e-Acadêmica, v. 6, n. 3, e1563671, 2025
(CC BY 4.0) | ISSN 2675-8539 | DOI: http://dx.doi.org/10.52076/eacad-v6i3.671

Agua, energía y emisiones en la producción de hormigón: Tendencias internacionales y oportunidades locales

Water, energy and emissions in concrete production: International trends and local opportunities

Água, energia e emissões na produção de concreto: Tendências internacionais e oportunidades locais

Recibido: 01/12/2025 | Revisado: 19/12/2025 | Aceptado: 20/12/2025 | Publicado: 21/12/2025

Luis Sulbarán
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0275-5206
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
E-mail: luisfwt1297@hotmail.com
Yamileth Lima
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8467-4273
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
E-mail: yamiethlima@gmail.com
Yazmin L. Mack-Vergara[1]
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1313-9234
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
E-mail: yazmin.mack@utp.ac.pa

Resumen
El hormigón es el material de construcción más utilizado en Panamá y su producción genera importantes impactos ambientales relacionados con el consumo de agua y energía, las emisiones de CO_2 y la extracción de recursos naturales. El objetivo de este estudio es analizar el estado del arte sobre la producción sostenible de hormigón, integrando evidencia internacional con las brechas y necesidades identificadas en Panamá. La metodología consistió en una revisión de la literatura que incluyó artículos científicos, revisiones, estudios de caso e informes técnicos relacionados con emisiones de CO_2, consumo energético, uso de agua y análisis de ciclo de vida. Los resultados muestran avances significativos en estrategias de mitigación, especialmente en la reducción de clínker, el uso de materiales cementantes suplementarios, la optimización de mezclas y la gestión del agua. Se identificaron también importantes vacíos de información en el contexto panameño. El estudio concluye destacando la necesidad de desarrollar metodologías estandarizadas, mejorar la disponibilidad de datos y fortalecer las capacidades técnicas del sector para avanzar hacia una producción de hormigón más sostenible en Panamá.
Palabras-clave: Hormigón sostenible; Huella hídrica; Huella de carbono; Análisis de ciclo de vida; Panamá.

Abstract
Concrete is the most widely used construction material in Panama and its production generates significant environmental impacts related to water and energy consumption, CO_2 emissions and the extraction of natural resources. The objective of this study is to analyze the state of the art on sustainable concrete production, integrating international evidence with the gaps and needs identified in Panama. The methodology consisted of a literature review that included scientific articles, reviews, case studies and technical reports related to CO_2 emissions, energy consumption, water use and life cycle analysis. The results show significant advances in mitigation strategies, especially in clinker reduction, the use of supplementary cementitious materials, mix optimization and water management. Important information gaps were also identified in the Panamanian context. The study concludes by highlighting the need to develop standardized methodologies, improve the availability of data, and strengthen the technical capacities of the sector to move towards more sustainable concrete production in Panama.
Keywords: Sustainable concrete; Water footprint; Carbon footprint; Life cycle analysis; Panama.

[1] Autor de correspondencia: Yazmin Lisbeth Mack-Vergara (yazmin.mack@utp.ac.pa)

Resumo
O concreto é o material de construção mais utilizado no Panamá e sua produção gera impactos ambientais significativos relacionados ao consumo de água e energia, emissões de CO_2 e extração de recursos naturais. O objetivo deste estudo é analisar o estado da arte na produção sustentável de concreto, integrando evidências internacionais com as lacunas e necessidades identificadas no Panamá. A metodologia consistiu em uma revisão da literatura que incluía artigos científicos, revisões, estudos de caso e relatórios técnicos relacionados a emissões de CO_2, consumo de energia, uso da água e análise do ciclo de vida. Os resultados mostram avanços significativos em estratégias de mitigação, especialmente na redução do clínquer, uso de materiais cimentícios suplementares, otimização de misturas e gestão da água. Lacunas importantes de informação também foram identificadas no contexto panamenho. O estudo conclui destacando a necessidade de desenvolver metodologias padronizadas, melhorar a disponibilidade de dados e fortalecer as capacidades técnicas do setor para avançar para uma produção de concreto mais sustentável no Panamá.
Palavras-chave: Concreto sustentável; Pegada hídrica; Pegada de carbono; Análise do ciclo de vida; Panamá.

1. Introducción

El hormigón es el material de construcción más utilizado en Panamá (Figura 1) y en el mundo y su producción está asociada a importantes presiones ambientales derivadas del consumo de energía, las emisiones de CO_2, el uso de agua y la extracción de recursos naturales (Ding et al., 2021; Mahevi et al., 2024). Durante las últimas décadas, la necesidad de mejorar el desempeño ambiental del hormigón ha impulsado una amplia producción científica orientada a reducir los impactos de la fabricación de cemento y hormigón. El estudio de estos planteamientos es necesario para el desarrollo de una literatura cada vez más robusta en torno a estrategias tecnológicas, operativas y metodológicas para promover una producción de hormigón más sostenible y circular a nivel local (Mendoza-Rangel et al., 2023).

