TecnoLógicas

Evaluación multicriterio de la sostenibilidad técnica y ambiental de concretos con adiciones

Multi-Criteria Assessment of the Technical and Environmental Sustainability of Supplementary Cementitious Materials

Johan E. Garzón-Barbosa[1]; Romel J. Gallardo-Amaya[1]; Pedro N. Angarita-Uscátegui[1]

[1]Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña - Colombia

Correspondencia: rjgallardoa@ufpso.edu.co

Recibido: 02 Octubre 2025 **Aceptado:** 29 Septiembre 2026 **Disponible:** 09 Octubre 2026

Cómo citar / How to cite
J. E. Garzón-Barbosa, R. J. Gallardo-Amaya, and P. N. Angarita-Uscátegui, "Evaluación multicriterio de la sostenibilidad técnica y ambiental de concretos con adiciones" *TecnoLógicas*, vol. 29, no. 67, e3681, 2026.
https://doi.org/10.22430/22565337.3681

CC BY NC SA

Resumen

La selección de concretos con menor impacto ambiental exige considerar simultáneamente su desempeño técnico, las emisiones asociadas a su producción y el aprovechamiento de recursos; sin embargo, estas dimensiones suelen analizarse por separado, lo que dificulta comparar alternativas en etapas tempranas de decisión. Esta investigación tuvo como objetivo proponer y aplicar un marco multicriterio para comparar la sostenibilidad técnica y ambiental, el cual se aplicó a cuatro tipologías de concreto: con cemento Portland convencional, con adiciones minerales, geopolimérico y activado alcalinamente. La metodología empleada se desarrolló en tres fases: se identificaron los criterios de sostenibilidad técnica y ambiental a partir de literatura científica y normativa, se desarrolló una matriz de ponderaciones de criterios de sostenibilidad, y se diseñó una metodología de evaluación que permitió analizar y comparar la sostenibilidad de concretos con adiciones. Los resultados obtenidos fueron índices de sostenibilidad de 1,45 para el concreto con cemento Portland, 2,30 para el concreto con adiciones minerales, 2,80 para el concreto activado alcalinamente y 2,85 para el concreto geopolimérico. Las mayores puntuaciones se asociaron con la menor dependencia del clínker y el aprovechamiento de subproductos, aunque los beneficios de los sistemas activados dependieron del precursor, el activador y las condiciones de curado. El concreto con adiciones minerales mostró un desempeño intermedio, mientras que el Portland obtuvo el menor índice por los impactos ambientales asociados a su producción. Se concluye que una evaluación multicriterio de materiales innovadores permite demostrar que los concretos con geopolímeros tienen mayor índice de sostenibilidad. Además, la metodología es aplicable a concretos con diferente composición, así como la inclusión de nuevas líneas de investigación en diferentes materiales de construcción, redefiniendo y validando diferentes aspectos claves en cada uno de ellos.

Palabras clave

Concreto activado alcalinamente, concreto geopolimérico, huella de carbono, materiales cementantes suplementarios, sostenibilidad.

Abstract

The selection of concretes with a lower environmental impact requires simultaneously considering their technical performance, production-associated emissions, and resource utilization; however, these dimensions are often analyzed separately, making it difficult to compare alternatives in the early decision-making stages. This research aimed to propose and apply a multi-criteria framework to compare technical and environmental sustainability, which was applied to four concrete typologies: conventional Portland cement concrete, concrete with mineral additions, geopolymer concrete, and alkali-activated concrete. The methodology employed was developed in three phases: technical and environmental sustainability criteria were identified based on scientific literature and regulations, a weighting matrix of sustainability criteria was developed, and an evaluation methodology was designed to analyze and compare the sustainability of concretes with additions. The results obtained yielded sustainability indices of 1.45 for Portland cement concrete, 2.30 for concrete with mineral additions, 2.80 for alkali-activated concrete, and 2.85 for geopolymer concrete. The highest scores were associated with the lowest dependence on clinker and the utilization of by-products, although the benefits of activated systems depended on the precursor, activator, and curing conditions. Concrete with mineral additions showed an intermediate performance, while Portland concrete obtained the lowest index due to the environmental impacts associated with its production. It is concluded that a multi-criteria assessment of innovative materials demonstrates that geopolymer concretes have the highest sustainability index. In addition, the methodology is applicable to concretes with different compositions, as well as to the inclusion of new lines of research in different construction materials, redefining and validating different key aspects in each of them.

Keywords

Alkali-activated concrete, geopolymer concrete, carbon footprint, supplementary cementitious materials, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales empleados en la construcción generan impactos ambientales durante las diferentes etapas de su ciclo de vida, desde la extracción y el procesamiento de las materias primas hasta su transporte, incorporación en las obras y gestión al final de su vida útil. Estos impactos están relacionados con el agotamiento de recursos naturales, el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de residuos [1], los cuales adquieren una gran relevancia debido a los grandes volúmenes demandados para la construcción de edificios e infraestructura. Según [2], la industria de la construcción representó cerca del 33 % de la huella de carbono global, siendo los materiales cementicios, los ladrillos y los metales los que aportan más de la mitad de estas emisiones.

Dentro de los materiales de construcción, el más utilizado a nivel mundial es el concreto, con una producción que supera los 30 mil millones de toneladas anuales [3]. El cemento como uno de los materiales del concreto genera en su producción aproximadamente el 8 % de las emisiones antropogénicas globales de CO_2 [4], principalmente por la descarbonatación de la caliza durante la fabricación del clínker y por la energía térmica requerida en los hornos [4], [5]. Asimismo, la producción de concreto demanda grandes cantidades de arena, grava y agua, lo que incrementa la presión sobre los recursos naturales [2]. Este panorama evidencia la necesidad de reducir el contenido de clínker, incorporar subproductos industriales y evaluar concretos alternativos mediante criterios técnicos y ambientales que permitan determinar su sostenibilidad [5], [6].

