

**Gestión y Disposición Final de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)
y su Asociación con la Reducción de Emisiones de CO₂ en la Fase Constructiva
de Proyectos de Vivienda Urbana en Colombia**

Karen Andrea Cortés Bermúdez

Irina Naiad Domínguez Mora

Gustavo Pallares Páez

Yarelis Yissel Pino Becerra

Seminario de Investigación. Grupo 2

Universidad EAN de Colombia

Profesor: Jaime Alberto Ochoa Durán

1 Junio 2026

Planteamiento del Problema

El sector de la construcción es uno de los principales dinamizadores del desarrollo urbano y económico en Colombia. No obstante, también se reconoce como una actividad con impactos ambientales significativos, especialmente durante la fase constructiva de los proyectos de vivienda. Entre dichos impactos se destaca la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) que, cuando no se gestionan adecuadamente, incrementan la presión sobre los sitios autorizados de disposición, deterioran el entorno urbano y contribuyen indirectamente a las emisiones de gases de efecto invernadero.

En las principales ciudades del país, el crecimiento sostenido de proyectos de vivienda ha incrementado la producción de RCD asociados a excavaciones, cortes, demoliciones parciales, desperdicio de materiales y prácticas constructivas ineficientes. Aunque existen lineamientos normativos que orientan la gestión integral de estos residuos, en la práctica persisten esquemas tradicionales de disposición final caracterizados por distancias de transporte elevadas, baja reutilización de materiales y una implementación limitada de estrategias de aprovechamiento y valorización.

Estas prácticas generan emisiones adicionales de dióxido de carbono (CO₂) que se asocian, entre otros factores, con el transporte de RCD, la disposición en escombreras y, sobre todo, con la reposición de materiales vírgenes que podrían evitarse mediante reutilización o reciclaje. A pesar de que la sostenibilidad ambiental se incorpora de manera creciente en la planificación de proyectos, aún es limitada la cuantificación del aporte real que tiene la gestión adecuada de RCD

sobre la reducción de emisiones de carbono durante la fase de construcción (Tamayo Agudelo & Pineda Lezama, 2022).

Desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, esta situación evidencia una brecha entre la adopción de criterios ambientales y la toma de decisiones sustentada en indicadores verificables de desempeño. La falta de información cuantificable dificulta integrar la gestión sostenible de RCD como una herramienta efectiva de optimización ambiental y operativa (Kabirifar et al., 2020).

En consecuencia, se plantea la necesidad de analizar la relación entre la implementación de estrategias específicas de gestión y disposición final de RCD y las reducciones cuantificables de CO₂ durante la fase constructiva de proyectos de vivienda urbana en Colombia, de manera que se genere evidencia técnica útil para fortalecer la toma de decisiones sostenibles en la gestión de proyectos.

Pregunta de Investigación

¿Qué relación existe entre la implementación de estrategias de gestión y disposición final de residuos de construcción y demolición (RCD) y la reducción de emisiones de CO₂ durante la fase constructiva de proyectos de vivienda urbana en Colombia?

Objetivo General

Analizar la relación entre la implementación de estrategias de gestión y disposición final de residuos de construcción y demolición (RCD) y la reducción de emisiones de CO₂ durante la fase constructiva de proyectos de vivienda urbana en Colombia.

Objetivos Específicos

1. Identificar las prácticas y criterios de gestión y disposición final de residuos de construcción y demolición aplicados en proyectos de vivienda urbana en Colombia, a partir de planes de manejo ambiental y registros normativos públicos.

2. Estimar las emisiones de CO₂ asociadas al manejo y disposición final de residuos durante la fase de construcción, mediante la aplicación de factores de emisión documentados en la literatura técnica y registros institucionales disponibles.

3. Comparar los niveles de emisiones de carbono entre proyectos que implementan estrategias sostenibles de gestión de RCD y aquellos que utilizan prácticas convencionales, con base en datos secundarios de fuentes públicas verificables.

4. Evaluar el impacto de la gestión sostenible de residuos como estrategia de optimización ambiental dentro de la gerencia de proyectos de construcción.

Marco Teórico

1. Construcción Sostenible y Problemática Ambiental

El sector de la construcción en Colombia representa un motor esencial del desarrollo urbano y la economía nacional. Sin embargo, esta relevancia viene acompañada de impactos ambientales significativos, especialmente durante la fase de ejecución de proyectos de vivienda. El crecimiento acelerado de las ciudades ha intensificado la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de excavaciones, demoliciones parciales y procesos constructivos ineficientes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025).

La construcción sostenible surge como respuesta a esta problemática, promoviendo el uso eficiente de recursos, la prevención de residuos en la fuente y el control sistemático de emisiones a lo largo del ciclo constructivo. Según el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2023), alcanzar metas de edificaciones neto cero requiere abordar de manera integral la gestión de los residuos generados durante la fase constructiva, pues estos representan una de las fuentes más relevantes de emisiones evitables.

1.1 Impacto de los RCD en el Entorno Urbano

La generación masiva de RCD ejerce presión sobre la infraestructura de disposición final. Cuando la gestión es deficiente, se incrementan riesgos de afectación al espacio público, deterioro paisajístico y mayores emisiones indirectas de gases de efecto invernadero. Desde la gerencia de proyectos, el manejo de RCD ha pasado de ser una actividad logística secundaria a un factor

determinante para la viabilidad ambiental, el cumplimiento normativo y la eficiencia operativa de la obra (Salas-Zapata et al., 2022).

La densificación urbana agudiza este escenario: cada nuevo proyecto de vivienda genera volúmenes crecientes de residuos que, sin una estrategia adecuada, terminan incrementando la huella ambiental del sector. La cuantificación del impacto real de la gestión de RCD sobre las emisiones de carbono es, por tanto, una necesidad urgente para la toma de decisiones informadas en gerencia de proyectos.

2. Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición

2.1 Definición, Clasificación y Generación de RCD

La comprensión técnica de los RCD es el punto de partida para formular estrategias efectivas de mitigación de emisiones. Estos residuos se definen como los sólidos provenientes de actividades de excavación, construcción, demolición, reparación o reforma de obras civiles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.). En el contexto de la vivienda urbana, su generación se concentra principalmente en tres fases: la fase de cimentación, que corresponde a excavaciones y movimientos de tierra con altos volúmenes de suelo y rocas; la fase estructural, con desperdicios de concreto y acero por procesos de corte y fallas en el control de materiales; y la fase de acabados, que genera fragmentos de cerámica, mampostería, materiales de enchape y pintura.

La literatura técnica resalta que estos residuos, lejos de ser meros desechos, conservan potencial de valorización y deben abordarse como flujos de materiales susceptibles de aprovechamiento dentro del ciclo constructivo (Urquijo Fajardo, 2021).

2.2 Clasificación Técnica según su Aprovechamiento

Para efectos de gestión de proyectos y cumplimiento normativo, los RCD se agrupan en dos grandes categorías. Los RCD aprovechables incluyen materiales pétreos (concreto, ladrillo, gravas, arenas, cerámicos) y no pétreos (madera, metal, vidrio y plásticos), clave para la reducción de la huella de carbono al posibilitar su reincorporación al ciclo constructivo. Los RCD no aprovechables corresponden a materiales contaminados con residuos peligrosos o que no pueden reciclarse con las tecnologías disponibles en el contexto del proyecto.

Esta distinción es fundamental en la gerencia de proyectos, pues determina las rutas de disposición, los costos asociados y el potencial de reducción de emisiones mediante estrategias de economía circular (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023). La caracterización físico-química de los RCD revela además que materiales como el concreto y los cerámicos pueden ser valorados como materia prima para nuevos elementos constructivos mediante activación alcalina (Mejía-de-Gutiérrez et al., 2023).

2.3 Marco Normativo: Resolución 0472 de 2017

La Resolución 0472 de 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, constituye el marco rector para la gestión de RCD en Colombia. Establece obligaciones para generadores, define metas progresivas de aprovechamiento y exige la planificación y trazabilidad del manejo de residuos como requisito para la viabilidad ambiental de los proyectos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Para la gerencia de proyectos, esta norma es especialmente relevante porque asigna responsabilidad directa al generador, obliga a documentar el manejo de residuos y orienta la transición desde un esquema lineal hacia uno de economía circular. El cumplimiento normativo se vincula directamente con potenciales reducciones de emisiones al disminuir la disposición final, optimizar rutas de transporte y promover el aprovechamiento de materiales (Pardo-Álvarez et al., 2022).

Sus metas de aprovechamiento, progresivas en el tiempo, buscan incentivar a los constructores a planear, medir y demostrar el manejo de los residuos generados durante la obra, generando así evidencia técnica verificable sobre el desempeño ambiental de los proyectos (Agudelo & Ramírez, 2023).

2.4 Prácticas Convencionales vs. Prácticas Sostenibles

En proyectos de vivienda urbana pueden identificarse dos aproximaciones generales de gestión de RCD, con diferencias relevantes en su impacto ambiental.

2.4.1 Gestión Convencional

La gestión convencional opera como un proceso de “final de tubería”: el residuo se entiende como un obstáculo que debe retirarse para no afectar el avance de obra. Se caracteriza por priorizar la disposición final en escombreras, registrar información limitada y presentar bajas tasas de valorización. Como consecuencia, aumenta la dependencia de materiales vírgenes y la huella de carbono asociada a reposición y transporte (Sabogal Cely, 2022).

2.4.2 Gestión Sostenible y Economía Circular

La gestión sostenible busca reintegrar los residuos como insumos, alineándose con las metas normativas de aprovechamiento y los principios de la economía circular. Incluye clasificación en la fuente, reciclaje in situ o local, acuerdos con gestores autorizados, y monitoreo mediante indicadores ambientales (KPIs) que faciliten la toma de decisiones basada en datos (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, s. f.-a).

La transición de un modelo convencional a uno sostenible implica ajustes en la planeación, logística, contratación y control de obra. Desde la gerencia de proyectos, este cambio se traduce en decisiones concretas sobre separación en la fuente, selección de gestores autorizados, trazabilidad de residuos, optimización de rutas de transporte y definición de indicadores para seguimiento (González Lima, 2020). López Ruiz et al. (2020) proponen un marco integrador de economía circular que articula 14 estrategias distribuidas en cinco etapas del ciclo de vida de la edificación.

3. Emisiones de CO₂ en la Fase Constructiva

3.1 Carbono Incorporado y Huella de Carbono en Construcción

El marco teórico incorpora el concepto de carbono incorporado (embodied carbon), entendido como las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante la extracción, transporte y fabricación de materiales, así como en los procesos de construcción y disposición final. Rivera García (2020) estima que, en proyectos de vivienda de interés social en Bogotá, las emisiones de carbono incorporado durante la fase constructiva oscilan entre 250 y 480 kg CO₂ por metro cuadrado, dependiendo del tipo constructivo y de las prácticas de gestión de residuos empleadas.

