

Desarrollo del Modelo de Negocio de una Escombrera Sostenible para la Producción de  
Prefabricados

Genoveva Estefanía Contreras Bermúdez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Máster en Gerencia de Negocios

Director

Laura Yeraldin Escobar Rodríguez

Magíster en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería industrial

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Gerencia de Negocios MBA

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, por darme sabiduría y permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres, por ser mi mayor inspiración, por su amor incondicional hacia mí.

Este logro es tan mío como de ustedes.

### **Agradecimiento**

Agradezco primero a Dios, por sostenerme en cada momento, por no abandonarme nunca y por bendecir mi camino.

A mis padres, Luz y Héctor, por ser los pilares de mi vida, por brindarme su apoyo incondicional y por acompañarme siempre en cada meta que me propongo. Durante este último año enfrentamos unas pruebas que nos unieron y nos fortalecieron aún más como familia; gracias a Dios estamos saliendo victoriosos, con una fe y un amor más sólido que nunca.

A mi hermano Mono, por su apoyo y por brindarme la confianza y la libertad necesarios para trabajar y estudiar, permitiéndome avanzar con responsabilidad y compromiso.

A mis amigas, que son esa familia que escogí y con la que crecí, que están para mí siempre, en las buenas y en las no tan buenas.

Y a mí misma, por el esfuerzo realizado y por mantener siempre el deseo de crecer, superarme y ser una mejor versión de mí.

Que este logro sea demostración de perseverancia y del amor que sostiene cada uno de mis pasos.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	16
1. Objetivos .....	19
1.1. Objetivo General .....	19
1.2. Objetivos Específicos.....	19
2. Caracterización de los residuos de construcción y demolición .....	20
2.1. Tipos y composición más frecuente.....	20
2.2. Principales generadores .....	20
2.3. Canales de disposición y gestión actual.....	21
2.4. Hallazgos.....	21
3. Marco normativo y regulatorio en Colombia para la gestión de RCD .....	22
3.1. Marco estratégico nacional. ....	23
3.2. Normativa clave para la gestión de RCD.....	23
3.3. Implementación distrital: el caso de Bogotá como referente.....	24
3.4. Aplicación regional: Magdalena Medio, Barrancabermeja y Santander .....	24
4. Identificación preliminar de requisitos ambientales y licencias aplicables. ....	25
4.1. Licencia ambiental y permisos asociados .....	26
4.2. Registro como gestor autorizado de RCD .....	27
4.3. Normas técnicas y certificaciones aplicables.....	27

4.4. Supervisión y autoridades competentes .....	28
4.5. Riesgos de incumplimiento.....	28
5. Estudio de mercado.....	32
5.1 Contexto del mercado de materiales para la construcción.....	32
5.2 Necesidades del sector y oportunidad de mercado .....	32
5.3. Introducción y Objetivo del Focus Group .....	33
5.3.1. Metodología del Focus Group. ....	34
5.3.2. Enfoque metodológico .....	35
5.3.4. Perfil de los participantes.....	35
5.3.5. Procedimiento .....	36
5.3.6. Preguntas guía del focus group.....	37
5.4. Conclusiones según focus group.....	37
6. Viabilidad técnica .....	39
6.1. Localización de la escombrera.....	39
6.2. Capacidad.....	41
7. Proceso productivo de la planta. ....	42
7.1. Diseño del Proceso Productivo .....	42
7.1.1 Diagrama general del proceso.....	43
7.2 Descripción técnica por etapas.....	44

7.3 Maquinaria principal.....	45
7.4. Logística de Recolección, Operación y Distribución .....	46
7.4.1. Modelo de recolección.....	46
7.4.2. Distribución interna en planta.....	46
7.4.3. Personal mínimo de operación.....	47
7.4.4. Descripción ampliada del proceso productivo.....	47
7.4.5. Equipos y tecnologías utilizadas.....	49
7.4.6. Control de calidad.....	50
8. Plan logístico de recepción, transporte interno y comercialización de prefabricados en el marco normativo colombiano. ....	51
8.1. Enfoque logístico del modelo operativo.....	51
8.2. Logística de recepción de RCD.....	52
8.2.1 Responsabilidad del generador y abastecimiento.....	52
8.2.2. Procedimiento de ingreso en planta.....	52
8.3. Logística interna y flujo operacional.....	53
8.4. Logística de comercialización y distribución de prefabricados.....	54
9. Lineamientos ambientales aplicados a la planta RCD.....	57
9.1 Revisión documental de normativa colombiana aplicable.....	57
9.2. Identificación preliminar de impactos ambientales por etapas del proceso.....	62
10. Análisis financiero.....	64