En este contexto, la magnitud de los impactos generados se intensifica por la elevada demanda mundial de concreto y por el consumo de agregados y agua requerido para su producción [7]. Como respuesta, se han desarrollado concretos que sustituyen parcialmente el cemento Portland o el clínker mediante materiales cementantes suplementarios, cenizas volantes, escorias y otros subproductos industriales; también se han estudiado sistemas con ligantes geopoliméricos y activados alcalinamente [8], [9]. Estas alternativas buscan disminuir las emisiones asociadas con la fabricación del cemento Portland y aprovechar residuos que, de otra manera, podrían ser dispuestos en vertederos [10], [11]. Algunos estudios reportan reducciones de la huella de carbono entre el 50 % y el 60 % en concretos con materiales cementantes suplementarios, así como disminuciones cercanas al 55 % en sistemas activados alcalinamente [12],

[13]. No obstante, estos resultados dependen del porcentaje de sustitución, el origen de los precursores, el tipo de activador, la matriz energética, el transporte y los límites considerados en la evaluación.

Las alternativas anteriormente mencionadas muestran un potencial favorable, pero beneficios suelen analizarse mediante variables independientes, como la huella de carbono, el consumo energético, la resistencia mecánica o la durabilidad y no de manera global [14], [15]. Este análisis fragmentado dificulta establecer comparaciones integrales, debido a que una reducción de emisiones no garantiza por sí misma la sostenibilidad del material; además, debe considerarse su desempeño estructural, vida útil, aprovechamiento de residuos y capacidad de reciclaje. En consecuencia, se requiere una metodología que integre estas dimensiones y permita comparar diferentes concretos mediante criterios homogéneos, ponderaciones y una escala común de valoración.

A partir de esta necesidad, la presente investigación desarrolló una metodología conformada por siete criterios: impacto ambiental, huella de carbono, consumo energético, durabilidad, desempeño estructural, utilización de residuos y reciclabilidad, esta metodología asignó ponderaciones y calificaciones cualitativas a cada criterio para obtener un índice que permitiera ordenar las alternativas según su desempeño técnico y ambiental [16], [17], [18], [19], [20]. Para demostrar su aplicación, se compararon cuatro tipologías: concreto convencional con cemento Portland, concreto con adiciones minerales, concreto geopolimérico y concreto activado alcalinamente. Estas tipologías correspondieron a los casos seleccionados para el estudio y no representan una limitación de la metodología, es por esto, que puede adaptarse a otros concretos y materiales de construcción mediante la redefinición de los indicadores, las ponderaciones y los rangos de evaluación según las características del material, la información disponible y el contexto de aplicación.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue proponer y aplicar un marco multicriterio para comparar la sostenibilidad técnica y ambiental de cuatro tipologías de concreto: concreto convencional con cemento Portland, concreto con adiciones minerales, concreto geopolimérico y concreto activado alcalinamente.

2. METODOLOGÍA

La investigación adoptó un diseño documental, descriptivo y aplicado, con un componente cuantitativo basado en análisis multicriterio, pues la revisión documental se empleó como insumo para identificar los criterios, indicadores, rangos de valoración y datos requeridos para construir la metodología. El procedimiento se desarrolló en tres fases: 1) identificación y operacionalización de los criterios de sostenibilidad; 2) selección y caracterización de las tipologías de concreto; y 3) construcción, aplicación y análisis de sensibilidad del índice multicriterio, como se muestra en la Figura 1.

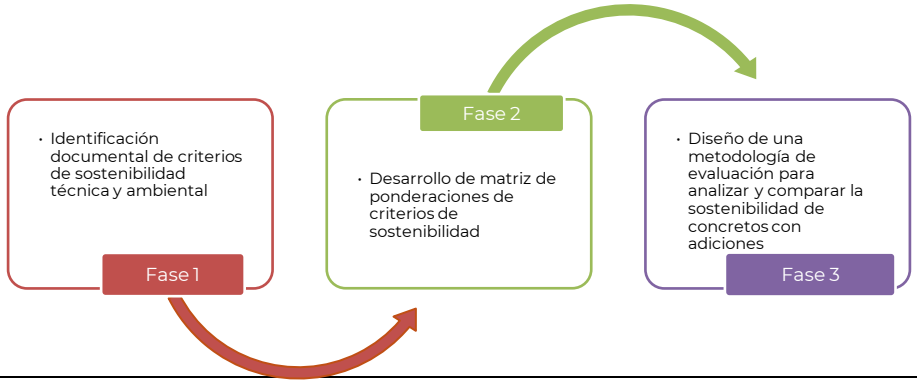


Figura 1. Fases del marco multicriterio y alcance de su salida. Fuente: elaboración propia.

2.1 Identificación de criterios de sostenibilidad para materiales analizados

Esta primera fase sirvió como insumo para definir los criterios técnicos y ambientales, aplicables a un grupo de tipologías de concretos, necesarios para la formulación de la metodología; para lo cual se realizó una revisión documental estructurada de publicaciones científicas, normas técnicas y declaraciones ambientales de producto en bases de datos científicas como Scopus, Science Direct y Google Scholar, además de la base de datos e-collection de Icontec para las normas técnicas. Para la búsqueda se redactó una ecuación general que combinó términos relacionados con las tipologías de concreto y las dimensiones de sostenibilidad:

TITLE-ABS-KEY (("sustainable concrete" OR "low-carbon concrete" OR "geopolymer concrete" OR "alkali-activated concrete" OR "concrete with mineral additions") AND ("environmental impact" OR "carbon footprint" OR "energy consumption" OR durability OR "structural performance" OR "waste utilization" OR recyclability)).

Para garantizar la reproducibilidad de la búsqueda documental, se muestra en la Tabla 1 las bases de datos consultadas y el número de registros obtenidos en cada una.

Tabla 1. Bases de datos consultadas. Fuente: elaboración propia.

Fuente consultada	Resultados iniciales	Documentos seleccionados
Scopus	52	23
Science Direct	70	27
Google Scholar	113	18
e-collection	20	20
Total	215	88

La selección documental comprendió publicaciones científicas editadas entre 2015 y 2025 que abordaron el concreto convencional, el concreto con adiciones minerales, el concreto geopolimérico o el concreto activado alcalinamente. Los documentos proporcionaron datos cuantitativos o criterios verificables relacionados con al menos una de las siete dimensiones de sostenibilidad consideradas, además se identificó la unidad funcional, el método de ensayo o los límites del sistema evaluado.

