

Evaluación ambiental simplificada de diseños de mezclas de hormigón en el contexto panameño

Simplified environmental assessment of concrete mix designs in the panamanian context

Nazareth Batista^{1,2}, Edgar Moreno^{1,2}, Yazmin L. Mack-Vergara^{1,2,3,}*

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería,

Grupo de Investigación Sustainable Construction UTP, Panamá

³Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025. **Fecha de aceptación:** 30 de octubre de 2025.

***Autor de correspondencia:** yazmin.mack@utp.ac.pa

Resumen. El alto consumo de hormigón en Panamá responde a su condición de material base en la construcción. Dado el crecimiento de la construcción en Panamá, se requieren medidas para mitigar potenciales impactos ambientales que esta produce. Para esto, el diseño de mezclas de hormigón debe ser considerado, ya que incide en su impacto ambiental. Esta investigación busca evaluar diseños de mezclas de hormigón en Panamá por medio de indicadores de desempeño ambiental considerando indicadores de intensidad de aglutinante e intensidad de CO₂ para evaluar su desempeño ambiental y su resistencia a compresión. Se recopilaron veintidós diseños de mezclas, tres de publicaciones científicas y diecinueve de una constructora local. Además, se estudiaron tres Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de diseños de mezcla de hormigón en Panamá. La elaboración de este estudio consistió en aplicar estas métricas a los diseños obtenidos, los resultados muestran que es posible reducir el contenido de cemento sin afectar la resistencia a compresión que es su función principal, logrando menores emisiones de CO₂. Se detectó, la necesidad de mejorar la disponibilidad de datos sobre la composición del cemento y el origen de los materiales. Esta evaluación inicial permite identificar mezclas más sostenibles y representa una herramienta útil para orientar decisiones en la industria, sentando las bases para futuras investigaciones más detalladas. El estudio contribuye al establecer una línea base del desempeño ambiental del hormigón en Panamá mediante indicadores accesibles como la intensidad de aglutinante y de CO₂.

Palabras clave. Clinker, construcción sostenible, declaraciones ambientales de producto, emisiones de dióxido de carbono, mezcla de concreto.

Abstract. The high consumption of concrete in Panama is due to its role as a fundamental material in construction. Given the growth of the construction sector in Panama, measures are required to mitigate the potential environmental impacts it generates. In this context, the design of concrete mix proportions must be considered, as it directly influences their environmental impact. This research aims to evaluate concrete mix designs in Panama using environmental performance indicators, specifically binder intensity and CO₂ intensity, to assess both their environmental performance and compressive strength. Twenty-two mix designs were collected: three from scientific publications and nineteen from a local construction company. In addition, three Environmental Product Declarations (EPDs) for concrete mix designs in Panama were analyzed. The methodology consisted of applying these metrics to the collected mix designs. The results show that it is possible to reduce cement content without affecting compressive strength—its primary function—thus achieving lower CO₂ emissions. A need to improve data availability regarding cement composition and the origin of materials was identified. This initial assessment makes it possible to identify more sustainable concrete mixes and represents a useful tool for guiding decision-making in the industry, while laying the groundwork for more detailed future research. The study contributes by establishing a baseline of the environmental performance of concrete in Panama through accessible indicators such as binder intensity and CO₂ intensity.

Keywords. Clinker, sustainable construction, environmental product declarations, carbon dioxide emissions, concrete mix.

1. Introducción

El hormigón es el material más utilizado en la construcción en el mundo, y en términos generales es el segundo recurso con mayor uso, superado solo por el agua [1]. Esto es debido a que combina una alta resistencia mecánica, durabilidad, bajo mantenimiento, versatilidad y fácil uso [2].

El alto consumo de hormigón en Panamá responde a su condición de material base en el desarrollo de infraestructuras, tan solo en 2024 la industria de la construcción aporto el 17.4% del Producto Interno Bruto (PIB) [3], esto demuestra la importancia de este sector en el país (Figura 1).