Figura 1 - Skyline de la Ciudad de Panamá, donde se aprecia la predominancia del hormigón como material de construcción.



Fuente: Elaborado por los Autores (2025).

Aunque los impactos relacionados con el CO_2 y la energía han sido ampliamente documentados, el consumo de agua en la producción de hormigón continúa siendo un área menos explorada. Evaluaciones globales recientes han evidenciado que este sector representa una fracción considerable de las extracciones industriales de agua y que su demanda futura se concentrará en regiones sometidas a estrés hídrico (Ding et al., 2021). Por lo tanto, este aspecto ambiental también debe considerarse y estudiarse a fondo.

En América Latina, y particularmente en Panamá, la investigación sobre producción sostenible de hormigón aún está

(CC BY 4.0) | ISSN 2675-8539 | DOI: http://dx.doi.org/10.52076/eacad-v6i3.671

en desarrollo (Villagrán-Zaccardi et al., 2022). Los estudios existentes se han enfocado en la optimización de diseños de mezcla de hormigón y el uso de materiales cementicios suplementarios (Restrepo-Ramírez et al., 2024). La literatura local destaca la necesidad de mejorar la disponibilidad de datos, estandarizar metodologías y establecer indicadores ambientales que orienten la toma de decisiones (Medina Sandoval et al., 2022).

El objetivo de este estudio es realizar un análisis del estado del arte sobre la producción sostenible de hormigón, integrando la evidencia internacional con las condiciones y brechas identificadas en Panamá en los ámbitos ambientales de agua, energía y emisiones de CO_2. A través de una revisión sistemática de estudios internacionales y nacionales sobre emisiones de CO_2, consumo energético, uso de agua y análisis de ciclo de vida, este trabajo identifica tendencias, desafíos y oportunidades para reducir los impactos ambientales en el sector hormigonero panameño.

2. Metodología

En este estudio se llevó a cabo un análisis del estado del arte sobre la producción de hormigón sostenible, considerando investigaciones desarrolladas a nivel internacional y local en los aspectos ambientales de agua, energía y emisiones de CO_2. La metodología consistió en una revisión de la literatura científica con el propósito de identificar los principales avances, enfoques metodológicos y resultados asociados a la reducción de los impactos ambientales del hormigón. Para ello, se examinaron estudios que abordan estrategias orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales y energéticos, a reducir las emisiones de CO_2 y a optimizar procesos mediante herramientas como la evaluación del ciclo de vida, la optimización de mezclas y el uso de materiales alternativos.

Se realizó una investigación bibliográfica cualitativa (Pereira et al., 2018) narrativa (Rother, 2007) utilizando la base de datos Google Académico, de acceso libre y gratuito, con los términos de búsqueda: «Hormigón sostenible; huella hídrica; huella de carbono; análisis del ciclo de vida; Panamá».

La selección de los documentos incluyó artículos científicos, revisiones, informes técnicos y estudios de caso que presentaran evidencia relevante sobre tecnologías, procesos y metodologías aplicadas al ámbito de la sostenibilidad del hormigón. Se priorizó la literatura que analizara aspectos clave, como el consumo de agua, la energía y las emisiones, así como investigaciones centradas en mejoras tecnológicas, prácticas operativas y estrategias de mitigación ambiental. Adicionalmente, se integraron estudios realizados en Panamá con el fin de contextualizar los resultados globales y comprender las particularidades, retos y oportunidades del sector hormigonero nacional.

El análisis comparativo de estas fuentes permitió identificar patrones, tendencias emergentes y brechas de conocimiento en el campo de la sostenibilidad del hormigón. Asimismo, posibilitó establecer un marco de referencia sólido desde el cual se discuten las implicaciones para la industria panameña y se fundamenta el enfoque contextual del presente estudio. Este procedimiento metodológico asegura que las conclusiones derivadas se basen en evidencia actualizada y en una comprensión integrada del panorama internacional y local. La Figura 2 sintetiza el proceso metodológico empleado.

(CC BY 4.0) | ISSN 2675-8539 | DOI: http://dx.doi.org/10.52076/eacad-v6i3.671

Figura 2 - Resumen del proceso metodológico empleado en esta investigación.