Durante la depuración se eliminaron los registros duplicados, los estudios sin relación directa con las tipologías analizadas y aquellos que no describieron el procedimiento utilizado para obtener los datos. Asimismo, se excluyeron los documentos cuyos resultados no podían homologarse con las unidades definidas para la comparación y las publicaciones que reprodujeron información procedente de una misma fuente sin aportar datos adicionales.

El análisis documental permitió establecer siete criterios de evaluación: impacto ambiental, huella de carbono, consumo energético, durabilidad, desempeño estructural, utilización de residuos y reciclabilidad [21], [22]. Cada criterio se desglosó mediante una definición, un indicador, una unidad de medida, una dirección de preferencia y una fuente normativa o científica específica [23]. La huella de carbono se delimitó al potencial de calentamiento global, expresado en kilogramos de CO_2 equivalente por unidad funcional.

Para asegurar la comparabilidad, los indicadores ambientales se homogenizaron utilizando como unidad funcional un metro cúbico de concreto. En el caso de las declaraciones ambientales de producto, se compararon únicamente resultados con límites de sistema equivalentes, priorizando las etapas A1–A3, que comprenden el suministro de materias primas, su transporte hasta la planta y la fabricación del producto. En la Tabla 2, se presenta la matriz que define los criterios de evaluación, su unidad de medida y la norma en la que está asociado para su referencia.

Tabla 2. Matriz de criterios de evaluación. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Definición	Unidad de medida	Norma asociada
Impacto ambiental	Emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción	kg CO_2 eq/m^3	ISO 14064 / ASTM E2129
Huella de carbono	Emisiones totales de CO_2 equivalente durante todo el ciclo de vida del material	kg CO_2 eq	ISO 14067
Consumo energético	Energía utilizada en la fabricación por unidad de volumen	MJ/m^3	ISO 21930 / ASTM E2129
Durabilidad	Resistencia del material frente a agentes químicos y ambientales	Años de vida útil estimados	ASTM C666 / ASTM C1202
Desempeño estructural	Capacidad de resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión	MPa	ASTM C39 / ASTM C78
Uso eficiente de recursos	Porcentaje de materiales reciclados o subproductos industriales incorporados	% de contenido reciclado	ISO 14021
Potencial de reciclabilidad	Posibilidad de reutilización o reciclaje del material tras su vida útil	% reciclable	ISO 14024

2.2 Selección operativa de materiales con diferentes tipologías de concreto

En la segunda etapa, se estructuró el esquema operativo seleccionando cuatro tipologías de concreto: Portland convencional, concreto de adiciones minerales, concreto geopolimérico y concreto activado alcalinamente [24], que se seleccionaron por su grado de madurez industrial y disponibilidad de datos experimentales. Para cada tipología se obtuvo una base de datos que compila: propiedades mecánicas (f'c y módulo elástico por ASTM C39 y resistencia a flexión por ASTM C78 [25], [26]), propiedades durabilidad (RCPT y permeabilidad por ASTM C1202, resistencia a ciclos hielo-deshielo por ASTM C666) y parámetros ambientales de las EPDs (por sus siglas en inglés Environmental Product Declarations), verificadas bajo ISO 21930 o estimadas con el formato ASTM E2129 [27]. Los valores se confrontaron con la matriz de criterios para asignar rangos cualitativos (alto-medio-bajo), basado en intervalos establecidos que caracterizan el comportamiento de mezclas cementantes sostenibles en experimentos que median criterios de durabilidad, residuos y sostenibilidad [27], [28], [29], [30]. Este paso fue necesario antes de la etapa de ponderación. En la Tabla 3, se muestra la comparación de cada uno de los tipos de concreto y su calificación respecto a cada uno de los criterios de sostenibilidad.

Tabla 3. Matriz comparativa de criterios de sostenibilidad. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Concreto Portland	Con adiciones minerales	Geopolimérico	Activación alcalina
Impacto ambiental	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Huella de carbono	Alta	Media	Muy baja	Baja
Consumo energético	Alto	Medio	Medio	Medio
Durabilidad	Alto	Alto	Alto	Alto
Desempeño estructural	Media	Alta	Alta	Alta
Uso eficiente de recursos	Bajo	Medio	Alto	Medio-alto
Potencial de reciclabilidad	Bajo	Medio	Alto	Alto

Para el criterio de huella de carbono, se consideró como desempeño ambiental alto (equivalente a una huella baja) un valor inferior a 300 kg CO_2-eq/m^3. Este intervalo representa concretos con bajo contenido de clínker o con una proporción significativa de materiales cementantes suplementarios. En [31] se señala que la reducción del factor clínker y la

incorporación de materiales cementantes suplementarios constituyen estrategias fundamentales para disminuir las emisiones del concreto. Además, como respaldo cuantitativo, se han reportado valores de 141 y 164 kg CO_2 eq/m³ para concretos con escoria granulada y ceniza volante, respectivamente, frente a 357 kg CO_2 eq/m³ para un concreto elaborado exclusivamente con cemento Portland [32].

El intervalo comprendido entre 300 y 600 kg CO_2 eq/m³ se clasificó como desempeño ambiental medio, debido a que incluye concretos convencionales y mezclas con sustituciones parciales cuyo beneficio depende del contenido de cemento, el porcentaje de adición, el transporte y la matriz energética. Finalmente, los valores superiores a 600 kg CO_2 eq/m³ se clasificaron como desempeño ambiental bajo, este límite se sustentó en estudios sobre concretos de ultraalto desempeño, los cuales, pese a sus elevadas propiedades mecánicas y de durabilidad, pueden presentar emisiones entre 680 y 850 kg CO_2 eq/m³ debido a su alto contenido de cemento, materiales finos y fibras [33].