10.1. Inversión inicial. ....	65
10.2. Costos de operación.....	67
10.2.1 Costos de mano de obra.....	67
10.2.2 Costos operativos y administrativos.....	67
10.3 Ingresos del proyecto.....	71
10.3.1 Ingreso por venta de productos.....	71
10.3.2 Ingresos por recepción de RCD.....	72
10.3.3. Ingresos totales del proyecto.....	73
10.4 Punto de equilibrio.....	74
10.5. Tasa Interna de Retorno.....	76
10.6. Análisis de escenarios.....	78
10.6.1. Escenario regulatorio: Restricción normativa al uso de RCD como materia prima.....	78
10.6.2. Escenario de mercado: Disminución en la demanda de prefabricados.....	79
10.6.3. Escenario de costos: Incremento en los costos operativos.....	80
10.7. Conclusión financiera.....	82
11. Conclusiones.....	82
Referencias Bibliográficas.....	85

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Marco legal comparativo: gestión de RCD y producción de prefabricados</i> .....	28
Tabla 2. <i>Resumen requisitos ambientales y licencias aplicables</i> .....	30
Tabla 3. <i>Maquinaria principal recomendada</i> .....	45
Tabla 4. <i>Flujo resumido del proceso</i> .....	49
Tabla 5. <i>Equipos utilizados en planta</i> .....	50
Tabla 6. <i>Resumen normativo e implicaciones para la planta</i> .....	58
Tabla 7. <i>Checklist de cumplimiento inicial</i> .....	60
Tabla 8. <i>Impactos ambientales en el proceso</i> .....	63
Tabla 9. <i>Inversión inicial</i> .....	66
Tabla 10. <i>Precios de maquinaria (Fase inicial)</i> .....	66
Tabla 11. <i>Estimación de costos operativos mensuales</i> .....	68
Tabla 12. <i>Total costos de operación</i> .....	71
Tabla 13. <i>Ventas por productos</i> .....	71
Tabla 14. <i>Ventas por recepción de RCD</i> .....	73
Tabla 15. <i>Total ingresos</i> .....	73

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización lote .....	40
Figura 2. Diagrama del proceso .....	44
Figura 3. Prototipo conceptual de distribución operativa de la planta de aprovechamiento de RCD.....	56

## **Lista de Apéndices**

**Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS**

Apéndice A. Calculo de mano de obra.

## Glosario

Las definiciones presentadas a continuación corresponden a una construcción conceptual propia, basada en la literatura revisada a lo largo del desarrollo del trabajo.

**Aprovechamiento de RCD:** proceso mediante el cual los residuos de construcción y demolición son reincorporados al ciclo productivo, transformándose en nuevos materiales útiles, como agregados reciclados o prefabricados.

**Adoquín:** elemento prefabricado utilizado en la construcción de superficies como andenes, vías peatonales y zonas urbanas, fabricado generalmente en concreto y, en este caso, a partir de materiales reciclados.

**Agregados reciclados:** materiales granulares obtenidos del procesamiento de residuos de construcción y demolición, utilizados como sustitutos de agregados naturales en aplicaciones no estructurales.

**Capacidad productiva:** nivel máximo de producción que puede alcanzar la planta en un periodo determinado, considerando sus recursos técnicos, humanos y operativos.

**Costos operativos:** conjunto de gastos necesarios para el funcionamiento de la planta, incluyendo energía, mantenimiento, combustible, agua y otros insumos requeridos en el proceso productivo.

**Economía circular:** modelo económico que promueve la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, con el fin de minimizar residuos y optimizar el uso de recursos.

**Escombrera:** instalación destinada a la recepción, manejo y disposición de residuos de construcción y demolición, que en este caso incorpora procesos de aprovechamiento.

**Flujo de caja:** registro de entradas y salidas de dinero en un periodo determinado, utilizado para evaluar la viabilidad financiera de un proyecto.

**Implementación progresiva:** estrategia de puesta en marcha en la cual el proyecto inicia con una capacidad y recursos limitados, permitiendo su crecimiento gradual conforme aumentan la demanda y los ingresos.