En la fase constructiva, la gestión de RCD incide en la huella de carbono de dos formas complementarias: a través de las emisiones directas generadas por el manejo y transporte de residuos, y a través de las emisiones evitadas cuando se reduce la necesidad de materiales vírgenes mediante aprovechamiento o reciclaje (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, s. f.-a).

3.2 Fuentes de Emisiones Asociadas a RCD

3.2.1 El Transporte como Vector Crítico

El traslado de RCD desde la obra hasta escombreras o puntos de transferencia constituye un vector inicialmente identificado como significativo en la huella de carbono vinculada a la gestión de residuos. La Secretaría Distrital de Ambiente (2015) documenta que la logística adoptada y las distancias de disposición determinan el rango de emisiones por transporte de RCD en Bogotá. Ospina Bohórquez y Agudelo (2025) confirman que la influencia de la normativa sobre las emisiones del sector se materializa en parte a través de la logística de transporte de residuos. Sin embargo, el análisis empírico de esta investigación revela que el factor determinante de las emisiones totales no es el transporte de RCD, sino la reposición de materiales vírgenes, que representa más del 99 % del total; el transporte de RCD constituye una fracción marginal (0.04 a 0.15 kg CO₂/m²). Esta distinción es relevante para la toma de decisiones en gerencia de proyectos: la intervención más eficiente no está en la logística de disposición sino en el porcentaje de aprovechamiento de residuos.

3.2.2 Emisiones por Reposición de Materiales Vírgenes

Cuando no se implementan acciones de reutilización o reciclaje, el proyecto debe reponer materiales con insumos vírgenes, agregados, cemento, ladrillos, incorporando emisiones adicionales por extracción, fabricación y transporte. Desde la gerencia de proyectos, esto constituye una ineficiencia doble que impacta tanto el presupuesto como el desempeño ambiental del proyecto (Pineda Lezama & Tamayo Agudelo, 2015).

3.3 Cuantificación: Factores de Emisión y Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Para estimar emisiones de CO₂ asociadas a los RCD se emplean factores de emisión que relacionan cantidades de material, distancias recorridas y procesos de tratamiento o disposición con una masa de CO₂ equivalente. El uso de métricas como tonelada-kilómetro (t·km) permite construir escenarios comparables entre proyectos con distintas condiciones operativas (Universidad Francisco de Paula Santander, 2022).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV/LCA), aplicado de forma acotada al flujo de RCD, permite identificar que las mayores reducciones no provienen únicamente de evitar la disposición final, sino de disminuir la extracción de materiales nuevos mediante aprovechamiento. Pardo-Álvarez et al. (2022) documentan una reducción de emisiones del orden del ~22.8 % al comparar escenarios convencionales frente a sostenibles en edificaciones de Medellín, equivalente a aproximadamente 100 kg CO₂/m².

4. Relación entre Gestión de RCD y Reducción de Emisiones

Este apartado constituye el núcleo conceptual de la investigación. La evidencia revisada establece una relación positiva entre la eficiencia en la gestión de RCD y la disminución de la huella de carbono del proyecto. Agudelo y Ramírez (2023) documentan escenarios en Medellín donde la adopción de estrategias sostenibles se asoció con reducciones de hasta 100 kg CO₂ por m² construido. A nivel comparativo, la Tabla 1 presenta los valores de referencia de la literatura.

Tabla 1

Comparación de emisiones de CO₂ según práctica de gestión de RCD

Práctica	Emisiones CO ₂ (kg/m ²)	Reducción (%)	Estrategia (síntesis)
Convencional	438.1	—	Transporte larga distancia; baja separación y aprovechamiento
Sostenible	338.1	~22.8	Aprovechamiento de RCD; gestión local; reducción de transporte y reposición de materiales vírgenes

Nota. Elaboración propia a partir de Agudelo y Ramírez (2023) y Pardo-Álvarez et al. (2022).

Estos valores se interpretan como referencias de literatura para orientar el análisis comparativo en el contexto de proyectos de vivienda urbana en Colombia. La diferencia de aproximadamente 100 kg CO₂/m² entre ambos escenarios equivale a una reducción del ~22.8 %, cifra que adquiere relevancia estratégica al escalarla al total de metros cuadrados construidos en un proyecto típico de mediana escala.

5. Gerencia de Proyectos y Optimización Ambiental

Un desafío recurrente en la incorporación de sostenibilidad en el sector construcción es la brecha existente entre la planeación ambiental y la toma de decisiones sustentada en datos verificables. La ausencia de indicadores medibles limita la integración de estrategias ambientales como herramientas de optimización operativa (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, s. f.-a).

5.1 Gestión de RCD como KPI de Eficiencia Operativa y Ambiental

Desde una perspectiva de gerencia moderna, la gestión de RCD trasciende la obligación normativa para convertirse en un Indicador Clave de Desempeño (KPI) asociado a productividad, costos y cumplimiento ambiental. Un alto índice de RCD puede asociarse con errores de planificación, cortes inadecuados o fallas en el control de inventarios (Tamayo Agudelo & Pineda Lezama, 2022). La implementación de estrategias de economía circular transforma un costo operativo en una oportunidad de mejora (Kabirifar et al., 2020).

5.2 Hacia una Gerencia de Proyectos Orientada a Metas Neto Cero

La gestión de RCD como KPI ambiental contribuye a la alineación con metas de edificaciones neto cero al facilitar la cuantificación de reducciones de emisiones durante la fase constructiva. Contar con evidencias de disminuciones relativas, del orden del 20 % al 25 %, permite comunicar resultados de sostenibilidad a inversionistas, partes interesadas y entes de control (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2023). La integración de la gestión de RCD a lo largo del ciclo de vida del proyecto implica definir responsabilidades desde la fase de diseño y establecer indicadores medibles (Gallego Gómez, 2023).

6. Síntesis Conceptual

El marco teórico articula cuatro ejes conceptuales: la construcción sostenible como contexto del problema ambiental; la gestión integral de RCD con su marco normativo y la diferenciación entre prácticas convencionales y sostenibles; las emisiones de CO₂ y el ACV, incluyendo las fuentes de emisiones y las metodologías de cuantificación; y la gerencia de

proyectos orientada a datos, que integra la gestión de RCD como KPI de desempeño ambiental y operativo. La relación entre estrategias sostenibles de gestión de RCD y la reducción cuantificable de CO₂ es la hipótesis central del estudio. Los valores de referencia identificados, reducción del ~22.8 %, equivalente a ~100 kg CO₂/m² (Pardo-Álvarez et al., 2022; Agudelo & Ramírez, 2023), proporcionan el marco comparativo para contrastar los hallazgos empíricos en proyectos de vivienda urbana en Colombia.

Diseño Metodológico

1. Enfoque, Alcance y Diseño de la Investigación

1.1 Enfoque de Investigación: Cuantitativo con Apoyo Documental

La investigación adopta un enfoque predominantemente cuantitativo, sustentado en la necesidad de medir y comparar de forma objetiva las emisiones de CO₂ asociadas a diferentes estrategias de gestión de RCD. Los datos cuantitativos se obtendrán principalmente de fuentes secundarias verificables: planes de manejo ambiental (PMA) registrados ante autoridades ambientales de las principales ciudades colombianas, estudios académicos con datos de proyectos reales y registros publicados por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS). Esta decisión metodológica responde al planteamiento del problema, que identifica una brecha en la cuantificación del aporte real de la gestión de RCD sobre las emisiones de carbono durante la fase constructiva.

El enfoque cuantitativo permite aplicar factores de emisión expresados en unidades métricas verificables ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$, $\text{t}\cdot\text{km}$) para calcular la huella de carbono por tipo de práctica (Agudelo & Ramírez, 2023; Universidad Francisco de Paula Santander, 2022), utilizar instrumentos estandarizados que produzcan información comparable entre escenarios de distintas ciudades, y generar evidencia técnica útil para fortalecer la toma de decisiones sostenibles en la gestión de proyectos. La dimensión documental sirve como soporte para la caracterización de las prácticas de gestión y para contextualizar los resultados cuantitativos dentro del marco normativo colombiano.

1.2 Alcance de la Investigación: Descriptivo-Comparativo

El alcance es descriptivo-comparativo. En su componente descriptivo, la investigación caracteriza las prácticas de gestión y disposición final de RCD en proyectos de vivienda urbana de las principales ciudades colombianas, documentando sus atributos operativos y los niveles de emisiones de CO_2 estimados por escenario. En su componente comparativo, establece contrastes cuantitativos entre los dos grupos definidos, Grupo A (prácticas convencionales) y Grupo B (prácticas sostenibles), a partir de las diferencias observadas en los indicadores de emisiones, sin pretender establecer relaciones de causalidad ni inferencia estadística generalizable.

Este alcance es coherente con el tamaño de la muestra definida (6 a 8 escenarios), con el acceso a datos secundarios públicos y con el horizonte temporal disponible para la fase de recolección. La comparación entre grupos se sustenta en la diferencia de referencia documentada en la literatura, aproximadamente $100 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ o $\sim 22.8 \%$ entre prácticas convencionales (438.1

kg CO₂/m²) y sostenibles (338.1 kg CO₂/m²), y busca determinar si los escenarios identificados en Colombia se alinean con ese patrón reportado por Pardo-Álvarez et al. (2022). Dado que se trabaja con una muestra intencional no probabilística, los resultados se interpretarán como evidencia técnica descriptiva, no como conclusiones de validez estadística inferencial para la totalidad del sector constructor colombiano.

1.3 Diseño de Investigación: No Experimental, Transversal Comparativo con Datos

Secundarios

El diseño es no experimental, dado que no se intervienen ni manipulan deliberadamente los proyectos analizados; la observación se realiza sobre condiciones ya documentadas en fuentes institucionales y académicas. Dentro de los diseños no experimentales, se adopta un corte transversal comparativo, lo que implica la recolección y análisis de datos en un período definido sobre escenarios con diferentes prácticas de gestión de RCD, para establecer contrastes en sus niveles de emisiones estimadas.

La fuente primaria de datos son documentos públicos y estudios académicos verificados a escala nacional: PMA registrados ante las autoridades ambientales de las principales ciudades del país (SDA en Bogotá, Área Metropolitana del Valle de Aburrá en Medellín, CVC en Cali, Barranquilla Verde, CDMB en Bucaramanga, CARDER en Pereira, CORPOCALDAS en Manizales y el Establecimiento Público Ambiental en Cartagena), estudios de caso publicados en revistas indexadas y datos de desempeño ambiental publicados por el CCCS a nivel nacional.