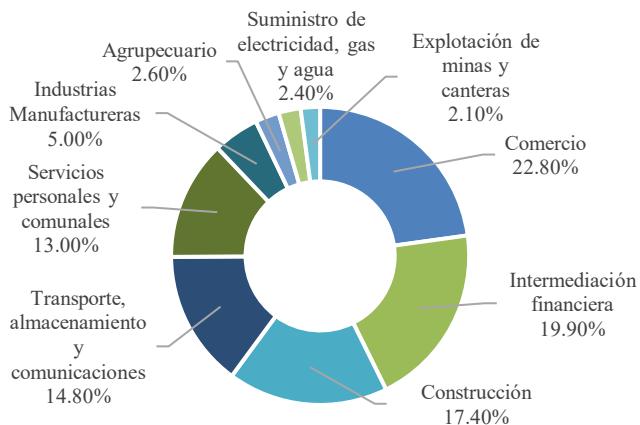


Figura 1. Valor agregado del PIB por actividad económica a precios corrientes, Panamá 2024 [3].

Sin embargo, la producción de hormigón acarrea impactos ambientales especialmente por el proceso de fabricación de cemento que representa una de las fuentes más significativas de emisiones de dióxido de carbono, debido a la descomposición de la piedra caliza y el uso de combustibles fósiles. A nivel global este sector es responsable del 7% del consumo energético industrial [4]. Al ser una industria en constante crecimiento, se vuelve necesario adquirir medidas para mitigar los potenciales impactos ambientales negativos debido al uso de hormigón como material de construcción.

Panamá, a pesar de ser uno de los tres países en el mundo con emisiones de carbono negativas, sigue promoviendo la reducción emisiones de CO₂ mediante prácticas sostenibles [5], entre estas estrategias se encuentra el Programa Reduce Tu Huella, cuyo objetivo es establecer un proceso estandarizado para identificar, cuantificar, verificar y reportar la huella de carbono de organizaciones públicas y privadas. [6]

La Universidad Tecnológica De Panamá en con junto con la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT), han realizado investigaciones referentes a la evaluación del impacto ambiental del hormigón, enfocados en reducir su huella de carbono y huella hídrica. Investigaciones

enmarcadas en el proyecto, “Inventario de agua, energía y CO₂ de la producción de hormigón en Panamá” [7], [8], [9] analizan de manera detallada el desempeño ambiental del material, impulsando la identificación y el desarrollo de hormigones bajos en carbono. Sin embargo, estos estudios no toman en cuenta el desempeño mecánico del hormigón, por lo que se vuelve necesario el análisis de dicho criterio.

Esta investigación se considera una evaluación ambiental simplificada, debido a que se enfoca únicamente en la cantidad de cemento utilizada por unidad de resistencia mecánica como indicador ambiental. Sin embargo, la presente investigación contribuye al establecer una línea base del desempeño ambiental del hormigón en Panamá mediante indicadores accesibles como la intensidad de aglutinante y de CO₂. Permite identificar mezclas de alto impacto ambiental, relacionar emisiones con resistencia mecánica y sensibilizar a la industria sobre la sostenibilidad del hormigón, facilitando decisiones informadas y sentando las bases para análisis más avanzados en el futuro.

El objetivo general de la investigación es evaluar diseños de mezclas de hormigón propuestos o utilizados en Panamá por medio de indicadores de desempeño ambiental simplificados basados en los indicadores de intensidad de aglutinante e intensidad de CO₂ propuestos por [10] para evaluar su desempeño ambiental (emisiones de CO₂) considerando además su desempeño mecánico (resistencia a compresión).

2. Metodología

Esta investigación es de tipo documental, ya que se colectaron diseños de mezclas de hormigón propuestos o utilizados en Panamá incluyendo su dosificación y resistencia a compresión. Se realizó una búsqueda de literatura sobre publicaciones en donde se indicarán diseños de mezclas de hormigón investigados en Panamá, se buscaron Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de diseños de mezclas de hormigón en Panamá y se obtuvieron diseños de mezclas de hormigón utilizados por una constructora en el país.