**Inversión inicial:** monto de recursos económicos requeridos para la puesta en marcha del proyecto, incluyendo terreno, maquinaria, infraestructura y otros costos asociados.

**Logística inversa:** proceso de gestión que permite recuperar, recolectar y transportar residuos desde su punto de generación hasta su disposición o aprovechamiento.

**Margen de seguridad:** diferencia entre el nivel de operación proyectado y el punto de equilibrio, que indica la capacidad del proyecto para soportar disminuciones en la demanda sin incurrir en pérdidas.

**Mezclador forzado:** equipo utilizado en la producción de prefabricados, encargado de garantizar la homogeneidad de la mezcla de materiales.

**Punto de equilibrio:** nivel de ventas en el cual los ingresos son iguales a los costos totales, indicando el momento a partir del cual el proyecto comienza a generar utilidades.

**Prefabricados:** elementos de construcción elaborados previamente en planta, como bloques o adoquines, que posteriormente son utilizados en obras civiles.

**Reciclaje de RCD:** proceso de transformación de residuos de construcción y demolición en nuevos materiales utilizables, reduciendo la necesidad de materias primas vírgenes.

**Residuos de Construcción y Demolición (RCD):** materiales resultantes de actividades de construcción, remodelación o demolición de estructuras, como concreto, ladrillo, asfalto y otros residuos inertes.

**Tasa Interna de Retorno (TIR):** indicador financiero que mide la rentabilidad de un proyecto, representando la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja con la inversión inicial.

## Resumen

**Título:** Desarrollo del modelo de negocio de una escombrera sostenible para la producción de prefabricados.\*

**Autor:** Genoveva Estefanía Contreras Bermúdez\*\*

**Palabras Clave:** Prefabricados, planta, RCD, Economía circular, Gestión sostenible.

**Descripción:** El proyecto “Escombrera sostenible para el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD)” tiene como objetivo diseñar un modelo de negocio integral de gestión ambiental y productiva que permita la recepción, clasificación, tratamiento y transformación de los RCD generados por obras civiles en el departamento de Santander, con especial enfoque en la región del Magdalena Medio y el distrito de Barrancabermeja. Este proyecto busca establecer una planta de aprovechamiento con capacidad técnica para procesar y reutilizar estos materiales en la fabricación de prefabricados de concreto y elementos de urbanismo como los son los bloques, adoquines, bordillos y subbases estabilizadas, bajo estándares de calidad definidos por las Normas Técnicas Colombianas (ICONTEC), criterios y lineamientos de sostenibilidad ambiental.

El modelo de negocio plantea la implementación de un sistema que permita recibir y separar los residuos desde su origen, optimizando su posterior aprovechamiento, el uso de equipos de trituración, cribado y mezclado, y la aplicación de los planes y normativas que le apliquen como Plan de Manejo Ambiental de RCD (PMA-RCD) conforme a la Resolución 0472 de 2017 y la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, garantizando el control de impactos sobre el suelo, el aire y los recursos hídricos.

A su vez, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, 12 y 13, al promover ciudades sostenibles, el consumo responsable y la acción por el clima. En general, la propuesta busca consolidar un modelo técnico, ambiental y económicamente viable que pueda ser replicado en otras regiones del país.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería industrial. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Laura Yeraldin Escobar Rodríguez. Magíster en Ingeniería industrial

## Abstract

**Title:** Development of the Business Model for a Sustainable Debris Disposal Site for the Production of Prefabricated Materials\*

**Author:** Genoveva Estefanía Contreras Bermúdez\*\*

**Keywords:** Prefabricated, plant, C&DW, Circular economy, Sustainable management.

**Description:** The project “*Sustainable Debris Disposal Site for the Utilization of Construction and Demolition Waste (C&DW)*” aims to design a comprehensive business model for environmental and productive management that enables the reception, classification, treatment, and transformation of waste generated by civil construction activities in the department of Santander, with a specific focus on the Magdalena Medio region and the district of Barrancabermeja. The initiative seeks to establish a resource recovery plant with the technical capacity to process and reuse these materials in the production of concrete prefabricated elements and urban infrastructure components, such as blocks, curbs, paving stones, and stabilized bases, in compliance with the Colombian Technical Standards (ICONTEC) and sustainability criteria.