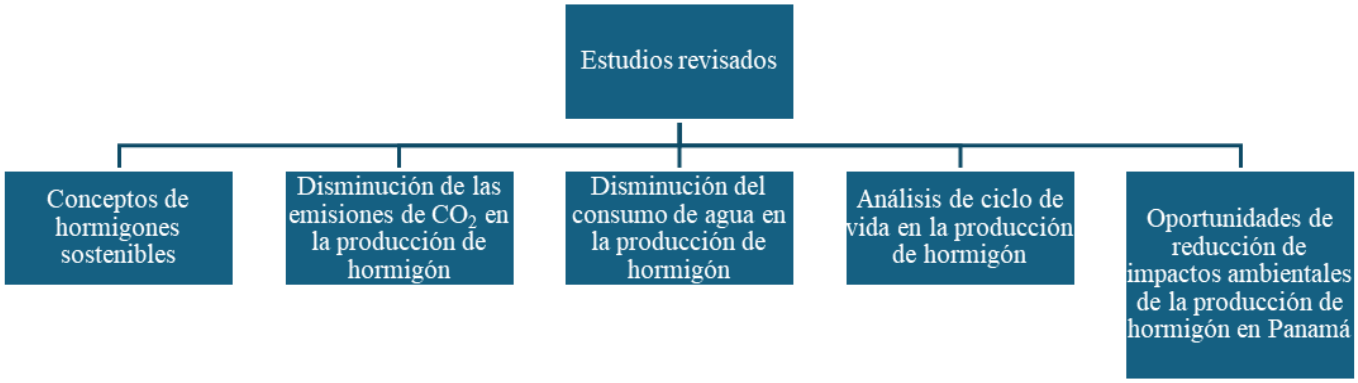
Fuente: Elaborado por los Autores (2025).

3. Resultados y discusión

3.1 Estudios internacionales y locales

Los estudios previos más relevantes revisados se presentan divididos por temáticas identificadas y relacionadas a la presente investigación, en orden cronológico para contar con una línea de tiempo (Figura 3).

Figura 3 - Alcance de los resultados de la investigación, incluyendo estudios previos desde distintas perspectivas internacionales y locales.



Fuente: Elaborado por los Autores (2025).

3.1.1 Conceptos de hormigones sostenibles

Mehta en su publicación del 2001 “Reduciendo el impacto ambiental del hormigón” hace una primera revisión de la necesidad de producir hormigones más sostenibles, y concluye que sustituir la utilización de materiales reciclados por metodologías naturales de conservación de la materia prima (agua, agregados, cemento) y el perfeccionamiento de la durabilidad del hormigón, puede mejorar sustancialmente la productividad de la industria del hormigón de inmediato. El mayor reto al que se enfrenta la industria del hormigón durante el siglo XXI es lograr un patrón de crecimiento sostenible, pero se puede lograr con un cambio de paradigma que dirija a la industria de construcción hacia una cultura de conservación de energía y materiales (K. Mehta, 2001).

Meyer (2009) estudia “La ecologización de la industria del hormigón”, donde explica los acontecimientos derivados de la implementación de los principios del desarrollo sostenible y de los edificios verdes en la industria de la construcción, a un

ritmo acelerado en los últimos años. Mientras que la idea de usar materiales reciclados en la producción de hormigón era ampliamente desconocida hace solo unos años, los productores de hormigón ahora saben que deben cambiar. Las herramientas y estrategias potenciales para enfrentar los desafíos ambientales incluyen: reemplazar la mayor cantidad posible de cemento Portland por materiales cementicios suplementarios, utilizar materiales reciclados en lugar de recursos naturales, mejorar la durabilidad y vida útil de las estructuras, mejorar las propiedades mecánicas del hormigón para poder reducir la cantidad de materiales necesarios, y reutilizar el agua de lavado (Meyer, 2009).

3.1.2 Disminución de las emisiones de CO_2 en la producción de hormigón

Mehta (2010), luego de años estudiando en sus investigaciones la reducción de los impactos ambientales del hormigón indica en "Cementos y hormigones Sostenibles para la Era del Cambio Climático – Una Revisión", que los sectores altamente responsables de la emisión de carbono a nivel mundial deben enfocarse en la adopción de tecnologías comprobadas que atiendan las necesidades esenciales de las personas mientras posibilitan una disminución sostenible de las actividades industriales con altas huellas de carbono. La hoja de ruta presentada en esta muestra cómo la industria mundial del cemento y el hormigón puede lograr una reducción del 30% en el consumo mundial de cemento en los próximos 20 años mediante un uso más eficiente del hormigón en las estructuras y mejores métodos de dosificación de la mezcla de hormigón. Además, se puede lograr una gran reducción en el consumo de clínker mediante el uso sustancial de materiales de cementación suplementarios que estén disponibles en todo el mundo en grandes cantidades (P. K. Mehta, 2010).