Las Declaraciones Ambientales de Productos (DAP) informan sobre el impacto ambiental de la fabricación de un producto durante todo su ciclo de vida, y sigue las normas ISO 14040 [11]

Luego de revisar toda la información colectada, se obtuvieron tres diseños de mezcla [12] y 19 diseños de mezcla provistos por una constructora x que contaban con suficiente información (dosificación y resistencia a compresión) para poder ser utilizadas en este estudio. Se encontraron tres Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) en Panamá, que, aunque no contaban con la información completa ya que no declaran el consumo de cemento, fueron estudiadas respecto a los impactos ambientales que reportan.

Con el propósito de evaluar diseños de mezclas de hormigón panameños mediante indicadores de desempeño ambiental simplificados, basados en los indicadores propuestos por Damineli et al. (2010) [10] según las ecuaciones (1) y (2) descritas a continuación.

- Índice de intensidad del aglutinante (bi). Mide la cantidad de aglutinante (kg m^{-3}) necesaria para obtener 1 MPa de resistencia mecánica y, en consecuencia, expresar la eficiencia del uso de materiales aglutinantes (ecuación 1).

$$bi = \frac{b}{p} \quad (1)$$

Donde:

b: consumo total de materiales aglomerantes (kg m^{-3})

p: resistencia a la compresión (MPa) a los 28 días

- Índice de intensidad de CO_2 (ci). Permite estimar el potencial de calentamiento global de las formulaciones de hormigón. Este índice utiliza factores de emisión para el clínker, así como para las adiciones de materiales cementicios supplementarios (MCS).

En el artículo [10] se cuenta con factores de emisión para el clínker y para el metacaolín. Se considera que los demás MCS (escoria, cenizas volantes, humo de sílice) tienen cero emisiones. Este índice utiliza factores de emisión para el clínker, así como para las adiciones de Materiales Cementicios Supplementarios (MCS).

$$ci = \frac{c}{p} \quad (2)$$

Donde:

c: es el CO_2 total (kg m^{-3}) emitido para producir y transportar todas las materias primas del hormigón.

p: resistencia a la compresión (MPa) a los 28 días.

- Factor de emisión de CO_2 del cemento en Panamá. Las emisiones de CO_2 asociadas a la producción de clínker provienen en parte de los procesos fisicoquímicos inherentes al propio proceso productivo, tal como ocurre también en industrias como la del acero, la cal o el amoniaco. Estas emisiones de proceso se estiman en aproximadamente 520 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ por tonelada de clínker [13].

No obstante, para una estimación más completa del impacto ambiental, deben considerarse también las emisiones derivadas del consumo energético, tanto por combustibles como por electricidad. En conjunto, el factor de emisión (FE) de referencia para la producción de clínker puede alcanzar los 850 $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ por tonelada producida [14].

3. Resultados y discusión

3.1 Indicadores de aglutinante y CO_2

Los resultados obtenidos para los indicadores asociados al uso de aglutinantes y las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) se muestran en la figura 2 y la figura 3. En ambos gráficos se indican líneas de tendencia para 100 kg/m^3 , 250 kg/m^3 , 500 kg/m^3 y 1000 kg/m^3 . Esto como referencia del

consumo de aglutinante. Se observa que, para el indicador de intensidad de aglutinante, los resultados se muestran en el rango de entre 250 kg/m^3 y 500 kg/m^3 y para el caso del indicador de intensidad de CO_2 los resultados están en promedio en 250 kg/m^3 .

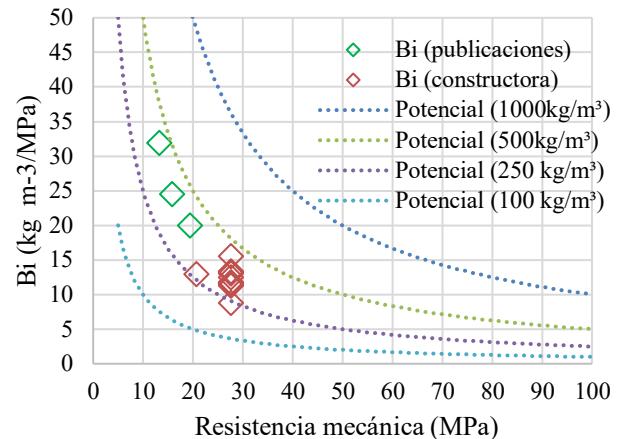


Figura 2. Índice de intensidad de aglutinante (bi).