The business model proposes the implementation of a system that allows for the reception and separation of waste from its source, optimizing its subsequent utilization. It also includes the use of crushing, screening, and mixing equipment, as well as the application of environmental management instruments such as the Construction and Demolition Waste Environmental Management Plan (PMA-RCD), in accordance with Resolutions 0472 of 2017 and 1257 of 2021, issued by the Ministry of Environment and Sustainable Development of Colombia.

Furthermore, the project aligns with Sustainable Development Goals (SDGs) 11, 12, and 13, by promoting sustainable cities, responsible production, and climate action. Overall, this proposal seeks to consolidate a technically, environmentally, and economically viable model that can be replicated in other regions of the country.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Industrial Engineering. School of Industrial and Business Studies. Advisor: Laura Yeraldin Escobar Rodríguez. Master of Science in Industrial Engineering.

## **Introducción.**

En el sector de la construcción, los escombros y residuos representan uno de los principales retos en la gestión de residuos sólidos urbanos. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021), la Resolución 1257 modificó la normativa anterior para fortalecer el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) como parte de la estrategia nacional de economía circular. Estudios recientes señalan que en Colombia se generan entre 18 y 22 millones de toneladas de RCD al año, siendo Bogotá la ciudad con la mayor contribución (Asociación Colombiana de Universidades [ASCUN], 2023).

Gran parte de estos residuos termina en escombreras informales o rellenos sanitarios, lo que provoca contaminación del suelo, aire y agua; lo anterior incrementa la presión sobre los sistemas de disposición final y se desaprovechan materiales recuperables que podrían reincorporarse en procesos productivos. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s. f.), el país utiliza aproximadamente el 60 % de los recursos naturales no renovables extraídos de la tierra para la construcción, generando más del 20 % de residuos respecto al total de materiales empleados. No obstante, el potencial de aprovechamiento de los RCD podría superar el 90 %, mientras que actualmente solo cerca del 2 % se utiliza con este fin.

El problema radica en la falta de soluciones integrales que vinculen aspectos normativos, técnicos, económicos y sociales. En Bogotá, por ejemplo, el Decreto 507 de 2023 establece lineamientos para la gestión integral de RCD, fijando metas de circularidad que deben cumplir los generadores y fortaleciendo los mecanismos de control sobre toda la cadena de residuos (Secretaría Distrital de Planeación [SDP], 2023).

Este problema es crítico porque articula tres dimensiones estratégicas: ambiental, mediante la reducción de los impactos de la disposición inadecuada; económica, al transformar residuos en productos de valor agregado y reducir la dependencia de materias primas vírgenes; y social, generando empleo y sensibilización ciudadana. Resolverlo permitirá disminuir el impacto ambiental del sector de la construcción y, al mismo tiempo, abrir nuevas oportunidades de negocio en un entorno donde la sostenibilidad y la innovación son cada vez más demandadas y adaptadas en los procesos de las compañías.

Se espera que, con la implementación de este modelo de negocio de escombrera sostenible, se logren los siguientes resultados:

- Impacto ambiental: reducción significativa de residuos de construcción y demolición depositados en rellenos sanitarios o escombreras informales, mejorando la gestión ambiental conforme a la normativa nacional vigente.
- Generación de valor económico: creación de un negocio rentable que transforme residuos en productos de alta calidad, alineado con los lineamientos de economía circular.
- Innovación en el sector: consolidación de un modelo replicable y escalable que sirva de referente para otras regiones y empresas del país.
- Impacto social: generación de empleo verde, inclusión laboral y fortalecimiento de la conciencia ambiental en comunidades locales.

Este proyecto no solo responde a un problema tangible, sino que también sienta las bases para una transición hacia prácticas de construcción más eficientes, sostenibles y responsables, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las políticas nacionales de economía circular.

El modelo de negocio de una escombrera sostenible se encuentra directamente relacionado con la Agenda 2030 de Naciones Unidas. En particular, contribuye a:

- ODS 12 – Producción y consumo responsables: al transformar residuos de construcción en prefabricados, aplicando los principios de economía circular.
- ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles: mediante la reducción del impacto ambiental urbano asociado a los RCD.
- ODS 13 – Acción por el clima: al disminuir la huella de carbono del sector construcción al reducir la extracción de áridos.
- ODS 8 – Trabajo decente y crecimiento económico: generando empleos verdes y fomentando un negocio sostenible e inclusivo.