Kim et al (2013) en "Evaluación de las emisiones de CO_2 y el rendimiento de reducción de costes de un diseño de mezcla de hormigón con bajas emisiones de carbono mediante un sistema de diseño de mezcla óptimo" utilizaron un "sistema de diseño de mezcla de hormigón con bajo contenido de carbono" aplicado con un algoritmo de evolución con el propósito de reducir las emisiones de CO_2. El algoritmo de evolución y la función objetivo, encontrados a través de los análisis de sensibilidad, se combinaron para construir un proceso de diseño óptimo de mezcla de hormigón de reducción de carbono que pudiera satisfacer tanto el desempeño del material como el ambiental. Se pudo comprobar que la relación agua/cemento, agregado grueso, agregado fino y agua, actualmente presentaba resultados satisfactorios y similares a los del estudio; la aplicación de un diseño de mezcla óptimo redujo el valor económico de la producción de las mezclas y presenta una reducción considerable de emisiones máximas de CO_2 para distintos diseños de mezcla al utilizar estándares de cantidades óptimas de emisiones (Kim et al., 2013).

Yoshioka et al (2013) realizaron un estudio denominado "Nuevo hormigón ecológico que reduce las emisiones de CO_2 por debajo del nivel cero ~ Nuevo método de captura y almacenamiento de CO_2" en el cual exponen el desarrollo de un nuevo hormigón ecológico denominado CO_2-SUICOM (Almacenamiento de CO_2 bajo infraestructura de materiales de hormigón). En este estudio se concluyó que las emisiones de CO_2 de este hormigón pueden reducirse a la mitad en comparación con el hormigón ordinario mediante el uso de -C2S y cenizas volantes. Además, según los autores, durante el endurecimiento del hormigón se captura más CO_2 del que emite. Cuanto más se produzca este nuevo hormigón ecológico, más CO_2 se absorberá. Se puede esperar que este hormigón sea aplicable a varios tipos de trabajos de construcción. Se deben realizar estudios que tengan como objetivo la industrialización del hormigón, la ampliación de la gama de productos a los que es aplicable y productos a gran escala que utilicen el hormigón (Yoshioka et al., 2013).

Fraga et al (2014), ofrecen, en "Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: Análisis de consumo energético y emisiones de CO_2", realizaron una cuantificación de los consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono correspondientes a la preparación de hormigón en planta, al transporte de hormigón fresco en camiones mezcladores, al bombeo en obra y al vibrado, estimados en base a la información técnica ofrecida por fabricantes de los

diferentes equipos. Estos resultados son similares en el caso de las plantas de hormigón, especialmente en cuanto a la energía consumida, y notablemente inferiores en cuanto a la puesta en obra utilizando como referencia un estudio previo realizado en España para la construcción de estructuras de hormigón (Fraga et al., 2014).

Un aporte relevante para la comprensión del desempeño ambiental del hormigón en América Latina es el estudio de Vázquez-Calle et al. (2022), quienes evaluaron la energía incorporada y las emisiones de CO_2 asociadas a la producción de hormigón premezclado en una planta de Cuenca, Ecuador. Conforme a la metodología de Análisis de Ciclo de Vida de la ISO 14040 y 14044 y siguiendo las directrices del IPCC (2006), el estudio adoptó un enfoque "de la puerta a la puerta" que incluyó tanto el transporte de materias primas hacia la planta como el del producto final hacia la obra. Los autores determinaron que la producción de 1 m^3 de hormigón requiere 568.69 MJ de energía y genera 42.83 kg de CO_2, identificando que el transporte indirecto, especialmente el de materias primas, constituye el principal contribuyente a los impactos ambientales, representando aproximadamente el 80% de la energía incorporada y el 79% de las emisiones asociadas (Vázquez-Calle et al., 2022).

3.1.3 Disminución del consumo de agua en la producción de hormigón

Los autores Stamatis Tsimas and Monika Zervaki redactaron en el 2011 el artículo denominado "Reutilización de aguas residuales de plantas de hormigón premezclado", en la cual se demostró que todas las muestras de agua residual estudiadas cumplen las especificaciones de las normas ASTM y UNE-EN para el agua de mezcla utilizada en la producción de hormigón en lo que respecta a sus propiedades químicas, pero no con los estrictos estándares normados en Grecia del agua que se debe utilizar. Por otra parte, el polvo de lodo analizado es principalmente un material fino calcáreo que no podría ser perjudicial para las propiedades del hormigón, sino por el contrario, podrían mejorar la resistencia a la compresión de las muestras, pues los sólidos en suspensión de las aguas residuales pueden mejorar el índice de compactación del hormigón. La principal dificultad identificada por los autores para utilizar las aguas residuales en el proceso de producción del hormigón sería las restricciones nacionales, por los estándares exigidos en las normas (Tsimas & Zervaki, 2011).