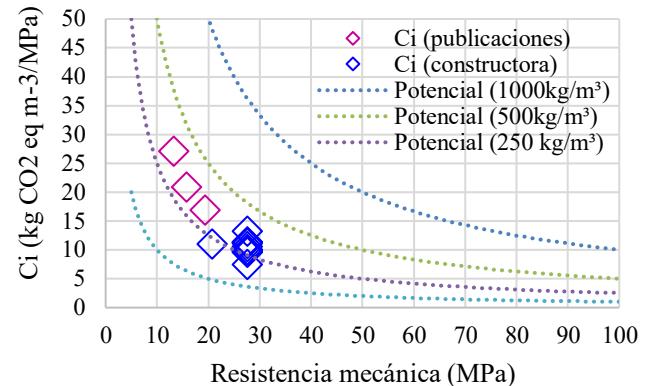


Figura 3. Índice de intensidad de CO_2 (ci).

Los tres diseños de mezcla de Pinto et al (2018) se realizaron con Cemento Tipo I Estructural con un contenido de clínker que va desde 81 al 90% [15], mientras que los 19 diseños de mezcla de la constructora utilizaron cemento de alta resistencia inicial (HE) con un contenido de clínker que va desde 71 al 80% [16]. Comparado con los resultados de [10], los diseños de mezcla de hormigón de Panamá tienen un desempeño por debajo de la curva de 500 kg/m^3 .

En la figura 2 se observa un potencial para reducir la intensidad de uso de cemento, ya que hay diseños de mezcla que presentan la misma resistencia mecánica (27.57 MPa), pero utilizando menos cemento. Esto comprueba que es posible reducir la dosificación del material cementante sin comprometer la resistencia mecánica del concreto.

Implementar este tipo de ajustes contribuye significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento, esto se ve reflejado en el gráfico de la figura 3 donde la mezcla con menor cantidad de aglutinante tiene menor emisión de CO₂.

3.2 Declaraciones Ambientales de Producto (DAP)

Se requiere información completa sobre la composición del cemento, así como la procedencia de sus componentes (clíker y MCS) para poder calcular de manera más precisa el indicador de intensidad de aglutinante (ci).

En Panamá, en los casos en los que se usan MCS importadas para mejorar el desempeño del hormigón en cuanto a resistencia, durabilidad y control de temperatura. En este caso los MCS importados no se utilizan para disminuir la huella de carbono del cemento y del hormigón, de hecho, puede haber un aumento en dicha huella si se considera el transporte para su importación.

Si bien, aplicar la perspectiva de ciclo de vida a la evaluación de impactos ambientales de la producción de hormigón requeriría evaluar los impactos (en este caso las emisiones de CO₂) de sus componentes incluyendo el cemento y los agregados, además de la producción de hormigón en sí (es decir las emisiones de CO₂ por el uso de electricidad y combustibles en la planta), la literatura indica que más del 90% de las emisiones de CO₂ del concreto se deben a la producción de cemento y es por eso que se ha recomendado enfocarse en el cemento.

Tabla 1 Métricas de evaluación de impacto considerando A-A3, A4 de diseños de mezcla de hormigón encontrados en Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de Panamá.