Este proyecto demuestra que es posible articular sostenibilidad y rentabilidad, aportando a la transición hacia prácticas constructivas más responsables y alineadas con la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015).

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar un modelo de escombrera sostenible para la producción de prefabricados de alta calidad.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- 1.2.1. Identificar las fuentes de suministro de escombros y residuos de construcción, así como el público objetivo para los prefabricados producidos a partir de un análisis de mercado.
- 1.2.2. Establecer el marco legal aplicable y las normativas legales relacionadas con la gestión de residuos de construcción, el reciclaje y la producción de prefabricados en la región y el país.
- 1.2.3. Realizar un estudio técnico que involucre la localización de la escombrera, el diseño del proceso productivo y un plan para la logística de recolección, transporte y comercialización.
- 1.2.4. Evaluar los posibles impactos ambientales de la escombrera estableciendo estrategias de mitigación para garantizar su sostenibilidad.

- 1.2.5. Realizar un estudio financiero bajo distintos escenarios que permita evaluar la rentabilidad de la empresa.

## **2. Caracterización de los residuos de construcción y demolición**

### **2.1. Tipos y composición más frecuente.**

En la región del Magdalena medio, los residuos de construcción y demolición (RCD) más comunes corresponden a concreto, morteros, ladrillo, cerámicos y, en menor proporción, madera, metales y plásticos derivados de embalajes y encofrados (ESSMAR, 2024). Estos perfiles coinciden con lo identificado por Corpamag en sus lineamientos sobre gestión de RCD (Corpamag, s. f.).

En Santander, especialmente en Bucaramanga, los RCD predominantes incluyen hormigón, ladrillo, morteros, cerámicos, suelos compactados y mezclas bituminosas de obras viales, además de madera y metales (Alcaldía de Bucaramanga, 2016; Universidad Industrial de Santander [UIS], 2024).

### **2.2. Principales generadores**

Las fuentes más representativas de RCD en esta región provienen de:

- Construcción y remodelación de vivienda, que generan flujos constantes de residuos (ESSMAR, 2024).

- Obras públicas e infraestructura vial, en las que se generan volúmenes concentrados durante proyectos de mantenimiento y ampliación (Ministerio de Transporte, citado en Logyca & DNP, 2022).
- Demoliciones de edificaciones, que producen flujos de residuos puntuales y de gran volumen (Corpamag, s. f.).
- Proyectos comerciales y urbanísticos de gran escala, que producen residuos estandarizados aptos para valorización (UIS, 2024).

### **2.3. Canales de disposición y gestión actual.**

Aunque hasta el momento se han hecho avances normativos, aún persisten prácticas de disposición en escombreras informales y rellenos sanitarios. Los programas municipales y regionales promueven el registro de gestores privados, pero la cobertura es limitada (Corpamag, s. f.; ESSMAR, 2024). La Corporación Autónoma de Santander (CAS) ha establecido lineamientos y registros de gestores autorizados, mientras que Bucaramanga adoptó un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) con directrices específicas para los RCD. Sin embargo, el aprovechamiento comercial sigue siendo incipiente (CAS, s. f.; Alcaldía de Bucaramanga, 2016).

### **2.4. Hallazgos.**

Los estudios nacionales indican que Colombia genera millones de toneladas de RCD anualmente y que el potencial de aprovechamiento supera el 90 %, aunque actualmente solo se aprovecha un porcentaje mínimo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021; Logyca & DNP, 2022). En las regiones de estudio, la combinación de flujos constantes (obras de

vivienda) y flujos puntuales de gran volumen (infraestructura vial y demoliciones) representa una oportunidad clara para consolidar una escombrera sostenible.

En la región del Magdalena Medio, especialmente el municipio de Barrancabermeja constituye un referente relevante para comprender la magnitud y el manejo actual de los residuos sólidos urbanos. De acuerdo con Veolia (2025), en esta ciudad se gestionan anualmente más de 60.000 toneladas de residuos. Que, aunque no se especifica cuanto de ese total corresponde a RCD, podría indicarse que existe una cantidad considerable de residuos sólidos que puedan pertenecer a residuos de construcción y demolición.