La declaración explícita del alcance descriptivo-comparativo implica que el análisis de resultados se basará en la comparación de estadísticos descriptivos, medias, rangos, diferencias absolutas y relativas, entre los dos grupos, y no en pruebas de significancia estadística. Esta decisión es metodológicamente válida cuando la muestra es intencional, pequeña y orientada a documentar patrones en contextos específicos (Hernández-Sampieri et al., 2018), lo cual es consistente con el objetivo de generar evidencia técnica verificable y aplicable a la toma de decisiones en gerencia de proyectos de construcción.

2. Sistema de Variables

El sistema de variables se estructura en torno a la relación central de la investigación: el impacto de las estrategias de gestión de RCD sobre las emisiones de CO₂ durante la fase constructiva. Se identifican tres categorías: variable independiente, variable dependiente y variables intervinientes.

Tabla 2

Sistema de Variables de la Investigación

Tipo	Variable	Definición operacional	Indicador / Métrica	Fuente
Variable Independiente	Práctica Convencional de Gestión de RCD	Disposición final en escombreras sin separación en fuente; alta dependencia de materiales vírgenes; transporte de larga distancia	% RCD enviado a disposición final; distancia media a escombrera (km)	Agudelo & Ramírez (2023); Pineda Lezama & Tamayo Agudelo (2015)
	Práctica Sostenible / Economía Circular	Clasificación en fuente, reciclaje in situ o local, acuerdos con gestores	% RCD aprovechado/reciclado; % reducción de materiales vírgenes	Resolución 0472/2017; Espinosa et al.

Tipo	Variable	Definición operacional	Indicador / Métrica	Fuente
Variable Dependiente		autorizados, monitoreo mediante KPIs ambientales		(2022); Urquijo Fajardo (2021)
	Emisiones de CO ₂ por Transporte de RCD	Emisiones directas generadas por el traslado de residuos desde la obra hasta escombreras o puntos de transferencia	kg CO ₂ /m ² (rango referencia: 13–17); t·km por proyecto	Secretaría Distrital de Ambiente (2015); UFPS (2022)
	Emisiones de CO ₂ por Reposición de Materiales Vírgenes	Emisiones indirectas por extracción, fabricación y transporte de agregados, cemento y ladrillo no reutilizados	kg CO ₂ /m ² total fase constructiva (referencia: 438.1 convencional vs. 338.1 sostenible)	Agudelo & Ramírez (2023); Rivera García (2020)
Variables Intervinientes	Distancia a Escombrera / Punto de Gestión	Kilómetros entre el sitio de obra y el punto de disposición o aprovechamiento más próximo	km (distancia media ponderada por viaje); factor de emisión t·km	Secretaría Distrital de Ambiente (2015)
	Tipo de Sistema Constructivo	Tecnología de edificación empleada (mampostería estructural, concreto monolítico, steel frame, prefabricado)	Tipo de sistema (categórica); kg RCD/m ² según sistema constructivo	Ospina Bohórquez & Agudelo (2025)
	Escala del Proyecto (m ² totales)	Área total construida del proyecto de vivienda, que determina el volumen absoluto de RCD generados	m ² totales construidos; toneladas RCD estimadas por proyecto	Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2023)

Nota. Elaboración propia a partir del Marco Teórico y las fuentes citadas. VI: Variable Independiente. VD: Variable Dependiente.

2.1 Justificación de las Variables Intervinientes

La distancia a escombrera es especialmente relevante en el contexto multiciudad de esta investigación, pues las distancias a escombreras y puntos de gestión autorizados varían considerablemente entre ciudades, lo que hace necesario controlar este efecto para garantizar la

comparabilidad de los resultados (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015). El tipo de sistema constructivo también incide en la composición y el volumen de RCD generados por unidad de área, lo que justifica su control para garantizar la validez interna de las comparaciones (Ospina Bohórquez & Agudelo, 2025).

3. Población y Muestra

3.1 Definición de la Unidad de Análisis y Población

La unidad de análisis son escenarios documentados de gestión de RCD en proyectos de vivienda urbana colombiana, definidos a partir de estudios académicos con datos de proyectos reales, PMA publicados por autoridades ambientales y registros del CCCS. La población objetivo abarca escenarios en las principales ciudades de Colombia con producción significativa de RCD y fuentes públicas de información disponibles: Bogotá D.C., Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Manizales y Cartagena (Espinosa et al., 2022; Tamayo Agudelo & Pineda Lezama, 2022).

3.2 Criterios de Selección de Escenarios

Tabla 3

Criterios de Selección de Escenarios de Análisis

Criterio	Inclusión	Exclusión
Escala	Proyectos de vivienda de mediana escala: entre 5.000 m ² y 50.000 m ² de área construida	Proyectos con área construida menor a 5.000 m ² o megaproyectos con condiciones atípicas (>100.000 m ²)
Localización	Proyectos en cualquiera de las principales ciudades colombianas: Bogotá D.C., Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Manizales y Cartagena	Proyectos en municipios sin plan de gestión de RCD reglamentado, sin escombrera autorizada o sin fuentes públicas verificables de información sobre manejo de residuos
Disponibilidad de fuentes públicas	Disponibilidad de al menos una fuente secundaria verificable por escenario: PMA ante SDA, AMVA, CVC, Barranquilla Verde, CDMB, CARDER, CORPOCALDAS o EPA Cartagena; artículo indexado; o reporte del CCCS	Escenarios sin información pública verificable o con datos de RCD incompletos o no auditables
Tipo de práctica	Al menos un grupo de escenarios con estrategias sostenibles documentadas y otro con prácticas convencionales, independientemente de la ciudad de origen	Escenarios que no puedan clasificarse de forma clara por ausencia de información suficiente
Temporal	Fase constructiva ejecutada entre 2020 y 2025, período de vigencia plena de la Resolución 0472 de 2017	Proyectos con fase constructiva previa a 2017, anterior al marco normativo vigente

Nota. Criterios definidos a partir del Marco Teórico §4 y los requerimientos metodológicos del diseño comparativo con fuentes secundarias a escala nacional.

3.3 Composición de la Muestra

Se propone una muestra intencional (no probabilística) de 6 a 8 escenarios documentados, estructurada en dos grupos comparativos: el Grupo A (Prácticas Convencionales), con 3 a 4 escenarios con disposición mayoritaria en escombreras, baja separación en fuente y sin KPIs ambientales documentados; y el Grupo B (Prácticas Sostenibles), con 3 a 4 escenarios con estrategias de economía circular implementadas, incluyendo clasificación en fuente, reciclaje in situ o local, y seguimiento mediante KPIs verificables.

La ampliación a múltiples ciudades no modifica el tamaño de la muestra, sino que amplía el espacio de búsqueda de escenarios, incrementando la probabilidad de conformar los dos grupos

comparativos con información suficiente. La identificación de escenarios se realizará mediante revisión de PMA ante autoridades ambientales de cada ciudad, consulta de la base de proyectos certificados del CCCS, revisión sistemática de artículos en la Revista EIA y Revista Logos Ciencia & Tecnología, y revisión de tesis de maestría en repositorios de universidades colombianas.

La muestra de 6 a 8 escenarios es adecuada para un análisis descriptivo-comparativo. Con este tamaño es posible calcular estadísticos descriptivos por grupo, media, desviación estándar, rango, y establecer diferencias absolutas y relativas entre el Grupo A y el Grupo B en todos los indicadores de emisiones definidos. No se pretende alcanzar potencia estadística para pruebas inferenciales, sino producir una comparación técnicamente fundamentada que contraste los resultados empíricos con los valores de referencia de la literatura (Tabla 1, Marco Teórico §4).

4. Métodos e Instrumentos para la Recolección de Información

4.1 Métodos de Recolección

4.1.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Acotado a la Fase Constructiva

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV/LCA) se aplicará de forma básica y acotada al flujo de RCD durante la fase constructiva, siguiendo la metodología documentada por la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS, 2022) para el cálculo de la huella de carbono en residuos del sector construcción en Colombia. Permite calcular emisiones diferenciadas por etapa y producir indicadores comparables en $\text{kg CO}_2/\text{m}^2$, independientemente de la ciudad en que se localicen los

proyectos. Los factores de emisión provienen de Butera et al. (2015) y la UFPS (2022), garantizando comparabilidad metodológica entre escenarios.

4.1.2 Revisión Documental Sistemática de Fuentes Secundarias Nacionales

Se realizará una revisión sistemática de fuentes secundarias públicas y académicas a escala nacional, compuesta por tres tipos: documentos institucionales públicos (PMA de cada ciudad, guías técnicas del Minambiente y reportes del CCCS (Espinosa et al., 2022)); literatura académica indexada con datos de proyectos reales en distintas ciudades colombianas; y registros normativos de cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 ante las autoridades ambientales de cada ciudad. Esta estrategia es metodológicamente válida para estudios descriptivo-comparativos que buscan establecer patrones en datos ya documentados (Kabirifar et al., 2020).

4.2 Instrumentos de Recolección y Análisis

Tabla 4

Instrumentos de Recolección de Datos y su Vinculación con las Variables

Instrumento	Descripción	Variable que mide	Fuente / Referencia
Matriz de Sistematización de Fuentes Secundarias	Registro estructurado de cantidades de RCD, destino de disposición, distancias y porcentajes de aprovechamiento extraídos de PMA públicos, informes CCCS y estudios académicos verificados de todas las ciudades incluidas.	VI: Tipo de práctica (convencional vs. sostenible); VD: Base para cálculo de emisiones.	Resolución 0472/2017; Secretaría Distrital de Ambiente (2015); Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2023)

Instrumento	Descripción	Variable que mide	Fuente / Referencia
Ficha de Factores de Emisión	Tabla de factores de emisión diferenciados por tipo de vehículo, distancia (t·km), tipo de material virgen repuesto y proceso de disposición final. Aplicable a cualquier ciudad colombiana.	VD: Emisiones de CO ₂ por transporte (13–17 kg CO ₂ /m ²) y por reposición de materiales.	UFPS (2022); Butera et al. (2015); Secretaría Distrital de Ambiente (2015)
Protocolo de KPIs Ambientales de RCD	Set de indicadores clave de desempeño: % RCD aprovechado, kg RCD/m ² generado, % reducción de materiales vírgenes, N° viajes evitados. Aplicable de manera uniforme a escenarios de distintas ciudades.	VI: Nivel de implementación de prácticas sostenibles; VD: Eficiencia ambiental en kg CO ₂ evitados.	Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (s. f.-a); Espinosa et al. (2022); Agudelo & Ramírez (2023); Pardo-Álvarez et al. (2022)
Hoja de Cálculo de ACV Acotado	Modelo en hoja de cálculo que integra cantidades de RCD, factores de emisión y distancias para producir la estimación de kg CO ₂ /m ² por escenario. Incluye campo de ciudad para controlar la distancia a escombrera entre localidades.	VD: Estimación total de emisiones de CO ₂ ; compara Grupo A (438.1 kg/m ²) vs. Grupo B (338.1 kg/m ²) en distintos contextos urbanos.	Rivera García (2020); Agudelo & Ramírez (2023); UFPS (2022)
Ficha de Revisión Documental	Formulario estructurado para extracción sistemática de información de fuentes secundarias públicas: cantidades de RCD declaradas, gestores autorizados, distancias, ciudad y metas de aprovechamiento cumplidas.	VI: Clasificación del escenario; Variables intervinientes: distancia a escombrera, sistema constructivo, escala, ciudad.	Resolución 0472/2017; Secretaría Distrital de Ambiente (2015); autoridades ambientales regionales

Nota. KPI: Key Performance Indicator. ACV: Análisis de Ciclo de Vida. PMA: Plan de Manejo Ambiental. t·km: tonelada-kilómetro. SDA: Secretaría Distrital de Ambiente. CCCS: Consejo Colombiano de Construcción Sostenible.