Ngo et al (20216) en "Medición avanzada en línea del contenido de agua para la producción de hormigón autocompactante en plantas de hormigón premezclado" establecen que la falta de un protocolo de calibración de sistemas de medición de contenido de agua en el hormigón hace que la precisión del control del agua dependa principalmente del nivel de experiencia del operador de la planta. Además, la forma tradicional de usar estas señales de sensores para determinar el final de la mezcla de hormigón puede generar un tiempo de mezcla adicional innecesario, lo que provoca una pérdida de productividad. Siguiendo el procedimiento establecido, la incertidumbre del contenido de agua en el lote se estimó en torno a 1,4 L/m3. En cuanto al tiempo de estabilización del consumo de energía del mezclador, los resultados experimentales han demostrado que, cuando se utiliza el tiempo de estabilización como el tiempo de mezclado necesario de cada lote de hormigón, se puede lograr una reducción del tiempo promedio de mezclado de hasta un 16%. Estos resultados confirman que, mediante un procedimiento de calibración bien establecido, es posible monitorear la evolución del consumo de energía en un proceso industrial para controlar con precisión el contenido de agua (Ngo et al., 2016).

Yazmin L. Mack-Vergara y Vanderley M. John realizaron en 2017 un estudio titulado "Inventario de agua del ciclo de vida en la producción de hormigón: una revisión". En este, lograron identificar el uso de agua para diferentes componentes y procesos en la producción de hormigón, desde la cuna hasta la puerta, junto con las cifras del inventario de agua. Se encontró una gran dispersión en las cifras del inventario de agua. Esta variabilidad depende no solo del proceso empleado y del producto obtenido, sino también de la metodología empleada para su estimación, que puede tener diferentes definiciones en términos de extracción, descarga y consumo de agua.

Según los autores, solo la cantidad de agua utilizada, incluida el agua de todas las fuentes y calidades, el agua devuelta

al medio ambiente y excluyendo el uso en la corriente, puede permitir una comparación objetiva, ya que refleja principalmente las necesidades reales del proceso y menos las condiciones locales. La metodología del inventario y la huella hídrica es más compleja que la del inventario de CO_2 porque está influida por muchos factores locales. Es deseable el desarrollo de una metodología simplificada para el inventario de agua, consistente con el estándar ISO y basada principalmente en datos primarios fáciles de medir (Y. L. Mack-Vergara & John, 2017).

Los autores Sabbie Miller, Arpad Horvath y Paulo Monteiro discuten en el 2018, en su estudio denominado "Impacto del auge de la producción de hormigón en los recursos hídricos a nivel mundial", cómo la gran mayoría de estudios relacionados con la producción de hormigón se centran en el consumo de energía y las emisiones de CO_2. Debido a esto, se sabe muy poco sobre el consumo de agua. Con esto como base, cuantifican el uso de agua de la producción mundial para el 2012, determinando que para ese año el 9% de las extracciones de agua industrial se debió a la producción de hormigón. También establecen que, para el 2050, es probable que el 75% de la demanda de agua para la elaboración de hormigón se concentre en áreas que sufrirán estrés hídrico. Identifican la necesidad de desarrollar formas de mitigar la demanda de agua, al tiempo que se mantienen los objetivos de reducción de emisiones e identifican los lugares donde es prioritario aplicar medidas de mitigación en el consumo de agua (Miller et al., 2018).

Mack-Vergara y Vanderley continuaron su estudio, el cual publicaron en 2019: "Huella hídrica global del hormigón". En este estudio se estimó la huella hídrica global del hormigón para un hormigón típico de 30 MPa. Dentro del ámbito de la cuna a la puerta, la actividad que parece ser la más intensiva en términos de consumo de agua es la producción de áridos. Por lo tanto, es importante enfocarse en estrategias para reducir el consumo de agua en esta actividad. El resultado de este documento excluye el uso del agua para la producción de energía, una actividad intensiva en agua bien conocida.

La huella hídrica del hormigón podría verse influenciada por la ruta tecnológica utilizada para producir sus componentes, por la propia producción del hormigón, así como por las mediciones y metodologías de huella hídrica. La huella hídrica está muy influida por la temporada y el lugar donde se realiza la actividad, por lo que debe tenerse en cuenta. El estudio de la huella hídrica concreta y sus implicaciones es fundamental para establecer acciones de mejora de la eficiencia hídrica (Mack-Vergara,Y. L. & John V. M., 2019).

Recientemente, Mack-Vergara et al. (2025), estimaron el consumo de agua por metro cúbico de hormigón producido en Panamá utilizando datos primarios obtenidos de la industria. A partir de 20 visitas técnicas, describen las rutas tecnológicas de producción de hormigón en el país y analizan prácticas como el cubrimiento de agregados, la aspersión de agua, y el uso de agua fría o hielo para el control de temperatura de la mezcla. El estudio evaluó 11 plantas en 2022 y encontró que el consumo específico de agua varía entre 189.88 y 641.84 L/m^3, proveniente principalmente de la red pública y de aguas subterráneas, aunque algunas plantas incorporan agua reciclada y lluvia recolectada. Los resultados muestran que estrategias como la captación de agua de lluvia, el reciclaje y el cubrimiento de agregados reducen la dependencia de fuentes convencionales y el consumo energético asociado, evidenciando el nexo agua–energía. Sin embargo, procesos como la aspersión de agregados pueden incrementar significativamente el consumo hídrico cuando no están controlados. Los autores subrayan la necesidad de implementar metodologías estandarizadas de contabilización del agua para facilitar la adopción de estrategias de reducción (Y. L. Mack-Vergara et al., 2025).