Estas cifras permiten caracterizar a Barrancabermeja como un punto estratégico en la región, tanto por el volumen de residuos gestionados como por el esfuerzo en fortalecer la corresponsabilidad ciudadana mediante actividades de capacitación, embellecimiento urbano y sensibilización comunitaria. En este contexto, la implementación de una escombrera sostenible podría articularse con las dinámicas existentes, se puede explorar sinergias para el aprovechamiento específico de los residuos de construcción y demolición (RCD), que aún representan un vacío en los modelos actuales de gestión integral de la ciudad.

### **3. Marco normativo y regulatorio en Colombia para la gestión de RCD**

En los últimos 10 años, Colombia ha avanzado en la consolidación de un marco normativo que promueve la gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD), enfocándose en la economía circular. Este avance busca reducir el impacto ambiental y económico de los RCD mediante la reincorporación de materiales aprovechables a los ciclos productivos, evitando la disposición inadecuada.

### **3.1. Marco estratégico nacional.**

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), introducida en el Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022, constituye la base del modelo actual de gestión, orientado al cierre de ciclos de materiales y al incremento de la tasa de reciclaje en el país (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2018).

Adicionalmente, la Política Nacional de Edificaciones Sostenibles (CONPES 3919) busca integrar criterios de sostenibilidad en el ciclo de vida de las edificaciones, lo que incluye lineamientos para el manejo de RCD como parte de las buenas prácticas constructivas (DNP, 2018). Estas políticas muestran que, en Colombia, se generan más de 22 millones de toneladas de RCD al año, de las cuales cerca del 96% aún no se aprovechan de manera adecuada (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

### **3.2. Normativa clave para la gestión de RCD**

El principal referente legal es la Resolución 0472 de 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que reglamenta la gestión integral de los RCD. Esta norma establece metas de aprovechamiento progresivas para grandes generadores, partiendo de un 2% en peso del total de materiales utilizados en obra, con incrementos anuales de dos puntos porcentuales hasta alcanzar al menos el 30% de incorporación de RCD aprovechables (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Posteriormente, la Resolución 1257 de 2021 modificó y actualizó algunos apartados de la 0472, precisando los procedimientos de reporte, la certificación de receptores y los mecanismos

de seguimiento. Estas disposiciones fortalecen la trazabilidad de los residuos y permiten mejorar la fiscalización en el sector (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Además, normas técnicas como la NTC 6093 de 2014, que regula el Sello Ambiental Colombiano para prefabricados en concreto, establecen requisitos ambientales y fomentan el uso de materiales reciclados en procesos industriales (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2014).

### **3.3. Implementación distrital: el caso de Bogotá como referente**

En el ámbito distrital, Bogotá ha sido pionera en la implementación de modelos específicos de gestión de RCD. El Decreto 586 de 2015 estableció un modelo sostenible para el aprovechamiento de escombros en obras, mientras que la Resolución 2397 de 2011 fijó porcentajes obligatorios de incorporación de materiales reciclados en proyectos de infraestructura pública y privada (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015). Estos referentes demuestran la viabilidad de exigir metas de aprovechamiento más ambiciosas a nivel local.

### **3.4. Aplicación regional: Magdalena Medio, Barrancabermeja y Santander**

En la región del Magdalena Medio y Santander, la aplicación del marco normativo depende de las autoridades ambientales regionales, en particular la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) y, en el caso de Barrancabermeja, la Secretaría Distrital de Medio Ambiente y Transición Energética. Estas instituciones tienen la responsabilidad de registrar a los

gestores de RCD, supervisar el cumplimiento de las resoluciones nacionales y garantizar la existencia de sitios autorizados para la disposición final y el aprovechamiento (CAS, s. f.).

En Barrancabermeja, el manejo de residuos sólidos ha tenido avances significativos gracias a la operación del Centro Inteligente de Gestión Ecológica San Silvestre, administrado por Veolia, que gestiona más de 60.000 toneladas de residuos al año, aunque en su mayoría corresponden a residuos urbanos (Veolia, 2025). A nivel específico de RCD, existen retos relacionados con la disposición clandestina en sectores periféricos y la limitada separación en la fuente en proyectos de construcción locales, lo que muestra que también existen brechas de implementación identificadas a nivel nacional (Fuentes Pumarejo et al., 2017).