Los criterios para la validación cualitativa de la matriz comparativa de criterios de sostenibilidad se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios para interpretación cualitativa. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Impacto ambiental	Emisiones CO_2 eq/ m³ < 300 kg/ m³	Entre 300 – 600 kg/ m³	> 600 kg/ m³
Huella de carbono	Menor a 1000 kg CO_2 eq/ Ciclo de vida	Entre 1000 – 2000 kg CO_2 eq	> 2000 kg CO_2 eq
Consumo energético	< 2000 MJ/ m³	Entre 2000 – 3500 MJ/ m³	> 3500 MJ/ m³
Desempeño estructural	Resistencia ≥ 35 MPa	Entre 25 y 35 MPa	< 25 MPa (no estructural)
Durabilidad	Vida útil estimada < 30 años o alta permeabilidad	Entre 30 y 60 años	> 60 años, alta resistencia química, baja permeabilidad.
Uso de reciclados	< 10 % de contenido reciclado o subproducto industrial	Entre 10 % – 30 %	> 30 % de reemplazo por residuos o subproductos
Reciclabilidad	Difícilmente reciclable sin tratamiento intensivo	Parcialmente reciclable con procesos intermedios	Alta posibilidad de reciclaje directo o con bajo procesamiento

2.3 Validación de la metodología empleada mediante el enfoque multicriterio de ponderación relativa

La última etapa, consideró el desarrollo y la validación de la metodología a través de un enfoque multicriterio con ponderación relativa [34]. Se hicieron asignaciones porcentuales a cada uno de los criterios [35], tomando como insumos la literatura, recomendaciones de ISO 21929 y la opinión de trabajos publicados en [36], [37]. De acuerdo con estos criterios, en la Tabla 5 se muestran las frecuencias absolutas (n_i) en documentos técnicos y académicos consultados para cálculo porcentual de asignaciones y en la Figura 2 la correspondiente frecuencia relativa (f_i).

Tabla 5. Tabla de frecuencias de los datos consultados. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Frecuencia Absoluta (n_i)	Frecuencia Absoluta Acumulada (N_i)	Frecuencia Relativa ($f_i = n_i/N$)	Frecuencia Relativa Acumulada ($F_i = N_i/N$)
Uso eficiente de recursos	9	9	10 %	10 %
Consumo energético	13	22	15 %	25 %
Impacto ambiental	18	40	20 %	45 %
Desempeño estructural	13	53	15 %	60 %
Durabilidad	13	66	15 %	75 %
Potencial de reciclabilidad	4	70	5 %	80 %
Huella de Carbono	18	88	20 %	100 %

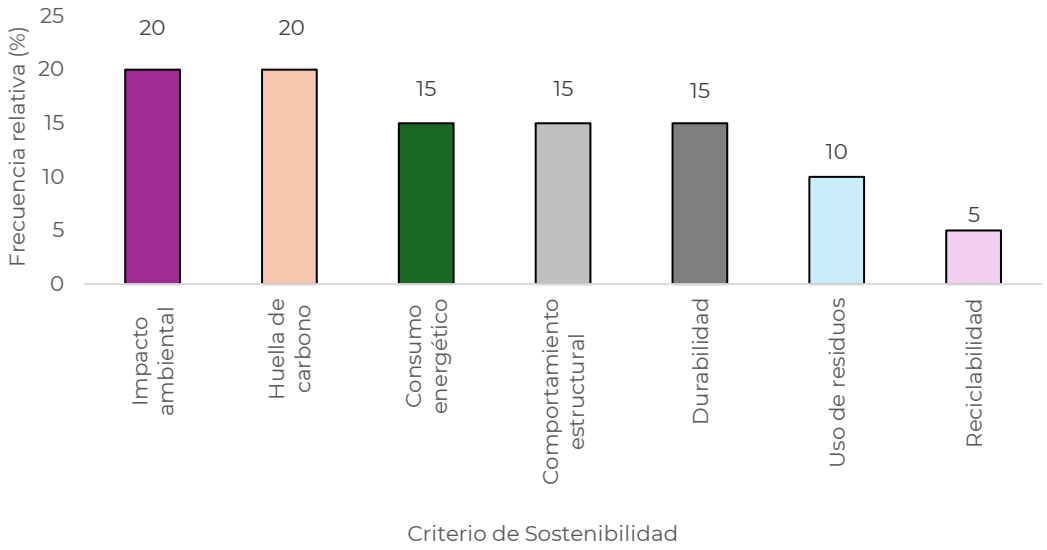


Figura 2. Criterios de sostenibilidad seleccionados y frecuencia relativa asignada Fuente: elaboración propia.

De igual forma, para el caso del índice de sostenibilidad, a cada valor cualitativo, ver Tabla 4, se le asignó un valor numérico (bajo = 1, medio = 2, alto = 3); ese valor se multiplicó por el peso dado al criterio y la suma de productos, lo que da lugar a un índice de sostenibilidad acotado entre 1 (mínimo) y 3 (máximo) para cada material.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología logró validar, para cuatro tipos de concretos, mezclados con diferentes materiales y el concreto tradicional. Los que obtuvieron los valores más altos de sostenibilidad al aplicar la metodología, corresponden al concreto con geopolímeros, con 2.85 de índice de sostenibilidad, seguido del activado alcalinamente, con 2.80. En tercer lugar, se encuentra el que tiene adición de minerales con 2.30. Finalmente, para el concreto tradicional se obtuvo una valoración de 1.45.

La estabilidad del índice se examinó mediante un análisis de sensibilidad de un factor a la vez. El peso de cada criterio se modificó individualmente en ±10 % y, después de cada variación, los siete pesos fueron normalizados para conservar una suma igual a uno. Este procedimiento generó catorce escenarios, correspondientes a dos variaciones para cada uno de los siete criterios, en cada escenario se recalcularon los índices y se verificó si se presentaban modificaciones en la clasificación de las alternativas, ver Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de sensibilidad para verificar la estabilidad del índice de sostenibilidad Fuente: elaboración propia.