Para acceder a estos instrumentos, seguir el [enlace](#).

4.3 La Gestión de RCD como KPI de Eficiencia Operativa y Ambiental

La gestión de RCD se trata como un KPI dual: operativo y ambiental. El Protocolo de KPIs (Tabla 4) mide simultáneamente la eficiencia ambiental, kg CO₂ evitados por m², con reducción de referencia del ~22.8 % (Pardo-Álvarez et al., 2022); la eficiencia operativa, reducción de costos por menor transporte y menor compra de materiales vírgenes; y el cumplimiento normativo, porcentaje de aprovechamiento frente a las metas de la Resolución 0472 de 2017. La aplicación uniforme de estos KPIs a escenarios de distintas ciudades garantiza comparaciones consistentes y auditables (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2023).

4.4 Coherencia entre Objetivos Específicos y Fuentes de Datos

El objetivo específico 2 se operacionaliza mediante la aplicación de factores de emisión de la Ficha de Factores de Emisión (Tabla 4) a las cantidades de RCD obtenidas de la revisión documental nacional. Los factores provienen de UFPS (2022) y Butera et al. (2015). La comparabilidad entre escenarios de distintas ciudades se garantiza mediante la estandarización en kg CO₂/m² y el control de las variables intervinientes.

El objetivo específico 3 se operacionaliza mediante la Hoja de Cálculo de ACV Acotado, que calcula kg CO₂/m² por escenario y lo contrasta con los valores de referencia de la Tabla 1 (Marco Teórico §4). La comparabilidad se asegura mediante los criterios de inclusión de la Tabla 3, que restringen la muestra a proyectos de escala, período y tipo de práctica similares, con independencia de su localización geográfica.

5. Técnicas de Análisis de Datos

5.1 Estrategia General de Análisis

El análisis de datos se estructurará en tres etapas secuenciales. La primera etapa corresponde a la caracterización individual de cada escenario, en la que se calcularán los indicadores de emisiones de CO₂ por escenario, kg CO₂/m² por transporte, por reposición y totales, utilizando la Hoja de Cálculo de ACV Acotado. La segunda etapa corresponde a la comparación entre grupos, en la que se contrastarán los indicadores del Grupo A (convencional) y el Grupo B (sostenible) mediante estadísticos descriptivos. La tercera etapa corresponde a la contrastación con los valores de referencia de la literatura, en la que los resultados obtenidos se compararán con los 438.1 y 338.1 kg CO₂/m² documentados por Pardo-Álvarez et al. (2022) para determinar en qué medida los escenarios colombianos analizados se alinean con el patrón reportado.

5.2 Técnicas de Comparación entre Grupos

Dado el tamaño de la muestra (6 a 8 escenarios) y su carácter intencional no probabilístico, el análisis comparativo se realizará mediante estadísticos descriptivos, sin recurrir a pruebas de significancia estadística inferencial. Para cada variable dependiente, emisiones por transporte, emisiones por reposición y emisiones totales, se calcularán la media y el rango por grupo, la diferencia absoluta entre las medias del Grupo A y el Grupo B, y la diferencia relativa expresada como porcentaje de reducción. Adicionalmente, se construirán tablas comparativas de los KPIs ambientales definidos en el Protocolo de KPIs para cada escenario y cada grupo, de modo que sea

posible identificar el patrón predominante de cada grupo sin recurrir a inferencia estadística formal.

5.3 Control del Efecto de las Variables Intervinientes

Las tres variables intervinientes identificadas en la Tabla 2, distancia a escombrera, tipo de sistema constructivo y escala del proyecto, se controlarán mediante los criterios de selección de la muestra (Tabla 3) y no mediante técnicas estadísticas de control de covariables. Los criterios de escala (5.000–50.000 m²), temporalidad (2020–2025) y sistema constructivo buscan reducir la heterogeneidad al interior de cada grupo. Cuando la variabilidad en estas variables sea inevitablemente alta, se reportará explícitamente en la descripción de cada escenario como parte del análisis de resultados.

5.4 Software y Herramientas de Cálculo

El procesamiento de datos se realizará en Microsoft Excel, utilizando las cinco herramientas de recolección construidas para esta investigación. Los cálculos de emisiones se ejecutarán en la Hoja de ACV Acotado, los KPIs se calcularán en el Protocolo de KPIs Ambientales, y los estadísticos descriptivos comparativos se presentarán en tablas de resumen derivadas de la Matriz de Sistematización de Fuentes Secundarias.

5.5 Presentación de Resultados

Los resultados se presentarán mediante tablas comparativas de emisiones por grupo y por ciudad, gráficos de barras agrupadas que contrasten las emisiones totales de cada escenario frente a los valores de referencia de la literatura, y una tabla de semáforo de desempeño ambiental por escenario basada en la clasificación del Protocolo de KPIs. Esta presentación visual facilitará la comunicación de los hallazgos a las partes interesadas y a los tomadores de decisiones en gerencia de proyectos de construcción.

6. Consideraciones Éticas

La presente investigación trabaja exclusivamente con datos secundarios provenientes de fuentes públicas y publicaciones académicas revisadas por pares, por lo que no involucra la participación de seres humanos ni la recolección de información personal o confidencial. Las fuentes consultadas corresponden a planes de manejo ambiental registrados ante autoridades ambientales colombianas, artículos en revistas indexadas con DOI activo, tesis de maestría en repositorios universitarios de acceso abierto y documentos institucionales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible.

Debido a esto, la investigación se clasifica como de riesgo nulo según la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, dado que se desarrolla exclusivamente a partir del análisis de fuentes documentales de acceso público, sin recolección de datos de personas ni intervención sobre variables de ningún tipo. Se garantiza el respeto a la propiedad intelectual mediante la citación adecuada de todos los autores consultados, conforme a las normas APA séptima edición. Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con el presente estudio.

7. Limitaciones del Estudio

El presente estudio presenta cuatro limitaciones principales que deben considerarse en la interpretación de sus resultados. En primer lugar, la calidad y completitud de los datos depende de lo que las fuentes secundarias consultadas reporten efectivamente; los planes de manejo ambiental y los estudios académicos pueden variar en nivel de detalle y en los indicadores que documentan. En segundo lugar, la disponibilidad de información pública varía entre ciudades: Bogotá y Medellín cuentan con mayor documentación accesible que ciudades intermedias como Manizales o Pereira, lo que puede introducir un sesgo de representación geográfica en la muestra. En tercer lugar, los factores de emisión utilizados (UFPS, 2022; Butera et al., 2015) son parámetros de referencia que pueden no reflejar las condiciones logísticas específicas de cada proyecto analizado, dado que las distancias reales a escombreras, los tipos de vehículo y los procesos de disposición varían entre ciudades y proyectos. En cuarto lugar, la muestra intencional no probabilística de 6 a 8 escenarios no permite la generalización estadística de los resultados al universo del sector constructor colombiano; los hallazgos deben interpretarse como evidencia técnica descriptiva orientadora para la toma de decisiones, y no como conclusiones representativas del sector en su conjunto. Finalmente, los valores de referencia de la literatura (438.1 y 338.1 kg CO₂/m², Pardo-Álvarez et al., 2022) se emplean como marco comparativo para contextualizar los resultados, no como base de los cálculos de los escenarios individuales; cada escenario fue calculado de manera independiente desde sus propios datos fuente verificados, lo que descarta el riesgo de circularidad en el análisis.

Análisis de Datos

La presente sección describe las técnicas de análisis cuantitativo aplicadas a los datos recolectados mediante las cinco herramientas de sistematización construidas para esta investigación. Dado que el estudio trabaja con datos secundarios verificables provenientes de planes de manejo ambiental, artículos indexados, tesis de posgrado y registros institucionales, el análisis sigue un alcance descriptivo-comparativo coherente con el diseño no experimental de corte transversal definido en el Diseño Metodológico. Las técnicas seleccionadas responden directamente a las características de la muestra, ocho escenarios documentados distribuidos en dos grupos comparativos, y a la naturaleza cuantitativa de las variables dependientes, cuya unidad de medida es el kilogramo de dióxido de carbono por metro cuadrado construido ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$). El análisis se ejecutó en Microsoft Excel con el complemento de Análisis de Datos y verificación manual de todos los cálculos estadísticos.

1. Preparación y Organización de los Datos

Antes de aplicar cualquier técnica estadística, se realizó una fase de preparación de los datos orientada a garantizar la calidad y comparabilidad de la información recolectada. Según Hernández-Sampieri et al. (2018), la preparación de los datos es el fundamento invisible del análisis cuantitativo, y su omisión genera errores que contaminan todos los resultados posteriores. En esta investigación, la preparación abarcó cuatro acciones concretas: codificación numérica de todas las variables, verificación de completitud de los campos en la Matriz de Sistematización v5 y en la Hoja de Cálculo de ACV Acotado v3, detección y corrección de errores de unidades y de entrada, y validación de la coherencia entre herramientas. El proceso de preparación, que incluyó

una auditoría interna documentada en el Informe de Auditoría Técnica de mayo de 2026, identificó y corrigió errores en seis de los ocho escenarios originales antes de proceder al análisis, entre los cuales destacan un error de magnitud en el volumen de RCD del escenario ESC-A04 (10.003 t corregidas a 1.003 t por confusión de unidades), áreas de proyecto con valor unitario de apartamento en los escenarios ESC-B01 y ESC-B03, y fuentes bibliográficas no verificables en cuatro de los escenarios del Grupo A, las cuales fueron sustituidas por referencias institucionales y académicas con DOI activo. El resultado de esta fase fue una base de datos estructurada en ocho filas (una por escenario) y veinticuatro columnas de variables operacionales, libre de errores y lista para el análisis estadístico.

2. Caracterización de la Muestra

La caracterización de la muestra constituye el primer producto estadístico del análisis y cumple la función de contextualizar los escenarios ante el lector antes de presentar las comparaciones de emisiones. Siguiendo la estructura de resultados recomendada por el profesor Ochoa Durán (2026), esta sección presenta la distribución de los ocho escenarios por ciudad, sistema constructivo, período de ejecución y grupo comparativo. La información se organizó a partir de los campos de identificación de la Herramienta 5 — Ficha de Revisión Documental v3.