3.1.4 Análisis de ciclo de vida en la producción de hormigón

Claudia Muñoz Sanguinetti y Francisco Quiroz Ortiz realizaron en el 2014 el estudio denominado "Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado". Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile". El inventario de ciclo de vida de la producción de

hormigón premezclado en este estudio permitió determinar qué procesos unitarios generan el mayor consumo de energía. Desde el punto de vista del consumo energético, el transporte indirecto de materias primas y el proceso de dosificación y carga en fábrica son los procesos unitarios más importantes, por lo que se deben desarrollar medidas de ahorro energético en ellos, que también forman parte de la estrategia global de procesos. Las mayores emisiones de CO_2 de los sistemas estudiados también estuvieron relacionadas con el transporte de áridos, por lo que se concluye que tanto la energía incorporada como las emisiones de CO_2 asociadas al transporte indirecto de estos dos materiales están presentes en todo el estudio con mayor incidencia. Se deben considerar alternativas de investigación para evaluar el impacto de las reducciones potenciales de energía y de la huella de carbono, teniendo en cuenta variables identificadas, como el uso de mejor tecnología en vehículos de transporte con mayor rendimiento y menores emisiones (Sanguinetti & Ortiz, 2014).

En el 2014, Petek Gursel et al desarrollaron "Análisis del inventario del ciclo de vida de la producción de hormigón: Una revisión crítica". En este explican por qué reducir el impacto medioambiental del hormigón requiere un enfoque relativo al análisis de ciclo de vida, y ofrecen una hoja de ruta para mejorar, a futuro, la calidad de cemento y del hormigón y generando inventarios de ciclo de vida. Destacan la importancia de colaborar con fabricantes para obtener datos primarios, a la vez que conseguir la participación de agencias gubernamentales, instituciones académicas y diseñadores para desarrollar un marco sólido del análisis de ciclo de vida de la producción de hormigón (Petek Gursel et al., 2014).

Los autores Manjunatha et al redactaron "Evaluación del ciclo de vida (ACV) del hormigón preparado con materiales sostenibles a base de cemento" en el 2021, en el que indican que la evaluación del impacto ambiental del hormigón tiene una importancia destacable para lograr una sociedad sostenible. Prepararon un modelo de evaluación del ciclo de vida utilizando el Software SimaPro 9.1 y la base de datos Ecoinvent para estudiar las tres categorías de materiales aglutinantes utilizadas en el hormigón (Cemento portland, escoria granulada y cemento portland con puzolanas). Pudieron concluir que utilizar la escoria granulada y el cemento portland con puzolana como materiales cementicios en la producción de hormigón presenta un menor impacto en el ambiente, que al utilizar el cemento portland; basado en un modelo de análisis de ciclo de vida (Manjunatha et al., 2021).

Otro aporte relevante en la literatura es el presentado por Ankur & Singh (2022), quienes realizan una revisión de los métodos empleados en los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) aplicados al cemento y al hormigón. Los autores resaltan que, aunque el hormigón es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, su principal componente, el cemento, es responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO_2. La fabricación de cemento y hormigón requiere insumos provenientes de recursos naturales, cuyo procesamiento demanda grandes cantidades de energía y genera múltiples emisiones asociadas. En su revisión, Singh et al. señalan que la mayoría de los estudios de ACV adoptan un enfoque "de la cuna a la puerta", centrándose principalmente en el potencial de calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que otros impactos relevantes, como el consumo de agua, las aguas residuales, la generación de residuos sólidos y las emisiones tóxicas, suelen ser excluidos. Los autores enfatizan que estas categorías deben integrarse en los inventarios ambientales, especialmente considerando el creciente uso de residuos industriales como insumos en la fabricación de cemento y hormigón, con el fin de identificar las tecnologías más sostenibles disponibles para el sector de la construcción (Ankur & Singh, 2022).

3.1.5 Oportunidades de reducción de impactos ambientales de la producción de hormigón en Panamá

El primer estudio realizado a nivel nacional fue "Oportunidades para reducir el consumo de agua en la producción de hormigón: estudio de caso de la ampliación del canal de Panamá" en el 2019. En este, Yazmín Mack Vergara y Vanderley John utilizan metodologías afines a la huella hídrica para identificar oportunidades de reducción de consumo de agua en la

(CC BY 4.0) | ISSN 2675-8539 | DOI: http://dx.doi.org/10.52076/eacad-v6i3.671

producción de hormigón; a la vez que introducen un caso de estudio en el canal de Panamá para establecer las cantidades de agua utilizada para producir hormigón que sería utilizado en la expansión de dicho canal. Los resultados obtenidos demostraron que las herramientas de huella hídrica pueden ayudar a reducir el consumo de agua en tiempos de escasez. Concluyen que, dentro de las actividades de producción de hormigón, en la extracción y procesamiento de áridos se presenta la oportunidad de reducir el consumo de agua. Identificar los puntos de mayor consumo para poder reducirlos requiere de una mejor gestión del agua, que permita disponer de datos primarios para dichos consumos (Y. Mack-Vergara & Vanderley, 2019).