Concreto	Variación del índice de sostenibilidad
Concreto cemento Portland	1.426 – 1.473
Concreto cemento con adiciones minerales	2.289 – 2.310
Concreto cemento de Activación alcalina	2.788 – 2.812
Concreto Geopolimérico	2.837 – 2.863

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 7, el orden de las alternativas, de la de mejor índice a la de menor, permaneció estable en los catorce escenarios: concreto geopolimérico, concreto activado alcalinamente, concreto con adiciones minerales y concreto Portland. Estos resultados indican que pequeñas variaciones individuales en los pesos no alteraron la clasificación obtenida dentro de las condiciones analizadas.

Tabla 7. Evaluación de sostenibilidad concreto estándar y con adiciones. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Peso (%)	Portland	Minerales	Geopolimérico	Alcalino
Impacto ambiental	20 %	1 × 0.20 = 0.20	2 × 0.20 = 0.40	3 × 0.20 = 0.60	3 × 0.20 = 0.60
Huella de carbono	20 %	1 × 0.20 = 0.20	2 × 0.20 = 0.40	3 × 0.20 = 0.60	3 × 0.20 = 0.60
Consumo energético	15 %	1 × 0.15 = 0.15	2 × 0.15 = 0.30	2 × 0.15 = 0.30	2 × 0.15 = 0.30
Durabilidad	15 %	3 × 0.15 = 0.45	3 × 0.15 = 0.45	3 × 0.15 = 0.45	3 × 0.15 = 0.45
Desempeño estructural	15 %	2 × 0.15 = 0.30	3 × 0.15 = 0.45	3 × 0.15 = 0.45	3 × 0.15 = 0.45
Uso eficiente de recursos	10 %	1 × 0.10 = 0.10	2 × 0.10 = 0.20	3 × 0.10 = 0.30	2.5 × 0.10 = 0.25
Potencial de reciclabilidad		1 × 0.05 = 0.05	2 × 0.05 = 0.10	3 × 0.05 = 0.15	3 × 0.05 = 0.15

Para convertir las calificaciones cualitativas en valores numéricos, se consideró la dirección de preferencia de cada criterio. El impacto ambiental, la huella de carbono y el consumo energético se definieron como criterios de minimización, debido a que una menor magnitud representa un mejor desempeño sostenible; por esta razón, las calificaciones se asignaron de manera inversa: impacto alto = 1, impacto medio = 2 e impacto bajo = 3. En cambio, la durabilidad, el desempeño estructural, la utilización de residuos y la reciclabilidad se consideraron criterios de maximización, en los que una calificación alta representa un resultado favorable; en estos casos, se aplicó la equivalencia bajo = 1, medio = 2 y alto = 3. Para las categorías intermedias, como medio-alto, se utilizó un valor de 2.5. En la Tabla 7, se presenta, la sumatoria de cada uno de los valores, indicando el puntaje total de sostenibilidad de cada tipo de concreto, ver Tabla 8 y Figura 3.

Tabla 8. Resultado de la evaluación de sostenibilidad. Fuente: elaboración propia.

Material	Índice total (Max, 3.0)
Concreto con cemento Portland	1.45
Concreto con cementante con adiciones minerales	2.30
Concreto Geopolimérico	2.85
Concreto con cemento de Activación alcalina	2.80

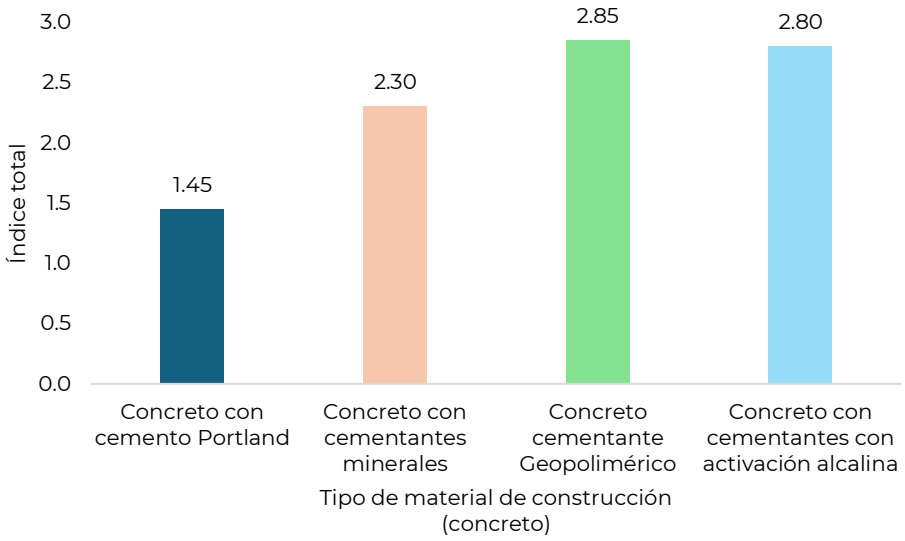


Figura 3. Índice total obtenido por cada material. Fuente: elaboración propia.

El resultado óptimo de los concretos geopolímeros se puede justificar debido a que, en comparación con el tradicional, su coeficiente de huella de carbono es prácticamente un 50 % menor (de hecho, estudios realizados indican que su valor es aproximadamente un 50 % menor que el del Portland, que es el que tiene un pronóstico menos bueno [38]) y, adicionalmente, este tipo de concreto se caracteriza por un alto uso de subproductos de la industria (cenizas volantes y escoria) que, a su vez, aumenta la reciclabilidad y disminuye la energía incorporada. En cuanto a los concretos activados alcalinamente AAC (alkali activated cement) [39], su comportamiento es bastante parecido, si bien su ligera desventaja se debe a que dependen de soluciones alcalinas (NaOH, Na_2SiO_3) cuya producción es aún muy intensiva en uso de energía, así como como en emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, los concretos que usan adiciones minerales incrementan su puntuación respecto al concreto tradicional, gracias a la sustitución parcial del Clinker (de 15 % a 40 %); no obstante, presentan un índice de huella de carbono que es prácticamente un 20 % más elevado que el que reportan los geopolímeros y los que son activados alcalinamente [40]; por último, el tradicional mantuvo la ponderación más baja porque su comportamiento depende de los procesos de calcinación del Clinker que representan un 7 % de las emisiones globales de CO_2 [41], [42].