| Diseño de mezcla | Referencia | Cambio climático (kg CO ₂ eq) | Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq) | Acidificación (kg SO ₂ eq) | Eutrofización (kg N eq) | Creación de ozono fotoquímico/ Esnog (kg O ₃ eq) | Elementos ADP (kg Sbe) | Fósil de ADP (MJ) |
|-------------------------------|------------|--|--|---------------------------------------|-------------------------|---|------------------------|-------------------|
| Mix Code 10014375 (4000 psi) | [17] | 432 | 5.61E-06 | 2.29 | 0.068 | 32.9 | | |
| Mix Code 10019170 (8000 psi) | | 633 | 8.27E-06 | 3.34 | 0.094 | 45.8 | | |
| 6-280-3-8-28-20-1-T-235 | [18] | 318 | 1.83E-05 | 1.07 | 0.296 | 19.9 | | |
| 6-280-5-B-28-15-1-T-000 | | 309 | 1.82E-05 | 1.04 | 0.283 | 19.4 | | |
| 6-350-5-B-28-15-1-T-000 | | 354 | 1.95E-05 | 1.16 | 0.321 | 21.4 | | |
| 6-490-3-B-56-65-1-T-30K | | 435 | 2.57E-05 | 1.51 | 0.422 | 25.7 | | |
| A-490-3-B-56-20-1-T-301 | | 398 | 2.14E-05 | 1.32 | 0.374 | 23.7 | | |
| A-56O-3-B-56-20-1-T-301 | | 444 | 2.29E-05 | 1.45 | 0.417 | 25.8 | | |
| A-63O-3-B-56-20-1-T-301 | | 498 | 2.39E-05 | 1.59 | 0.456 | 28.2 | | |
| A-705-3-B-56-20-1-T-301 | | 547 | 2.64E-05 | 1.76 | 0.518 | 30.6 | | |
| F'c 420 Kg/cm ² FB | | 329.1 | 1.56E-05 | 0.836 | 0.29243 | 0.03484 | 0.02653 | 2349 |

*Declarado en kg PO₄3 e

**Declarado en kg C₂H₄ e

Del inventario de emisiones de CO₂ de la producción de hormigón en Panamá, se tienen valores de emisiones totales de CO₂ incluyendo las emisiones debido al uso de combustible y al uso de electricidad de entre 11.33 y 109.79 kg CO₂eq/m³ para el 2021 y de entre 15.9 y 120.69 kg CO₂eq/m³ para el 2022 [8].

Existen otros potenciales impactos ambientales relacionados a la producción de hormigón. En Panamá, el reporte de las emisiones de CO₂ es importante debido a los compromisos internacionales que tiene el país. Sin embargo, en orden de prioridad, tal vez los impactos ambientales relacionados al uso de agua tengan mayor relevancia ya que la industria deberá adaptarse frente a los escenarios futuros de escasez de agua.

En el caso del consumo del agua, sí es necesario enfocarse en los procesos de producción de agregados, cemento y hormigón en sí ya que a diferencia de las emisiones de CO₂, el impacto debido al uso de agua puede estar más distribuido. En la producción de hormigón, por ejemplo, además del agua de mezcla, hay procesos de lavado que son intensivos en agua.

Debido al crecimiento de la población, frenar la producción de hormigón no es una opción. La alternativa es una producción con el menor impacto ambiental posible pero que permita darle continuidad a los proyectos de vivienda e infraestructura que se necesitan en países en vías de desarrollo como es el caso de Panamá.

4. Conclusiones

El concreto en Panamá es un material esencial para la construcción de infraestructuras, pero su producción conlleva un alto consumo de recurso y emisiones de CO₂. Dado al crecimiento poblacional, no es una opción reducir su uso, sino optimizarlo.

Los Indicadores simplificados permiten evaluar el desempeño ambiental de mezclas de hormigón en Panamá, facilitando la identificación de opciones con menor CO₂ sin afectar la resistencia del hormigón.

A pesar del tamaño de la muestra, la aplicación de los indicadores simplificados permitió identificar una mezcla con igual resistencia y menor impacto, demostrando la utilidad de los indicadores para optimizar el diseño de mezclas de hormigón.

Para calcular emisiones reales y aplicar adecuadamente los indicadores en Panamá, se requiere información sobre la procedencia de los materiales cementicios suplementario (MCS) y datos locales.

Si bien el CO₂ es un objetivo clave, el consumo de agua podría ser un impacto más relevante que el CO₂ en Panamá, ante escenarios de cambio climático.