Gerald Medina, Basilio Rodríguez y Yazmin Mack-Vergara, en el 2022, marcaron un precedente en el análisis de los impactos ambientales del hormigón en el país con "Oportunidades de reducción de impactos ambientales de la producción de hormigón en Panamá". En este, indican que la producción de hormigón genera importantes impactos ambientales y que, a pesar de que este material tiene una alta demanda en Panamá, existen pocos estudios sobre los procesos de producción realizados y los impactos ambientales que ocasionan estos. En esta investigación se identifican estrategias para reducir los impactos ambientales en la producción de hormigón en Panamá. Se lograron identificar potenciales impactos ambientales, como el calentamiento global, el estrés hídrico, el agotamiento de recursos naturales, la contaminación y el cambio en el uso de suelos. Para minimizar estos potenciales impactos ambientales, proponen estrategias como sistemas de almacenamiento y reutilización de agua de lluvia, programas de capacitación continua, instalación de sistemas fotovoltaicos de energía, sistemas de aspersión controlados por horarios, entre otros. (Medina Sandoval et al., 2022).

4. Conclusión

El análisis del estado del arte sobre la producción sostenible de hormigón permitió identificar los avances conceptuales, tecnológicos y metodológicos que han marcado la evolución de este campo en las últimas décadas. A nivel internacional, existe un consenso creciente en torno a la necesidad de reducir el contenido de clínker, promover el uso de materiales cementantes suplementarios, optimizar el diseño de mezclas y mejorar la eficiencia operativa para disminuir las emisiones de CO_2 y el consumo energético. Asimismo, emergen innovaciones relevantes como los hormigones de bajas emisiones, las tecnologías de captura y mineralización de carbono y la optimización computacional de mezclas, que amplían el espectro de soluciones disponibles para la industria.

En el ámbito del uso del agua, la revisión evidenció que, aunque se trata de un recurso crítico para la producción de hormigón, su evaluación ha recibido menos atención que la de la energía y las emisiones. Los estudios globales muestran que la producción de hormigón representa una fracción significativa de las extracciones industriales de agua y que su demanda futura se concentrará en regiones con estrés hídrico. La alta variabilidad metodológica entre estudios subraya la necesidad de enfoques más consistentes y de datos primarios que permitan caracterizar con precisión los consumos reales.

El análisis de los estudios basados en la evaluación del ciclo de vida demuestra que los impactos ambientales del hormigón dependen fuertemente del contexto, de las tecnologías empleadas y de las características de los insumos. Factores como la producción de cemento, la logística de agregados, el uso de energía y los procesos de mezcla contribuyen de manera significativa a diversas categorías de impacto, reafirmando la importancia de evaluar el sistema de manera integral.

En el caso de Panamá, la revisión evidenció que, a pesar de la alta demanda de hormigón y de la relevancia ambiental de su cadena de producción, la base de conocimiento local sigue siendo limitada y fragmentada. Los estudios existentes representan aportes iniciales valiosos, pero también revelan importantes brechas en la disponibilidad de datos, la estandarización metodológica, la incorporación de análisis de ciclo de vida y el desarrollo de indicadores ambientales específicos para el país. Asimismo, se identifican oportunidades claras para mejorar la gestión del agua, reducir los impactos asociados a la extracción de áridos, promover el uso de energías renovables y fortalecer las capacidades técnicas del sector.

Los resultados de este estudio confirman la necesidad de avanzar hacia una producción de hormigón más sostenible en Panamá mediante el desarrollo de metodologías armonizadas, la generación de datos primarios, la transferencia tecnológica y la implementación de estrategias integrales de mitigación ambiental. El marco de análisis presentado constituye un punto de apoyo para orientar futuras investigaciones, apoyar la formulación de políticas públicas y fomentar prácticas industriales más eficientes, resilientes y alineadas con los objetivos globales de sostenibilidad.

Agradecimientos

Esta investigación y el APC fueron financiados por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación—SENACYT (Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación) a través del proyecto IDDS22-54 "Inventario de agua, energía y CO_2 de la producción de hormigón en Panamá", así como apoyados por el Sistema Nacional de Investigación—SNI (Sistema Nacional de Investigación) de Panamá.