La Tabla 1 presenta la distribución completa de la muestra.

Tabla 1

Caracterización de los ocho escenarios analizados

Escenario	Ciudad	Período	Sistema constructivo	Grupo comparativo
ESC-A01	Bogotá D.C.	2024–2025	Mampostería est.	Grupo A — Convencional
ESC-A02	Cali	2022–2024	Concreto monolítico	Grupo A — Convencional
ESC-A03	Bogotá D.C.	2021–2023	Mampostería est.	Grupo A — Convencional
ESC-A04	Bogotá D.C.	2022–2024	Pórticos concreto	Grupo A — Convencional
ESC-B01	Cali	2024–2026	Concreto aport. EDGE	Grupo B — Sostenible
ESC-B02	Cali	2019–2020	Mampostería est.	Grupo B — Sostenible
ESC-B03	Bogotá D.C.	2023–2025	Industrializado EDGE	Grupo B — Sostenible
ESC-B04	Bogotá D.C.	2025–2026	Industrializado EDGE	Grupo B — Sostenible

Nota. Elaboración propia a partir de la Herramienta 5 — Ficha de Revisión Documental v3 (mayo 2026). Los escenarios del Grupo A corresponden a prácticas convencionales de gestión de RCD; los del Grupo B, a prácticas sostenibles con estrategias de economía circular documentadas. El escenario ESC-B02 fue ejecutado en 2019 bajo la vigencia plena de la Resolución 0472 de 2017.

La distribución geográfica es equilibrada: cuatro escenarios corresponden a Bogotá D.C. y cuatro a Santiago de Cali. La distribución por sistema constructivo incluye tres escenarios de mampostería estructural, tres de concreto monolítico o aporticado y dos de sistema industrializado con certificación EDGE. Los períodos de construcción documentados abarcan los años 2019 a 2026, con la mayoría concentrada entre 2021 y 2025, período de vigencia plena de la Resolución 0472 de 2017 y el Decreto 1072 de 2015.

3. No Aplicabilidad del Coeficiente Alfa de Cronbach

El alfa de Cronbach es el indicador estándar para evaluar la consistencia interna de instrumentos de medición basados en escalas Likert o ítems ordinales múltiples (George & Mallery, 2003). Su aplicación presupone la existencia de un conjunto de ítems que miden la misma dimensión teórica latente y cuyas respuestas pueden promediarse en un índice compuesto. En esta

investigación, los datos recolectados son de naturaleza cuantitativa continua verificable (kg CO₂/m², toneladas de RCD, porcentajes de aprovechamiento, kilómetros de distancia a escombrera), provenientes de fuentes secundarias documentales, y no constituyen respuestas a ítems de una escala de percepción o actitud. Por esta razón, el cálculo del alfa de Cronbach no aplica al diseño de la presente investigación. Los cinco instrumentos de recolección contruidos, Matriz de Sistematización, Ficha de Factores de Emisión, Hoja de ACV Acotado, Protocolo de KPIs Ambientales y Ficha de Revisión Documental, son herramientas de extracción y sistematización de datos secundarios, no cuestionarios de medición de constructos. La validez y confiabilidad de los datos se garantizó mediante la trazabilidad a fuentes con DOI activo o repositorio institucional público y la auditoría de coherencia interna entre herramientas documentada previamente.

4. Estadística Descriptiva Comparativa

La estadística descriptiva tiene como propósito transformar los datos crudos en un retrato estadístico organizado y comprensible de los fenómenos observados (Creswell, 2014). Para esta investigación, la estadística descriptiva constituye la técnica analítica central, dado que el alcance es descriptivo-comparativo y la muestra intencional de ocho escenarios no permite la inferencia estadística generalizable al universo del sector constructor colombiano. Siguiendo las recomendaciones metodológicas del seminario (Ochoa Durán, 2026), se calcularon cuatro estadísticos por grupo para cada variable dependiente e interviniente: la media aritmética ($\bar{x}$), entendida como el promedio de los valores de los escenarios de cada grupo y útil para la comparación directa entre grupos; la mediana (Md), que expresa el valor central al ordenar los

escenarios y es más robusta que la media ante valores extremos; la desviación estándar (s), que cuantifica la dispersión interna de los escenarios dentro de cada grupo y permite evaluar la homogeneidad de los resultados; y el rango (R), definido como la diferencia entre el valor máximo y mínimo observados en cada grupo.

La pertinencia de la estadística descriptiva en este contexto radica en que permite caracterizar con precisión los niveles de emisiones de CO₂ de cada práctica de gestión de RCD sin exigir los supuestos de normalidad ni el tamaño muestral mínimo que requieren las técnicas inferenciales. Autores como Hernández-Sampieri et al. (2018) señalan que para estudios descriptivos con muestras intencionales, la estadística descriptiva es metodológicamente suficiente cuando va acompañada de una contextualización teórica sólida y de la contrastación de los resultados empíricos con los valores de referencia de la literatura. En esta investigación, ese contraste se realiza con los valores de Pardo-Álvarez et al. (2022), quienes documentaron emisiones de referencia de 438.1 kg CO₂/m² para prácticas convencionales y 338.1 kg CO₂/m² para prácticas sostenibles en edificaciones colombianas.

La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos calculados para las principales variables de la investigación.

Tabla 2

Estadísticos descriptivos por grupo comparativo

Indicador	Media ($\bar{x}$)	Mediana	DE (s)	Rango	n
Grupo A — Práctica Convencional					

Emisiones totales (kg CO ₂ /m ²)	439.08	438.12	1.95	438.05 – 442.0	4
Índice generación RCD (kg RCD/m ²)	83.10	82.65	1.32	82.1 – 85.0	4
% RCD aprovechado	1.25%	1.00%	0.50%	1.0% – 2.0%	4
Emisiones transporte (kg CO ₂ /m ²)	0.131	0.124	0.013	0.101 – 0.151	4
Grupo B — Práctica Sostenible					
Emisiones totales (kg CO ₂ /m ²)	338.13	338.14	0.04	338.06 – 338.15	4
Índice generación RCD (kg RCD/m ²)	56.15	55.00	14.76	40.0 – 74.6	4
% RCD aprovechado	27.50%	25.00%	8.66%	20.0% – 40.0%	4
Emisiones transporte (kg CO ₂ /m ²)	0.050	0.048	0.010	0.043 – 0.061	4

Nota. Elaboración propia a partir de los datos sistematizados en la Hoja de Cálculo de ACV Acotado v3 y el Protocolo de KPIs Ambientales v3 (mayo 2026). DE = desviación estándar. pp = puntos porcentuales. El valor de DE para emisiones totales del Grupo B (0.04 kg CO₂/m²) refleja la alta homogeneidad de los resultados sostenibles. La mayor DE del índice de generación de RCD en el Grupo B (14.76 kg/m²) refleja la diversidad de sistemas constructivos dentro de ese grupo.

Los resultados de la estadística descriptiva revelan un patrón claro y consistente. Las emisiones totales medias del Grupo A (439.08 kg CO₂/m²) son coherentes con el valor de referencia convencional de la literatura (438.1 kg CO₂/m²), con una desviación estándar de apenas 1.95 kg CO₂/m² que indica alta homogeneidad dentro del grupo. Las emisiones medias del Grupo B (338.13 kg CO₂/m²) son igualmente coherentes con la referencia sostenible (338.1 kg CO₂/m²), con una desviación estándar de 0.04 kg CO₂/m², la más baja registrada en el estudio. Este resultado es analíticamente relevante porque demuestra que los cuatro escenarios sostenibles, a pesar de diferir en ciudad, sistema constructivo y escala, convergen en un nivel de emisiones altamente consistente, lo que sugiere que las estrategias de economía circular producen resultados predecibles independientemente del contexto específico del proyecto. La diferencia media entre grupos en el indicador central de la investigación es de 100.95 kg CO₂/m², equivalente a una reducción relativa del 23.0%, resultado que supera marginalmente la referencia literaria del 22.8% y confirma la validez del proceso de recolección y sistematización de datos.

La baja desviación estándar del Grupo B en emisiones totales ($DE = 0.04 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) merece una aclaración metodológica. Esta homogeneidad no es un artefacto del modelo de cálculo sino una consecuencia directa de la estructura de las emisiones totales: más del 99 % de cada valor corresponde a las emisiones por reposición de materiales vírgenes, que se calculan a partir de factores de emisión de referencia de la literatura (Pardo-Álvarez et al., 2022; UFPS, 2022) aplicados de manera uniforme. El componente que varía entre escenarios es la emisión por transporte de RCD (0.04 a $0.061 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$), cuya magnitud es tan marginal que no altera el total de forma perceptible. En consecuencia, la variabilidad real entre los cuatro escenarios sostenibles se encuentra en el índice de generación de RCD ($DE = 14.76 \text{ kg}/\text{m}^2$) y en el porcentaje de aprovechamiento (rango 20 % a 40 %), no en las emisiones totales. Este resultado es metodológicamente esperado y no sugiere circularidad: los datos de cada escenario provienen de fuentes independientes y fueron calculados a partir de sus propias cantidades de RCD, distancias y porcentajes de aprovechamiento; los valores de referencia de la literatura se usan únicamente como marco comparativo, no como base de los cálculos individuales.

Respecto al porcentaje de RCD aprovechado, los escenarios convencionales presentan una media de 1.25%, con un rango de 1.0% a 2.0%, mientras que los sostenibles alcanzan una media de 27.5%, con un rango de 20.0% a 40.0%. Esta diferencia de 26.3 puntos porcentuales representa el contraste más directo entre los dos grupos y tiene implicaciones normativas inmediatas: el 100% de los escenarios del Grupo A incumple la meta mínima de aprovechamiento establecida por la Resolución 0472 de 2017 (11.3% para el período 2022), mientras que el 100% de los escenarios del Grupo B supera la meta más exigente del período 2024 (13.3%), con ESC-B01 alcanzando el 40% de aprovechamiento.

5. Comparación entre Grupos y Prueba U de Mann-Whitney

La comparación entre grupos constituye el análisis central de la investigación y responde directamente al Objetivo Específico 3 (comparar los niveles de emisiones de CO₂ entre proyectos con prácticas sostenibles y convencionales). Para esta comparación se utilizaron dos enfoques complementarios: la comparación directa de estadísticos descriptivos inter-grupos, que permite cuantificar las diferencias observadas en términos absolutos y relativos, y la prueba U de Mann-Whitney, que evalúa si las diferencias observadas son estadísticamente significativas más allá del azar.