Los índices obtenidos se ajustan a la tendencia que se describe en evaluaciones de ciclo de vida, en las que se considera a los geopolímeros como un material que, dependiendo de la combinación específica de precursores (ceniza, escoria, etc.), tipo de activador alcalino o curado, se puede situar entre un 45 % y un 60 % por debajo del concreto común respecto de las emisiones de GWP (Global Warming Potential) [43], [44].

Del mismo modo, se destaca que estudios sobre concretos activados con cenizas o escorias reportan incrementos de resistencia y durabilidad del 20 % en comparación al convencional tras 56 días de curado [45], [46]. Estos resultados avalan esos elevados índices alcanzados para criterio de desempeño estructural y durabilidad, aplicados en esta metodología [47], [48].

3.1 Comparación con otras metodologías multicriterio

Los resultados también fueron contrastados con metodologías multicriterio empleadas en ingeniería civil. El modelo MIVES integra indicadores ambientales, económicos y sociales mediante árboles de requerimientos, funciones de valor y ponderaciones obtenidas, frecuentemente, mediante el proceso analítico jerárquico [49]. Otros enfoques combinan el

análisis de ciclo de vida con AHP, TOPSIS o simulaciones de Monte Carlo para jerarquizar alternativas y representar la incertidumbre asociada con los datos y las preferencias de los decisores [50]. Asimismo, se han empleado modelos multicriterio en casos relacionados con torres prefabricadas, revestimientos de túneles y losas de concreto, demostrando su utilidad para comparar configuraciones estructurales bajo criterios ambientales, económicos y sociales [51].

Frente a estos métodos, la metodología propuesta presenta una estructura operativa más sencilla, porque utiliza siete criterios, una escala común de tres niveles y una suma ponderada que puede implementarse en una hoja de cálculo. Esta característica facilita su aplicación durante las etapas iniciales de selección, especialmente cuando la información disponible es heterogénea o procede de literatura, ensayos normalizados y declaraciones ambientales de producto. Además, integra en un mismo índice variables ambientales, estructurales, de durabilidad y circularidad que suelen examinarse de manera independiente.

3.2 Propiedades químicas

Los resultados obtenidos evidencian la posibilidad de incorporar criterios técnicos y ambientales en la selección de concretos, dado que el geopolimérico alcanzó un índice de sostenibilidad de 2,85, seguido del activado alcalinamente con 2,80, el concreto con adiciones minerales con 2,30 y el Portland con 1,45. Esta clasificación coincide con las estrategias de descarbonización promovidas por la Global Cement and Concrete Association, entre ellas, la disminución del contenido de clínker, el uso de materiales cementantes suplementarios, la eficiencia energética y el desarrollo de ligantes alternativos para alcanzar la producción de concreto con emisiones netas cero en 2050 [52].

En este contexto, la metodología puede apoyar la comparación de proveedores, la formulación de especificaciones técnicas y la evaluación de mezclas destinadas a proyectos de edificación e infraestructura; para lograrlo, los productores, diseñadores, constructores e interventores deben proporcionar y verificar información relacionada con resistencia, durabilidad, huella de carbono, consumo energético, utilización de residuos y reciclabilidad. Asimismo, las declaraciones ambientales de producto y los ensayos normalizados pueden constituir fuentes de información para comparar alternativas que cumplan una misma función estructural.

De esta manera, el índice debe aplicarse después de verificar los requisitos establecidos para cada proyecto, debido a que una puntuación alta de sostenibilidad no compensa el incumplimiento de las propiedades mecánicas, las condiciones de exposición o los procedimientos de control de calidad. En Colombia, los concretos destinados a elementos estructurales deben cumplir las disposiciones del Título C de la NSR-10, concreto estructural [53]; por consiguiente, para emplear concretos geopoliméricos o activados alcalinamente se requiere comprobar sus propiedades mediante la caracterización de los materiales, ensayos de resistencia y durabilidad, evaluación de la variabilidad y producción de elementos piloto.

La metodología también puede contribuir a la incorporación de requisitos ambientales verificables en los pliegos de contratación, como límites de huella de carbono por metro cúbico, porcentajes mínimos de utilización de subproductos y trazabilidad de las materias primas. Sin embargo, los índices representan el comportamiento general de las tipologías estudiadas y no el de mezclas comerciales aplicadas en una obra específica, por lo que la selección final debe considerar las condiciones de producción, el transporte, el curado, los costos, la disponibilidad regional y el cumplimiento normativo.

4. CONCLUSIONES

El diseño de la metodología constituye una forma organizada y reproducible para evaluar la sostenibilidad de concretos elaborados con materiales alternativos, debido a que integra

siete criterios técnicos y ambientales mediante ponderaciones y calificaciones que permiten obtener un único índice de comparación. A partir de esta estructura, se facilita la organización de información cuantitativa y cualitativa relacionada con el impacto ambiental, la huella de carbono, el consumo energético, la durabilidad, el desempeño estructural, la utilización de residuos y la reciclabilidad.

La aplicación de la metodología en cuatro tipologías de concreto permitió identificar al concreto geopolimérico como la alternativa con mayor índice de sostenibilidad, con un valor de 2.85, seguido del concreto activado alcalinamente con 2.80 y del concreto con adiciones minerales con 2.30; por su parte, el concreto Portland obtuvo el menor resultado con 1.45. De acuerdo con estos valores, el concreto geopolimérico alcanzó el 95 % del índice máximo y superó al concreto Portland en 1.40 puntos, principalmente por sus mejores calificaciones en los criterios ambientales, la utilización de residuos y la reciclabilidad.

La metodología se distingue por su facilidad operativa y por la posibilidad de integrar información procedente de la literatura, normas técnicas, ensayos y declaraciones ambientales de producto. Su aplicación puede apoyar la comparación preliminar de materiales y proveedores, siempre que las alternativas cumplan previamente los requisitos de resistencia, durabilidad y control de calidad establecidos para el proyecto, por lo que el índice no sustituye la evaluación estructural ni el cumplimiento normativo, sino que incorpora la sostenibilidad como un criterio adicional para la toma de decisiones.