Referencias

Ankur, N., & Singh, N. (2022). A Review on the Life Cycle Assessment Phases of Cement and Concrete Manufacturing. En P. Ghadimi, M. D. Gilchrist, & M. Xu (Eds.), *Role of Circular Economy in Resource Sustainability* (pp. 85-96). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90217-9_8

Ding, C., Dong, W., Zhang, A., Wang, Z., Zhao, N., Chen, R., & Fu, H. (2021). Life cycle water footprint assessment of concrete production in Northwest China. *Water Policy*, *23*(5), 1211-1229. https://doi.org/10.2166/wp.2021.009

Fraga, J. M., Caño, A. del, & Cruz, M. P. de la. (2014). Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: Análisis de consumo energético y emisiones de CO2. *Proceedings from the 18th International Congress on Project Management and Engineering (Alcañiz, July 2014), 2014, ISBN 978-84-617-2742-1, págs. 508-520*, 508-520. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8225635

Kim, T., Tae, S., & 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

Mack-Vergara, Y. L., & John, V. M. (2017). Life cycle water inventory in concrete production—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *122*, 227-250. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.004

Mack-Vergara, Y. L., Sulbarán, L., & Lima, Y. (2025). Water Consumption of Concrete Production in Panama. En L. Ferrara, G. Muciaccia, & N. Trochoutsou (Eds.), *Proceedings of the RILEM Spring Convention and Conference 2024* (pp. 421-428). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70277-8_48

Mack-Vergara, Y., & Vanderley, J. (2019). *Opportunities for Reducing Water Consumption in Concrete Production: The Panama Canal Expansion Case Study*. https://www.iahr.org/library/infor?pid=3765

Mack-Vergara,Y. L. & John V. M. (2019). Global Concrete Water Footprint. *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 193-196. https://doi.org/10.1109/IESTEC46403.2019.00-77

Mahevi, S. A., Kaliluthin, A. K., Husain, D., Ansari, Y., & Ahmad, I. (2024). Ecological Footprint and Economic Assessment of Ready-Mix Concrete Production. En S. S. Muthu (Ed.), *Ecological Footprint of Industrial Spaces and Processes* (pp. 37-48). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69047-1_4

Manjunatha, M., Preethi, S., Malingaraya, Mounika, H. G., Niveditha, K. N., & 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

Medina Sandoval, G. A., Rodríguez Cruz, B. A., & Mack-Vergara, Y. L. (2022). Oportunidades de reducción de impactos ambientales de la producción de hormigón en Panamá. *E-Acadêmica*, *3*(3), e0333264-e0333264.

Mehta, K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete . *Undefined*. https://www.semanticscholar.org/paper/Reducing-the-Environmental-Impact-of-Concrete-Mehta/7e74b74e2a395c0827df458c0c60ef872d150d0c

Mehta, P. K. (2010). *Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change Era – A Review*. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.2738&rep=rep1&type=pdf

Mendoza-Rangel, J. M., Díaz-Aguilera, J. H., Mendoza-Rangel, J. M., & Díaz-Aguilera, J. H. (2023). Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: Una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos. *Revista ALCONPAT*, *13*(3), 328-348. https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697

Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, *31*(8), 601-605. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010

Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, *1*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5

Ngo, H.-T., Kadri, E.-H., Kaci, A., Ngo, T.-T., Trudel, A., & Lecrux, S. (2016). Advanced online water content measurement for self-compacting concrete production in ready-mixed concrete plants. *Construction and Building Materials*, *112*, 570-580. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.158

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Fabio José Parreira, & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia de pesquisa científica*. Editora da UFSM.

Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, *51*, 38-48. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005

Restrepo-Ramírez, A. F., Rúa-Machado, C. A., Arias-Jaramillo, Y. P., Restrepo-Ramírez, A. F., Rúa-Machado, C. A., & Arias-Jaramillo, Y. P. (2024). Optimizaciones en el diseño de mezclas de concreto para la sostenibilidad de un área metropolitana de sudamérica implementando análisis de ciclo de vida de materiales. *Revista hábitat sustentable*, *14*(1), 44-65. https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.04

Rother, E. T. (2007). Revisión sistemática X revisión narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, *20*, v-vi. https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001

Sanguinetti, C. M., & Ortiz, F. Q. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 16-25. http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/447

Vázquez-Calle, K., Guillén-Mena, V., & Quesada-Molina, F. (2022). Analysis of the Embodied Energy and CO2 Emissions of Ready-Mixed Concrete: A Case Study in Cuenca, Ecuador. *Materials*, *15*(14), Article 14. https://doi.org/10.3390/ma15144896

Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E. F., Torres-Acosta, A., Tobón, J., & John, V. M. (2022). Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality. *RILEM Technical Letters*, *7*, 30-46. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155

Yoshioka, K., Obata, D., Nanjo, H., Yokozeki, K., Torichigai, T., Morioka, M., & Higuchi, T. (2013). New Ecological Concrete that Reduces CO2 Emissions Below Zero Level ~ New Method for CO2 Capture and Storage ~. *Energy Procedia*, *37*, 6018-6025. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.530