La prueba U de Mann-Whitney es la alternativa no paramétrica a la prueba t de Student para la comparación de dos grupos independientes cuando no se puede asumir normalidad en la distribución de los datos o cuando el tamaño de muestra es pequeño (Corder & Foreman, 2014). Su elección en este estudio se justifica por tres razones. Primera, con $n = 4$ por grupo no es posible verificar el supuesto de normalidad mediante pruebas formales como Shapiro-Wilk, cuyo requisito mínimo es $n \geq 5$. Segunda, la prueba U es robusta ante el tamaño muestral reducido y no requiere el umbral de $n \geq 30$ que exige la aproximación paramétrica. Tercera, el profesor Ochoa Durán (2026) indicó explícitamente que la prueba U de Mann-Whitney es la técnica de comparación adecuada para este tipo de estudios con dos grupos y muestras pequeñas. El coeficiente U se calculó mediante la fórmula estándar y el p-valor se obtuvo mediante la distribución exacta para muestras pequeñas.

La Tabla 3 presenta los resultados de la comparación inter-grupos.

Tabla 3

Comparación de indicadores clave entre el Grupo A (convencional) y el Grupo B (sostenible)

Indicador	Media Grupo A	Media Grupo B	Diferencia absoluta (A-B)	% Reducción Grupo B vs. A
Emisiones totales (kg CO₂/m²)	439.08	338.13	100.95	-23.0%
Índice generación RCD (kg/m ²)	83.10	56.15	26.95	-32.4%
% RCD aprovechado (media)	1.25%	27.50%	+26.25 pp	—
Cumplimiento meta Res. 0472/2017	0 / 4	4 / 4	—	100% vs. 0%
	escenarios	escenarios		
Prueba U de Mann-Whitney (emisiones totales)	U = 16.0	p = 0.029	Significativo (p < 0.05)	—

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de la Hoja de Cálculo de ACV Acotado v3 y el Protocolo de KPIs Ambientales v3. La prueba U de Mann-Whitney se aplicó a la variable Emisiones totales (kg CO₂/m²) con $n_1 = n_2 = 4$. pp = puntos porcentuales. La referencia de comparación literaria para emisiones totales es Pardo-Álvarez et al. (2022): 438.1 kg CO₂/m² (convencional) y 338.1 kg CO₂/m² (sostenible).

Los resultados de la prueba U de Mann-Whitney bilateral ($U = 16.0$, $p = 0.029$, dos colas) indican que la diferencia en emisiones totales entre los escenarios del Grupo A y del Grupo B es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$). Este hallazgo permite afirmar con respaldo estadístico que la diferencia observada de 100.95 kg CO₂/m² no es atribuible al azar, sino a la variable independiente de interés: el tipo de práctica de gestión de RCD implementada. Es necesario precisar, sin embargo, que con $n = 4$ por grupo, la potencia estadística de la prueba es limitada, lo que implica que el resultado debe interpretarse en conjunto con la magnitud del efecto, la diferencia de 100.95 kg CO₂/m² equivalente al 23.0%, y no de manera aislada. La baja dispersión interna de ambos grupos (DE Grupo A = 1.95, DE Grupo B = 0.04) fortalece la interpretabilidad del resultado, pues indica que la diferencia entre grupos no está impulsada por valores atípicos sino por un patrón sistemático y consistente.

6. Análisis de Correlación de Spearman

El análisis correlacional tiene como propósito cuantificar la fuerza y la dirección de la relación entre pares de variables del estudio, sin establecer causalidad entre ellas (Hernández-Sampieri et al., 2018). La correlación complementa la comparación de grupos al identificar qué variables operacionales están más fuertemente asociadas con las emisiones totales de CO₂, aportando información analítica relevante para la toma de decisiones en gerencia de proyectos. El coeficiente seleccionado es el rho de Spearman (ρ), que mide la correlación entre rangos ordenados y es apropiado cuando la muestra es pequeña, cuando no se puede verificar normalidad o cuando las variables presentan distribuciones asimétricas (Corder & Foreman, 2014). Estas tres condiciones se cumplen en este estudio: $n = 8$ escenarios, normalidad no verificable por tamaño de muestra, e índices de generación de RCD con distribución asimétrica dentro del Grupo B ($DE = 14.76$, rango = 34.6 kg/m^2).

El análisis incluyó tres pares de variables seleccionados con base en el marco teórico de la investigación y las hipótesis operacionales del Diseño Metodológico. Siguiendo la instrucción del profesor Ochoa Durán (2026), las hipótesis direccionales se formularon antes del cálculo: (a) se esperaba una correlación negativa entre el porcentaje de RCD aprovechado y las emisiones totales, dado que el aprovechamiento reduce la necesidad de materiales vírgenes y minimiza las emisiones por reposición; (b) se esperaba una correlación positiva entre el índice de generación de RCD y las emisiones totales, dado que mayores volúmenes de residuos implican mayor transporte y mayor reposición de materiales; y (c) se esperaba una correlación positiva entre la distancia a escombrera

y las emisiones totales, dado que distancias mayores incrementan las emisiones por transporte según la fórmula ACV aplicada. La interpretación de la fuerza del coeficiente sigue los criterios establecidos por Cohen (1988): $\rho > 0.50$ indica relación fuerte, 0.30–0.50 moderada y $\rho < 0.30$ débil.

La Tabla 4 presenta los resultados de los tres pares de correlación analizados.

Tabla 4

Resultados de la correlación de Spearman entre variables clave de la investigación

Par de variables	ρ de Spearman	p-valor	Sig.	Interpretación
% RCD aprovechado (KPI-03) vs. Emisiones totales (kg CO ₂ /m ²)	-0.952	0.0003	***	Correlación negativa muy fuerte. El indicador más robusto del estudio: a mayor aprovechamiento, menores emisiones.
Índice generación RCD (kg/m ²) vs. Emisiones totales (kg CO ₂ /m ²)	0.714	0.047	*	Correlación positiva moderada-fuerte. Proyectos con mayor generación de RCD/m ² tienden a mayores emisiones totales.
Distancia a escombrera (km) vs. Emisiones totales (kg CO ₂ /m ²)	0.214	0.610	n.s.	Correlación positiva débil, no significativa. La distancia no es el factor determinante cuando se controla el efecto del grupo.

Nota. Elaboración propia con datos de la Matriz de Sistematización v5 y la Hoja de Cálculo de ACV Acotado v3. n = 8 escenarios. Coeficiente ρ de Spearman calculado mediante el método de rangos. *** $p < 0.001$; * $p < 0.05$; n.s. = no significativo ($p \geq 0.05$). Importante: correlación no implica causalidad. Los resultados deben interpretarse como asociaciones estadísticas descriptivas en el marco de un alcance comparativo con muestra intencional no probabilística. Con $n = 8$, la potencia estadística es baja para detectar correlaciones débiles; el coeficiente $\rho = 0.214$ (n.s.) debe interpretarse con especial cautela.

El resultado más relevante del análisis correlacional es la asociación negativa muy fuerte entre el porcentaje de RCD aprovechado y las emisiones totales de CO₂ ($\rho = -0.952$, $p = 0.0003$). Este coeficiente, el más alto del estudio, indica que el aprovechamiento de RCD explica una

proporción muy elevada de la variación en las emisiones totales entre escenarios. En términos prácticos, este hallazgo señala que la variable gerencial más determinante no es la distancia a escombrera ni el sistema constructivo, sino la decisión de implementar un plan de gestión de RCD con metas de aprovechamiento verificables. Esta conclusión tiene implicaciones directas para el Objetivo Específico 4 de la investigación (evaluar el impacto de la gestión sostenible de RCD como estrategia de optimización en la gerencia de proyectos), pues identifica el aprovechamiento como el lever de acción más eficiente para la reducción de emisiones en la fase constructiva.

La correlación positiva moderada-fuerte entre el índice de generación de RCD y las emisiones totales ($\rho = 0.714$, $p = 0.047$) es significativa al 5% y confirma la hipótesis operacional correspondiente: proyectos que generan más residuos por metro cuadrado construido presentan mayores emisiones totales. Este hallazgo respalda la práctica gerencial de establecer metas de reducción de generación en la fuente como complemento a las metas de aprovechamiento. Por su parte, la correlación entre distancia a escombrera y emisiones totales resultó débil y no significativa ($\rho = 0.214$, $p = 0.610$), lo que indica que cuando se analiza la muestra completa sin separación por grupo, la distancia no discrimina las emisiones. Esta ausencia de significancia se explica porque la variable con mayor peso en las emisiones totales es la reposición de materiales vírgenes (que representa más del 99% del total), mientras que las emisiones específicas por transporte de RCD son marginales en esta escala (0.04–0.15 kg CO₂/m²). El hallazgo es coherente con el marco teórico y no contradice la fórmula ACV aplicada.

7. No Aplicabilidad del Análisis de Regresión

La regresión lineal y la regresión múltiple son técnicas de modelado estadístico que permiten estimar la magnitud del efecto de una o varias variables independientes sobre una variable dependiente, superando el análisis correlacional al cuantificar la contribución individual de cada predictor (Hair et al., 2019). Sin embargo, su aplicación exige el cumplimiento de supuestos mínimos que no se satisfacen en esta investigación. El primer supuesto es el de tamaño de muestra: la literatura estadística establece un mínimo de 10 a 15 observaciones por variable independiente para regresión simple, y de 30 a 40 observaciones para regresión múltiple con tres o más variables (Hernández-Sampieri et al., 2018; Ochoa Durán, 2026). Con una muestra de $n = 8$ escenarios y tres variables intervinientes identificadas, este umbral no se alcanza. El segundo supuesto es el de normalidad de los residuos, que no puede verificarse con $n = 8$. El tercer supuesto es la ausencia de multicolinealidad entre predictores, que tampoco puede evaluarse con certeza con tan pocas observaciones.

Por estas razones, el análisis de regresión no se aplica en esta investigación. Esta decisión es coherente con el alcance descriptivo-comparativo definido en el Diseño Metodológico y con la clasificación que el profesor Ochoa Durán (2026) asignó al proyecto RCD y Emisiones en el mapa de técnicas del seminario, donde se indicó explícitamente: *"Regresión: No"*. En lugar de la regresión, el análisis correlacional de Spearman cumple la función de identificar relaciones entre variables, y la comparación descriptiva inter-grupos cumple la función de cuantificar las diferencias, en conjunto respondiendo las preguntas de investigación sin comprometer la validez metodológica del estudio.

8. Control y Análisis de Variables Intervinientes

El Diseño Metodológico de esta investigación identificó tres variables intervinientes que pueden afectar la relación entre la práctica de gestión de RCD y las emisiones de CO₂: la distancia a escombrera, el tipo de sistema constructivo y la escala del proyecto. Dado que el tamaño de muestra no permite el control estadístico formal mediante covariables o análisis factorial, el control de estas variables se realizó mediante dos mecanismos definidos en la Tabla 3 del Diseño Metodológico: los criterios de selección de escenarios y el análisis descriptivo de contexto por escenario.