Los resultados presentan limitaciones asociadas con el carácter documental del estudio, la heterogeneidad de las fuentes y la utilización de calificaciones generales para cada tipología de concreto; además, las ponderaciones se establecieron a partir de la frecuencia de los criterios en los documentos analizados y no fueron validadas mediante consulta a expertos. Tampoco se evaluaron mezclas comerciales bajo condiciones equivalentes ni se aplicó la metodología en una obra específica, por lo que los índices obtenidos no representan valores universales. Como proyección para futuros trabajos, se propone validar las ponderaciones mediante métodos como Delphi o AHP, incorporar análisis de sensibilidad y aplicar la metodología a mezclas reales; asimismo, puede extenderse a otros materiales relacionados con la industria de la construcción mediante la definición de nuevos criterios, rangos y ponderaciones acordes con sus características técnicas y ambientales.

5. REFERENCIAS

[1] Z. Yu *et al*., "Assessing and mitigating environmental impacts of construction materials: Insights from environmental product declarations," *J. Build. Eng.*, vol. 98, p. 110929, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110929

[2] C. Li *et al*., "Carbon footprint of the construction sector is projected to double by 2050 globally," *Communications Earth & Environment*, vol. 6, p. 831, Oct. 2025. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02840-x

[3] I. Mosly, "Carbon Footprint of Global Construction Industries: A Cross-Country Analysis of Emissions, Drivers, and the Construction Carbon *Sustainability* Index (1990–2023)," *Sustainability*, vol. 17, no. 20, p. 9274, Oct. 2025. https://doi.org/10.3390/su17209274

[4] M. L. Nehdi *et al*., "Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 191, p. 114169, Mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114169

[5] S. Barbhuiya *et al*., "Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development," *J. Build. Eng.*, vol. 86, p. 108861, Jun. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861

[6] J. A. Olsson *et al*., "Near-term pathways for decarbonizing global concrete production," *Nat. Commun.*, vol. 14, p. 4574, Jul. 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-40302-0

[7] L. Alkhteeb, and M. B. Dawood, "The effect of recycled aggregate on properties of concrete: A review," *Hybrid Adv.*, vol. 11, p. 100535, Dec. 2025. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100535

[8] G. Lizia Thankam, and N. T. Renganathan, "Ideal supplementary cementing material - Metakaolin: A review," *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 58-65, Apr. 2020. https://doi.org/10.1556/1848.2020.00008

[9] M. Abbass *et al.*, "Properties of hybrid geopolymer concrete prepared using rice husk ash, fly ash and GGBS with coconut fiber," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. 6, pp. 4964-4970, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.390

[10] W. K. Bbosa, and E. E. Odongo, "A Review of Sustainable Concrete Construction: Strategies, Advancements, and Future Directions," *Eur. J. Theor. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 343-352, May. 2024. https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(3).28

[11] R. Gallardo Amaya *et al.*, "Effect of ground recycled glass powder as partial cement replacement in mortar mixtures," *SSRN Electr. J.*, Aug. 2026. https://doi.org/10.2139/ssrn.7243743

[12] M. Sanytsky *et al.*, "Sustainable low-carbon binders and concretes," *E3S Web Conf.*, vol. 166, p. 06007, Apr. 2020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606007

[13] I. Pol Segura *et al.*, "A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry," *Heliyon*, vol. 9, no. 5, p. e15718, May. 2023. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15718

[14] R. Kiani Mavi *et al.,* "Sustainability in Construction Projects: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1932, Feb. 2021. https://doi.org/10.3390/su13041932

[15] J. Zhang *et al.*, "Intelligent design of mixture proportions of manufactured sand concrete from environmental, economical and mechanical perspectives," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04637, Jul. 2025. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04637

[16] H. H. Lee *et al.*, "Experimental Study on the Strength and Durability for Slag Cement Mortar with Bentonite," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, p. 1176, Jan. 2021. https://doi.org/10.3390/app11031176

[17] S. T. Akter, and A. Hawas, "Current Insight on Eco-Friendly Concrete: A Review," *Buildings*, vol. 15, no. 5, p. 682, Feb. 2025. https://doi.org/10.3390/buildings15050682

[18] M. Abdellatief *et al.*, "Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e01724, Jul. 2023. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724

[19] A. Esparham *et al.*, "A Study of Modern Eco-Friendly Composite (Geopolymer) Based on Blast Furnace Slag Compared to Conventional Concrete Using the Life Cycle Assessment Approach," *Infrastructures*, vol. 8, no. 3, p. 58, Mar. 2023. https://doi.org/10.3390/infrastructures8030058

[20] D. A. Salas *et al.*, "Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review," *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 114-122, Feb. 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078

[21] G. Hammond, and C. Jones, *Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*, *A BSRIA Guide*, University of Bath, and BSRIA, UK: Univ. Bath-BSRIA, 2011. [Online]. Available: https://www.emccement.com/pdf/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf

[22] R.-U.-D. Nassar *et al.*, "Utilizing carbonated recycled concrete fines to develop sustainable ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 99, p. 111634, Apr. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111634

[23] Z. Wang *et al.*, "Valorization of saline dredged sludge by low-carbon geopolymer production: Salt content impact, mechanisms, and carbon emissions," *Results Eng.*, vol. 27, p. 106906, Sep. 2025. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106906

[24] H. Tanyildizi *et al.*, "Examination of mechanical properties of 3D printed geopolymer mortar using the Taguchi method," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 25, no. 2, p. 66, Jan. 2025. https://doi.org/10.1007/s43452-025-01130-9

[25] M. Aziminezhad *et al.*, "Durability performance of low-carbon concrete incorporating optimized ratio of multiple waste materials (glass powder, biomass fly ash, and shredded rubber)," *Results Eng.*, vol. 27, p. 106392, Sep. 2025. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106392

[26] Y. Zhou *et al.*, "An experimental study on mechanical, shrinkage and creep properties of early-age concrete affected by clay content on coarse aggregate," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e01135, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01135

[27] H. Sousanabadi Farahani *et al.*, "Carbonation reaction of recycled concrete aggregates (RCA): CO_2 mass consumption under various treatment conditions," *Clean. Mater.*, vol. 15, p. 100296, Mar. 2025. https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100296

