emissions in a cement plant, *Journal of Cleaner Production*, 112, 4214–4225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.062>.
- [47] Li, L., Jiang, Y., Pan, S. Y. and Ling, T. C. (2021). Comparative life cycle assessment to maximize CO₂ sequestration of steel slag products, *Construction and Building Materials*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123876>.
- [48] Flower, D. J. M. and Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288. <https://doi.org/10.1007/s11367-007-0327-3>.
- [49] Ni, S., Liu, H., Li, Q., Quan, H., Gheibi, M., Fathollahi, A. M. and Tian, G. (2022). Assessment of the engineering properties, carbon dioxide emission and economic of biomass recycled aggregate concrete: A novel approach for building green concretes, *Journal of Cleaner Production*, 365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132780>.
- [50] Ma, F., Sha, A., Yang, P. and Huang, Y. (2016). The greenhouse gas emission from portland cement concrete pavement construction in China, *International, Journal of Environmental Research and Public*

- Health, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>.
- [51] Kim, T. H., Chae, C. U., Kim, G. H. and Jang, H. J. (2016). Analysis of CO₂ emission characteristics of concrete used at construction sites, *Sustainability*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/su8040348>.
- [52] Thomas, A., Lombardi, D. R., Hunt, D. and Gaterell, M. (2009). Estimating carbon dioxide emissions for aggregate use, *Engineering Sustainability*, 162(3), 135–144. <https://doi.org/10.1680/ensu.2009.162.3.135>.
- [53] Turner, L. K. and Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Construction and Building Materials*, 43, 125–130, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.
- [54] Kim, T., Tae, S. and Roh, S. (2013). Assessment of the CO₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 729–741. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.013>.
- [55] García-Segura, T., Yepes, V. and Alcalá, J. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0614-0>.
- [56] Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P. K., Mehta, A. and Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder, *Cement and Concrete Composites*, 56, 9–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>.
- [57] Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A. and Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA, *Waste Management*, 458(305), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>.
- [58] Gurse, I. A. P., Maryman, H. and Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of 'green' concrete mixes with rice husk ash, *Journal of Cleaner Production*, 112, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>.
- [59] Alsubari, B. Shafiq, S. Jummat, M. Z. (2016). Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete. *Journal of cleaner production*, 137(12). 982-996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.133> Get rights and content
- [60] Islam, M.M. Mo, K.H. Alengaram, U. J. (2016). Mechanical and fresh properties of sustainable oil palm shell lightweight concrete incorporating palm oil fuel ash. *Journal of cleaner production*, 115, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.051>.
- [61] Boarder, R. F. W., Owens, P. L. and Khatib, J. M. (2016). The sustainability of lightweight aggregates manufactured from clay wastes for reducing the carbon footprint of structural and foundation concrete, *Sustainability of Construction Materials*, (pp. 209-244). Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- [62] Serres, N., Braymand, S. and Feugeas, F. (2016). Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment, *Journal of Building Engineering*, 5, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.11.004>.
- [63] Tait, M. W. and Cheung, W. M. (2016). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(6), 847–860. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1045-5>.
- [64] Hanif, A., Kim, Y., Lu, Z. and Park, C. (2017). Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime, *Journal of Cleaner Production*, 152, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.107>.
- [65] Alnahhal, M. F., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Abutaha, F., Alqedra, M. A. and Nayaka, R. R. (2018). Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 203, 822–835, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.292.
- [66] Bostanci, S. C., Limbachiya, M. and Kew, H. (2018). Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction, *Journal of Cleaner Production*, 189, 176–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.090>.
- [67] Jiménez, L. F., Domínguez, J. A. and Vega-Azamar, R. E. (2018). Carbon footprint of recycled aggregate concrete, *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>.
- [68] Rashid, K., Yazdanbakhsh, A. and Rehman, M. U. (2019). Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material, *Journal of Cleaner Production*, 224, 396–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>.
- [69] Berenguer, R. A., Capraro, A. P. B., Farias de Medeiros, M. H., Carneiro, A. M. P. and de Oliveira, R. A. (2020). Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2).

- <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103655>.
- [70] Lee, J. W., Il Jang, Y., Park, W. S., Do Yun, H. and Kim, S. W. (2020). The Effect of Fly Ash and Recycled Aggregate on the Strength and Carbon Emission Impact of FRCCs, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-020-0392-6>.
- [71] Sabău, M., Bompa, D. V. and Silva, L. F. O. (2021). Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content, *Geoscience Frontiers*, 12(6). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101235>.
- [72] Plaza, P., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I. and Medina, C. (2021). Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO₂ emissions, *Construction and Building Materials*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926>.
- [73] Hu, L., He, Z. and Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement, *Journal of Cleaner Production*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121744>.
- [74] Han, Y., Lin, R. and Wang, X.-Y. (2021). Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag, *Journal of Building Engineering*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103918>.