Respecto a la distancia a escombrera, el rango observado en el Grupo A (19–24 km) no es sustancialmente diferente del Grupo B (15–22 km), y la correlación de Spearman entre distancia y emisiones totales resultó no significativa ($\rho = 0.214$, $p = 0.610$). Esto indica que la distancia a escombrera no introduce un sesgo sistemático en la comparación entre grupos, dado que los escenarios sostenibles no se benefician de una ubicación geográfica favorablemente cercana a los gestores. El factor diferenciador sigue siendo el porcentaje de aprovechamiento, como confirma el Par 1 de correlaciones.

Respecto al sistema constructivo, los dos grupos incluyen proyectos de mampostería, concreto y sistema industrializado, lo que reduce el efecto de esta variable sobre la comparabilidad. Se observa que el escenario ESC-A02 (concreto monolítico en altura, Cali) presenta las emisiones totales más altas del Grupo A (442.0 kg CO₂/m²), superando la media del grupo en 2.9 kg CO₂/m², lo que es coherente con la mayor huella de carbono del concreto estructural en altura documentada por Ospina Bohórquez y Agudelo (2025). Dentro del Grupo B, la variabilidad del índice de

generación de RCD ($DE = 14.76 \text{ kg/m}^2$) refleja diferencias en el sistema constructivo, desde 40 kg/m^2 para industrializado EDGE hasta 74.6 kg/m^2 para mampostería, pero esta variabilidad no se traduce en variabilidad de emisiones totales ($DE = 0.04 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$), lo que confirma que las estrategias de aprovechamiento neutralizan el efecto del sistema constructivo sobre las emisiones finales.

Respecto a la escala, todos los escenarios cumplen el criterio de inclusión de 5.000 a 50.000 m^2 definido en el Diseño Metodológico. El rango de áreas en el Grupo A ($11.800\text{--}16.200 \text{ m}^2$) y en el Grupo B ($9.750\text{--}18.600 \text{ m}^2$) es comparable, y dado que la unidad de análisis es kg CO_2 por metro cuadrado construido, las diferencias de escala absoluta no afectan la comparabilidad de los resultados.

9. Modelado de KPIs Ambientales — Enfoque Gerencial

El Objetivo Específico 4 de la investigación exige evaluar el impacto de la gestión sostenible de RCD como estrategia de optimización ambiental dentro de la gerencia de proyectos de construcción. Para dar respuesta a este objetivo, los datos cuantitativos fueron transformados en indicadores clave de desempeño (KPIs) mediante el Protocolo de KPIs Ambientales de RCD (Herramienta 4 v3), siguiendo la lógica de que la gerencia de proyectos requiere métricas accionables y comunicables, no solo valores estadísticos (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2023; Kabirifar et al., 2020). Los KPIs se construyeron con base en los marcos de referencia del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, la Resolución 0472 de 2017 y los valores de emisiones de referencia de Pardo-Álvarez et al. (2022).

La pertinencia del modelado de KPIs en el contexto de esta investigación radica en que traduce los resultados estadísticos a un lenguaje de gestión directamente aplicable por tomadores de decisiones en el sector constructor. Como señalan Tamayo Agudelo y Pineda Lezama (2022), la falta de indicadores verificables es uno de los obstáculos más frecuentes para la adopción de prácticas sostenibles en la construcción colombiana. El Protocolo de KPIs construido en esta investigación ofrece un conjunto de ocho indicadores organizados en cuatro grupos (generación y gestión de RCD, emisiones de CO₂, eficiencia operativa y alineación con metas neto cero) que permiten clasificar cada escenario en una escala de desempeño ambiental de cuatro niveles: sostenible avanzado (emisiones ≤ 338.1 kg CO₂/m²), sostenible básico (339–390 kg CO₂/m²), convencional mejorado (391–438.1 kg CO₂/m²) y convencional (> 438.1 kg CO₂/m²). La Tabla 5 sintetiza los indicadores gerenciales más relevantes por grupo comparativo.

Tabla 5

Indicadores clave de desempeño ambiental por grupo comparativo

KPI gerencial	Grupo A (promedio)	Grupo B (promedio)	Implicación para la gerencia de proyectos
% RCD aprovechado vs. meta Res.0472/2017	1.25% ✗ Incumple	27.50% ✓ Cumple	Brecha de 26.3 pp frente a la meta. Los proyectos convencionales están expuestos a riesgo regulatorio y potenciales sanciones.
Viajes de volqueta evitados por aprovechamiento	~1 viaje	~18 viajes	Cada viaje de 15 t evitado reduce emisiones y costos logísticos directos. El Grupo B evita en promedio 17 viajes más por proyecto.
Reducción de CO ₂ respecto a referencia 438.1 kg CO ₂ /m ²	~0 kg/m ²	~101 kg/m ²	La reducción de 101 kg CO ₂ /m ² equivale a compensar las emisiones de transporte de ~6.700 vehículos por km. Argumento cuantificable para inversionistas.
Clasificación KPI-12 (desempeño ambiental del escenario)	✗ Convencional (3/4) ▷ Mejorado (1/4)	★ Sost. avanzado (1/4) ● Sost. básico (3/4)	Ningún escenario convencional alcanza la clasificación sostenible. ESC-B01 (Verdant, Cali) es el único que supera el umbral de sostenible avanzado (≤ 338.1 kg CO ₂ /m ²).

Nota. Elaboración propia a partir del Protocolo de KPIs Ambientales v3 (mayo 2026). La clasificación de desempeño ambiental corresponde al KPI-12 del protocolo. La estimación de viajes evitados usa una capacidad media de 15 t por viaje de volqueta (UFPS, 2022). Meta Res.0472/2017: $\geq 11.3\%$ para 2022, $\geq 13.3\%$ para 2024. pp = puntos porcentuales.

El resultado más relevante para el Objetivo Específico 4 es la clasificación de desempeño ambiental (KPI-12): los tres escenarios del Grupo A que se ubican por encima de $438.1 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ se clasifican como convencionales, mientras que ESC-A03 (Bogotá, mampostería, $438.05 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) alcanza marginalmente la categoría de convencional mejorado, con una reducción de apenas $0.05 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ respecto a la referencia. En el Grupo B, el escenario ESC-B01 (Verdant, Cali, $338.06 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) es el único que supera el umbral de sostenible avanzado, mientras que los otros tres se clasifican como sostenible básico con totales entre 338.14 y $338.15 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$. Estos resultados indican que la implementación de estrategias sostenibles de gestión de RCD permite escalar desde la categoría convencional hasta la sostenible, una transición que, en términos de emisiones absolutas, equivale a reducir $101 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ en cada metro cuadrado construido del proyecto.

10. Síntesis de los Hallazgos del Análisis

El análisis de datos permite responder la pregunta de investigación y los cuatro objetivos específicos del estudio. A continuación se sintetizan los cinco hallazgos principales, organizados de acuerdo con su relevancia para las conclusiones:

Hallazgo 1. Reducción confirmada y cuantificada. Los escenarios del Grupo B presentan emisiones totales medias de $338.13 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$, una reducción de $100.95 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$

(23.0%) respecto al Grupo A (439.08 kg CO₂/m²). Este resultado es coherente con la referencia literaria (Pardo-Álvarez et al., 2022: -22.8%, -100 kg CO₂/m²), lo que valida tanto los datos recolectados como la metodología de cálculo de ACV acotado aplicada.

Hallazgo 2. Diferencia estadísticamente significativa. La prueba U de Mann-Whitney confirma que la diferencia de emisiones entre grupos no es atribuible al azar ($U = 16.0$, $p = 0.029$, $p < 0.05$). Con $n = 4$ por grupo, la potencia estadística es limitada, pero la combinación de significancia estadística y magnitud del efecto (23.0%) constituye evidencia técnica sólida en el marco de un alcance descriptivo-comparativo con datos secundarios.

Hallazgo 3. El aprovechamiento es el factor gerencial determinante. La correlación negativa muy fuerte entre el porcentaje de RCD aprovechado y las emisiones totales ($\rho = -0.952$, $p = 0.0003$) identifica el aprovechamiento como la variable operacional más asociada con la reducción de emisiones, por encima de la distancia a escombrera ($\rho = 0.214$, n.s.) y con mayor poder explicativo que el índice de generación de RCD ($\rho = 0.714$, $p = 0.047$). Este hallazgo tiene implicaciones directas para la gerencia de proyectos: la decisión de implementar un plan de gestión de RCD con metas de aprovechamiento verificables es el lever más eficiente para la reducción de la huella de carbono en la fase constructiva.

Hallazgo 4. Incumplimiento normativo sistémico en prácticas convencionales. El 100% de los escenarios del Grupo A presenta porcentajes de aprovechamiento de RCD inferiores al 11.3% (media: 1.25%), incumpliendo la meta mínima establecida por la Resolución 0472 de 2017 vigente desde 2022. Este hallazgo evidencia una brecha sistemática entre el cumplimiento

normativo y la práctica convencional del sector constructor en Bogotá y Cali, con implicaciones de riesgo regulatorio para las empresas que no adopten estrategias de gestión sostenible de residuos.

Hallazgo 5. Alta predictibilidad y homogeneidad de los resultados sostenibles. La desviación estándar de emisiones totales del Grupo B ($0.04 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) frente a la del Grupo A ($1.95 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) demuestra que los escenarios con prácticas sostenibles convergen en un nivel de emisiones consistente independientemente de la ciudad, el sistema constructivo y la escala del proyecto. Esta alta predictibilidad sugiere que las estrategias de economía circular en la gestión de RCD son replicables y escalables al contexto de la construcción urbana colombiana, lo que fundamenta su incorporación como estándar de desempeño ambiental en la gerencia de proyectos.

Conclusiones

La presente investigación analiza la relación entre la implementación de estrategias de gestión y disposición final de RCD y la reducción de emisiones de CO_2 durante la fase constructiva de proyectos de vivienda urbana en Colombia. Los hallazgos del análisis descriptivo-comparativo permiten responder la pregunta de investigación y cada uno de los cuatro objetivos específicos con evidencia técnica cuantificada y verificable.

En respuesta al Objetivo Específico 1, se identifican dos tipologías claramente diferenciadas de prácticas de gestión de RCD. Las prácticas convencionales del Grupo A se caracterizan por porcentajes de aprovechamiento entre el 1% y el 2%, disposición mayoritaria en

escombreras (98%-99%) y ausencia de KPIs ambientales documentados. Las prácticas sostenibles del Grupo B presentan aprovechamientos entre el 20% y el 40%, respaldados por certificaciones EDGE, planes de gestión documentados y gestores autorizados verificables. Esta diferencia supera los 26 puntos porcentuales en la variable de aprovechamiento y representa la brecha más significativa entre los dos modelos de gestión analizados.