[28] M. Gao *et al.*, "Integrated computational assessment of concrete properties, durability, and environmental impacts," *Mater. Struct.*, vol. 58, p. 38, Jan. 2025. https://doi.org/10.1617/s11527-024-02562-0

[29] M. Munro *et al.*, "A critical review of embodied carbon classification schemes for concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 21, p. e04021, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04021
[30] C. Li *et al.*, "Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 139, p. 105041, May. 2023. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105041
[31] G. Habert *et al.*, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, pp. 559-573, Nov. 2020. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3
[32] C. Orozco *et al.*, "Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation," *Sustain. Mater. Techno.*, vol. 39, p. e00796, Apr. 2024. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00796
[33] M. Wang *et al.*, "Carbon Emission Optimization of Ultra-High-Performance Concrete Using Machine Learning Methods," *Materials*, vol. 17, no. 7, p. 1670, Apr. 2024. https://doi.org/10.3390/ma17071670
[34] L. Carlsen, and R. Bruggemann, "The 17 United Nations' sustainable development goals: a status by 2020," *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 29, no. 3, pp. 219-229, Jul. 2021. https://doi.org/10.1080/13504509.2021.1948456
[35] M. Han, M. H. Yong Tan, "Optimal robust and tolerance design for computer experiments with mixture proportion inputs," *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 33, no. 8, pp. 2255-2267, Dec. 2017. https://doi.org/10.1002/qre.2188
[36] A. Esparham, and A. B. Moradikhou, "A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Metakaolin," *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, vol. 5, no. 1, pp. 57-65, Mar. 2021. https://doi.org/10.22034/jcema.2021.274959.1053
[37] A. Naqi, and J. G. Jang, "Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw *Materials*: A Review," *Sustainability*, vol. 11, no. 2, p. 537, Jan. 2019. https://doi.org/10.3390/su11020537
[38] N. Lippiatt *et al.*, "Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective," *J. Build. Eng.*, vol. 28, p. 101062, Mar. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101062
[39] M. Nanthini *et al.*, "Studies on Alkaline Activator, Manufacturing Methods and Mechanical Properties of Geopolymer Concrete - A Review," *J. Environ. Nanotechnol.*, vol. 13, no. 3, pp. 52-72, Sep. 2024. https://doi.org/10.13074/jent.2024.09.242753
[40] M. Ghanooni-bagha *et al.*, "Durability of RC Structures against Carbonation-Induced Corrosion under the Impact of Climate Change," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 131-142, Jan. 2020. https://doi.org/10.1007/s12205-020-0793-8
[41] R. M. I. Retno Susilorini *et al.*, "Long-Term Durability of Bio-Polymer Modified Concrete in Tidal Flooding Prone Area: A Challenge of Sustainable Concrete *Materials*," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 15652022, Jan. 2022. https://doi.org/10.3390/su14031565
[42] N. Prasetya *et al.*, "Supplementary Information, A Review on Emerging Organic-containing Microporous Material Membranes for Carbon Capture and Separation," *Chem. Eng. J.,* vol. 391, p. 123575, Jul. 2020. [Online]. Available: https://spiral.imperial.ac.uk/server/api/core/bitstreams/1479db24-e011-4fbb-89d1-492a9b7b49e1/content
[43] Z. Tang *et al.*, "Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 185, p. 107776, Mar. 2020. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107776
[44] R. Abousnina *et al.*, "Effect of Short Fibres in the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Containing Oil-Contaminated Sand," *Polymers*, vol. 13, no. 17, p. 3008, Sep. 2021. https://doi.org/10.3390/polym13173008
[45] S. Al-obaidi *et al.*, "Durability-Based Design of Structures Made with Concrete in Extremely Aggressive Scenarios: Application to a Geothermal Water Basin Case Study," *Infrastructures*, vol. 5, no. 11, p. 1022020, Nov. 2020. https://doi.org/10.3390/infrastructures5110102
[46] M. Teymouri *et al.*, "Mix Design Effects on the Durability of Alkali-Activated Slag Concrete in a Hydrochloric Acid Environment," *Sustainability*, vol. 13, no. 14, p. 8096 Jul. 2021. https://doi.org/10.3390/su13148096
[47] A. Niş, and M. B. Altundal, "Durability performance of alkali-activated concretes exposed to sulfuric acid attack," *Rev. Constr.*, vol. 22, no. 1, pp. 16-35, Apr.2023. https://doi.org/10.7764/RDLC.22.1.16
[48] Hamsashree *et al.*, "Durability of alkali-activated fly ash-slag concrete- state of art," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 9, no. 6, pp. 222, May. 2024. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01530-5

[49] O. Pons *et al.*, "The Use of MIVES as a Sustainability Assessment MCDM Method for Architecture and Civil Engineering Applications," *Sustainability*, vol. 8, no. 5, art. 460, May. 2016. https://doi.org/10.3390/su8050460

[50] A. del Caño *et al.*, "Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 865-873, Dec. 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.020

[51] A. de la Fuente, and D. Fernández-Ordóñez, "A multi-criteria decision-making based approach to assess the sustainability of concrete structures," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 442, p. 012008, Apr. 2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012008

[52] Global Cement and Concrete Association, *Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*. London, U.K.: GCCA, 2021. [Online]. Available: https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf

[53] Presidencia de la República de Colombia, *Decreto 926 de 2010, por el cual se adopta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia, 2010. [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=39255

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés, ya sea financiero, profesional o personal, que pueda influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos o las interpretaciones propuestas.

Financiamiento: El desarrollo de esta investigación fue financiada con recursos propios.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Johan Emiro Garzón Barbosa: Investigación, análisis formal, escritura del artículo, metodología y validación.

Romel Jesús Gallardo Amaya: Supervisión, metodología escritura, revisión y edición.

Pedro Nel Angarita Uscategui: Revisión, análisis y validación de datos, edición.

Los autores declaramos haber contribuido con el desarrollo del manuscrito a través de las diferentes actividades aquí mencionadas; en cuanto a revisión, validación, metodología y validación de datos que fueron posible el desarrollo de este artículo.