Una muestra más amplia permitirá validar resultados, establecer referencias locales adaptadas a la industria panameña y fortalecer estrategias para un hormigón ambientalmente sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por su apoyo a la investigación. A la constructora que facilitó los diseños de mezcla de hormigón para este estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Global Cement and Concrete Association, «Concrete Future – GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete.» 2021. [En línea]. Disponible en: <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>
- [2] E. F. Irassar, V. John, J. I. Tobón, K. R. García Punhagu, y J. L. Mack Vergara., «Rol del cemento en la construcción de ciudades sostenibles y resilientes: El desafío latinoamericano». Federación Interamericana del Cemento (FICEM), 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/Paper-ciudades-resilientes.pdf>
- [3] Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPALSTAT, «Base de Datos u Publicaciones Estadísticas.» Accedido: 30 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/perfil-nacional.html?theme=2&country=pan&lang=es>
- [4] International Energy Agency y World Business Council on Sustainable Development, «Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry». Cement Sustainability Initiative (CSI), 2018. [En línea]. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitioninthCementIndustry.pdf>
- [5] Mission Panamá « Boldly Sustainable». 2021. Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://missionpanama.gob.pa/boldly-sustainable/>
- [6] Ministerio de Ambiente «Programa Nacional Reduce Tu Huella - Plataforma Nacional de Transparencia Climática.», Plataforma Nacional de Transparencia Climática de Panamá | PNTC. S.F. Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://transparencia-climatica.miambiente.gob.pa/rth/>
- [7] Y. Lima, L. Sulbarán, y Y. L. Mack-Vergara, «La necesidad de un inventario de agua, energía y CO₂ del hormigón en Panamá», *Revista de Iniciación Científica*, vol. 9, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2023, doi: 10.33412/rev-ric.v9.2.3837.
- [8] Y. Mack, K. L. Ng, F. Grajales, M. Muñoz, y F. Belizario Silva, «Inventario de agua, energía y CO₂ de la producción de hormigón en Panamá». 2025.
- [9] Y. Lima, L. Sulbarán, y Y. Mack-Vergara, «Consumo de agua, energía y CO₂ del hormigón según datos de empresas activas en Panamá», *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, pp. 319-325, sep. 2023, doi: 10.33412/apanac.2023.3954.
- [10] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, y V. M. John, «Measuring the eco-efficiency of cement use», *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n.º 8, pp. 555-562, sep. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.
- [11] NRMCA. «Environmental Product Declarations». S.F. Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrmca.org/association-resources/sustainability/environmental-product-declarations/>
- [12] M. R. Pinto, C. I. Carrasco, y K. E. Caballero, «Estudio experimental del concreto poroso con la incorporación de distintas granulometrías», 2018, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ide-tecnologico/article/view/2074>
- [13] Ministerio de Ambiente, «Factores de emisión y potenciales de calentamiento global de Reduce Tu Huella Corporativo - carbono». 2024. [En línea]. Disponible en: <https://transparencia-climatica.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2024/09/Documento-Factores-de-Emision-y-Potenciales-de-Calentamiento-Global-1.pdf>

- [14] T. Rudnicki y P. Stałowski, «Performance Research of Cement Concrete Pavements with a Lower Carbon Footprint», *Materials*, vol. 17, n.º 13, Art. n.º 13, ene. 2024, doi: 10.3390/ma17133162.
- [15] CEMEX. «Cemento Portland Tipo I | CEMEX Puerto Rico». S.F. Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cemexpuertorico.com/productos/cementos/hojas-de-seguridad/cemento-portland-tipo-i>
- [16] Cemento YURA, «Hoja de Datos de Seguridad». 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yura.com.pe/wp-content/uploads/ficha-msds-yura-he.pdf>
- [17] ARGOS, «Environmental Product Declaration (EPD) for Concrete». 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2019/10/20141119-Argos-Panama-EPD.pdf>
- [18] CEMEX, «Environmental Product Declaration». 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2019/10/NRMCAEPD10014PanamaCEMEX.pdf>
- [19] CONCRETEX, «Environmental product declaration». 2024. [En línea]. Disponible en: <https://manage.epdhub.com/?epd=HUB-1113>