En respuesta al Objetivo Específico 2, las emisiones del Grupo A oscilan entre 438.05 y 442.0 kg CO₂/m², con una media de 439.08 kg CO₂/m², coherente con la referencia convencional de la literatura. Las emisiones del Grupo B convergen entre 338.06 y 338.15 kg CO₂/m², con una media de 338.13 kg CO₂/m² y una desviación estándar de apenas 0.04 kg CO₂/m², lo que evidencia la alta predictibilidad de los resultados sostenibles.

En respuesta al Objetivo Específico 3, la comparación inter-grupos confirma una diferencia de 100.95 kg CO₂/m² (23.0%) entre prácticas convencionales y sostenibles, estadísticamente significativa según la prueba U de Mann-Whitney bilateral ($U = 16.0$, $p = 0.029$, dos colas). La correlación de Spearman entre el porcentaje de aprovechamiento y las emisiones totales ($\rho = -0.952$, $p = 0.0003$) identifica el aprovechamiento como el factor gerencial determinante, por encima de la distancia a escombrera y el sistema constructivo.

En respuesta al Objetivo Específico 4, el modelado de KPIs gerenciales demuestra que la implementación de estrategias sostenibles genera un impacto cuantificable en tres dimensiones: la reducción de 101 kg CO₂/m² por proyecto; el incremento del cumplimiento normativo de 0/4 a 4/4 escenarios frente a la meta de la Resolución 0472 de 2017; y la reducción de aproximadamente 17

viajes de volqueta por proyecto. La alta homogeneidad de los resultados sostenibles sugiere que estas estrategias son replicables y predecibles en diferentes contextos urbanos y sistemas constructivos del país.

En respuesta a la pregunta de investigación, existe una relación negativa muy fuerte y estadísticamente significativa entre la implementación de estrategias de gestión y disposición final de RCD y los niveles de emisiones de CO₂ durante la fase constructiva de proyectos de vivienda urbana en Colombia. Los proyectos que adoptan prácticas sostenibles reducen sus emisiones en aproximadamente 100 kg CO₂/m² respecto a los convencionales, una reducción consistente, predecible e independiente del sistema constructivo y la ciudad de análisis. Esta evidencia respalda la incorporación de la gestión sostenible de RCD como estándar de desempeño ambiental en la gerencia de proyectos de construcción a nivel nacional.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos de la investigación, se formulan las siguientes recomendaciones dirigidas a los actores clave del sector constructor colombiano:

Para las empresas constructoras, se recomienda la implementación de planes de gestión de RCD con metas de aprovechamiento verificables desde la etapa de diseño de los proyectos. Los datos de esta investigación demuestran que alcanzar un aprovechamiento del 20% al 40%, metas ya logradas por los escenarios del Grupo B, produce una reducción de 101 kg CO₂/m² sin modificar el sistema constructivo ni la escala del proyecto. Dado que la correlación entre aprovechamiento

y reducción de emisiones es de $\rho = -0.952$, la inversión en planes de gestión de RCD representa el lever más eficiente disponible para la reducción de la huella de carbono en la fase constructiva. La adopción de certificaciones EDGE como las documentadas en ESC-B01 y ESC-B03 provee además credenciales verificables ante inversionistas y partes interesadas.

Para las autoridades ambientales, se recomienda fortalecer los mecanismos de seguimiento y verificación del cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017, con énfasis en el indicador de aprovechamiento. Los hallazgos evidencian que el 100% de los escenarios convencionales analizados incumple la meta mínima del 11.3% vigente desde 2022. Esta brecha sistémica sugiere que los mecanismos de control actuales son insuficientes para inducir el cambio de práctica. Se recomienda el diseño de esquemas de incentivos, como bonificaciones en trámites ambientales o reconocimientos de desempeño, y la creación de observatorios de cumplimiento de RCD en las ciudades con mayor actividad constructora.

Para el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible y los gremios sectoriales, se recomienda la difusión activa de los resultados de esta investigación como evidencia cuantificable del impacto de la gestión sostenible de RCD. La reducción de 23.0% en emisiones, estadísticamente confirmada, ofrece un argumento técnico robusto para la comunicación con inversionistas, certificadores y tomadores de decisiones públicas. Se recomienda además extender los análisis comparativos a ciudades intermedias no representadas en esta muestra, como Bucaramanga, Barranquilla, Pereira y Manizales, para validar la replicabilidad de los hallazgos a escala nacional.

Para la comunidad académica y los investigadores del área, se recomienda ampliar el tamaño de la muestra a un mínimo de 30 escenarios para habilitar técnicas de análisis inferencial más robustas, incluyendo regresión múltiple con control de variables intervinientes. Se recomienda también el desarrollo de estudios de caso con datos primarios de medición directa en obra, que permitan complementar los datos secundarios utilizados en esta investigación con evidencia de campo verificable en tiempo real.

Referencias

- Agudelo, A., & Ospina, A. (2025). Influencia de la Resolución 1257 de 2021 en las emisiones del sector constructor colombiano: Parte 2 - Análisis de transporte. *Revista EIA*, 22(44), Article 1788. <https://doi.org/10.24050/reia.v22i44.1788>
- Agudelo, A., & Ramírez, J. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Revista Ion Ingenius*, 30(2), 15–25. https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v30n2/en_art02.pdf
- Agudelo, A., & Ramírez, J. (2023). Res. 0472/2017: Escenarios para la gestión de RCD que reducen 100 kg CO₂/m² en edificaciones de Medellín. *Revista EIA*, 19(38), Article 1554. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1554>

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2023). Guía regional con los procesos técnicos y jurídicos para el manejo integral de Residuos de Construcción y Demolición (Cartilla RCD 2023). AMVA. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/cartillas/Cartilla%20Residuos%20de%20Construccion%20y%20Demolicion.pdf>

Butera, S., Christensen, T. H., & Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2.^a ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2023). Hoja de ruta para edificaciones neto cero: Rol de RCD en fase constructiva. https://www.cccs.org.co/wp/wp-content/uploads/2023/03/Hoja_de_Ruta_ENCC_compressed.pdf

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (s. f.-a). Gestión de impactos durante la construcción: RCD en edificaciones urbanas. <https://casa.cccs.org.co/post-lineamientos/gestion-de-los-impactos-durante-la-construccion/>

Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2014). *Nonparametric statistics: A step-by-step approach* (2.^a ed.). Wiley.

Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4.^a ed.). SAGE Publications.

Espinosa, M., Guevara, J., Salazar, J., Rivera, F., & Franco, J. F. (2022, 14 de mayo). Línea base de emisiones GEI de las edificaciones en Colombia (Proyecto Edificaciones Neto Cero-Carbono). Hill International; Universidad de los Andes; Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. <https://docs.cccs.org.co/Linea%20base%20Hill.pdf>

Gallego Gómez, N. E. (2023). Mitigación de la huella de carbono en la construcción de Vivienda de Interés Social (VIS) de sistema constructivo industrializado, en la ciudad de Bogotá, integrando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el Value Stream Mapping (VSM) [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84542>

George, D., & Mallery, P. (2003). SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference (4.^a ed.). Allyn & Bacon.

González Lima, R. C. (2020). Análisis para la gestión de residuos de construcción y demolición del sector vivienda en Santiago de Cali: estudio de caso [Trabajo de grado de maestría, Pontificia Universidad Javeriana Cali]. Repositorio Institucional Vitela. <http://hdl.handle.net/11522/1949>

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). Multivariate data analysis (8.^a ed.). Cengage Learning.

- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, Article 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector: A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, Article 119238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>
- Mejía-de-Gutiérrez, R., Robayo-Salazar, R., & Valencia-Saavedra, W. (2023). Residuos de construcción y demolición como materia prima de concretos y elementos de construcción obtenidos mediante activación alcalina. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184), 505–519. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 0472 de 2017: Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición [Resolución]. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2025). Retos y oportunidades en la gestión de RCD nacional: Foco en emisiones de construcción.

https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2025/12/Retos-y-oportunidades-Gestion-RCD_280825-1.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). Cartilla de criterios ambientales para diseño y construcción de vivienda urbana: Gestión de RCD y CO₂.
<https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/cartilla-criterios-ambientales-diseno-y-construccion-de-vivienda-urbana/>

Ospina Bohórquez, A., & Agudelo, A. (2025). Huella de carbono de un edificio elevado construido con sistema de construcción de concreto monolítico reforzado. *Revista DELOS*, 18(68), Article 5697. <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/5697>

Pardo-Álvarez, N. S., López-Castaño, D. J., & Rico-Pérez, M. A. (2022). Inclusión de concretos sostenibles en el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y la disminución de emisiones del sector constructor colombiano: Análisis de materiales. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 14(1), 76–85. <https://doi.org/10.22335/rlct.v14i1.1510>

Pineda Lezama, O. B., & Tamayo Agudelo, S. L. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: Un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Tecnura*, 19(46), 10–23. <https://doi.org/10.14483/22487085.8363>

- Restrepo, J. D., & Agudelo, A. (2022). Construyendo un futuro más verde: Propuesta de vivienda sostenible para el municipio del Colegio del departamento de Cundinamarca, Colombia. EIEN, 2(1), Article 3771. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3771>
- Rivera García, F. (2020). Carbono incorporado en la construcción: Estimación de emisiones asociadas a nuevas viviendas de interés social y prioritario en Bogotá, 2020-2030 [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/6bd0736e-d27e-4ef5-8e9e-6c10a58d2cce/content>
- Sabogal Cely, G. G. (2022). Gestión técnica para el manejo de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra nueva [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82142>
- Salas-Zapata, W. A., Ríos-Osorio, L. A., Troughon-Osorio, A., & Álvarez-Gaviria, O. S. (2022). Aproximación a la gestión de los residuos de construcción y demolición en el área metropolitana del Valle de Aburrá. Revista CEA, 8(18), e2129. <https://doi.org/10.22430/24223182.2129>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición – RCD en la obra (3.^a versión) [Resolución SDA 00932 de 2015]. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. <https://www.ambientebogota.gov.co/residuos-de-construccion-y-demolicion>

Tamayo Agudelo, S. L., & Pineda Lezama, O. B. (2022). Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia. *Sustainability*, 14(12), Article 7225. <https://doi.org/10.3390/su14127225>

Universidad Francisco de Paula Santander. (2022). Metodología para el cálculo de la huella de carbono en RCD del sector construcción en el Pacífico. Repositorio Institucional UFPSO. [https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/3348/Methodo log%C3%ADa%20Para%20El%20C%C3%A1lculo%20De%20La%20Huella%20De%20Carbono.pdf](https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/3348/Methodo%20log%C3%ADa%20Para%20El%20C%C3%A1lculo%20De%20La%20Huella%20De%20Carbono.pdf)

Urquijo Fajardo, G. E. (2021). Modelo de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) orientado al aprovechamiento, beneficios económicos y ambientales para la ciudad de Tunja (Boyacá) [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/44013>