A pesar de que existe un amplio marco normativo, la gestión de RCD presenta varios desafíos, como que se siguen presentando disposiciones informales en lotes baldíos, cuerpos de agua y periferias de la ciudad, no se presenta una clasificación adecuada en la fuente, lo que traduce en que se hace más difícil la clasificación de materiales que se pueden aprovechar, además que existen mucho desconocimiento normativo de parte de constructores medianos y pequeños lo que hace que no se cumplan las resoluciones nacionales.

#### **4. Identificación preliminar de requisitos ambientales y licencias aplicables.**

La puesta en marcha de una escombrera sostenible en Colombia está sujeta al cumplimiento de una serie de requisitos ambientales y normativos que garantizan la correcta gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD). Estos requisitos derivan principalmente de la legislación ambiental nacional y de la normatividad sectorial sobre RCD,

además de los procedimientos establecidos por las autoridades ambientales competentes (Ley 99 de 1993; Decreto 1076 de 2015).

#### **4.1. Licencia ambiental y permisos asociados**

De acuerdo con la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1076 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible), no todas las actividades relacionadas con la gestión de RCD requieren licencia ambiental completa. Sin embargo, la instalación y operación de una escombrera sí implica la tramitación de permisos específicos ante la Corporación Autónoma Regional (CAR) competente, en este caso la CAS para Santander o la autoridad ambiental local en Barrancabermeja.

Los permisos más comunes son: concesión de aguas superficiales o subterráneas (si se requiere para procesos de lavado, humectación o control de polvo), permiso de vertimientos (si se generan descargas líquidas al suelo o cuerpos de agua), permiso de emisiones atmosféricas (para fuentes fijas como trituradoras, plantas de clasificación o transporte de material particulado), registro de generador de residuos peligrosos (si en el proceso se generan aceites usados, lubricantes, envases contaminados u otros residuos especiales) y autorización de aprovechamiento forestal (si la construcción de la escombrera implica tala o intervención de cobertura vegetal) (Decreto 1076 de 2015).

En algunos casos, las autoridades pueden exigir un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) simplificado o un Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), dependiendo de la magnitud y ubicación del proyecto (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

#### **4.2. Registro como gestor autorizado de RCD**

La Resolución 0472 de 2017 y su modificación mediante la Resolución 1257 de 2021 establecen que todo gestor de RCD debe inscribirse en el registro de la autoridad ambiental competente. Este registro incluye información sobre la capacidad de almacenamiento y tratamiento, la ubicación del sitio, la tecnología utilizada y los procedimientos de disposición y aprovechamiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017, 2021).

El gestor está obligado a presentar un Plan de Manejo Ambiental de RCD (PMA-RCD), reportar periódicamente las cantidades de residuos recibidos, aprovechados y dispuestos, e implementar medidas de control para mitigar impactos en suelo, aire y agua.

#### **4.3. Normas técnicas y certificaciones aplicables**

Además de los permisos ambientales, el proyecto debe cumplir con estándares técnicos que aseguren la calidad de los materiales recuperados. Por ejemplo, la NTC 6093 establece criterios ambientales para prefabricados en concreto, promoviendo el uso de materiales reciclados bajo el Sello Ambiental Colombiano (ICONTEC, 2014). Igualmente, normas como la NTC 174 sobre agregados pétreos regulan los parámetros técnicos de los materiales provenientes del triturado de RCD, utilizados en subbases y prefabricados (ICONTEC, 2005).

De igual forma, deben cumplirse los requisitos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) municipal y de la normatividad urbanística local, que regulan el uso del suelo y la localización de plantas de aprovechamiento o escombreras.

#### 4.4. Supervisión y autoridades competentes

La supervisión recae en varias instancias: la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), en proyectos de gran escala que trascienden lo regional; las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) como la CAS, CDMB o CORPAMAG, que aprueban registros, permisos y supervisan el cumplimiento de obligaciones ambientales; y la Alcaldía Distrital del municipio, junto con su Secretaría de Medio Ambiente y Transición Energética, responsables de otorgar viabilidad en cuanto a uso del suelo y licencias urbanísticas para la instalación de la escombrera (CAS, s. f.).

#### 4.5. Riesgos de incumplimiento

El no cumplimiento de estas obligaciones puede llevar a sanciones contempladas en la Ley 1333 de 2009, que establece el procedimiento sancionatorio ambiental. Estas sanciones van desde multas hasta la suspensión de actividades o el cierre definitivo del sitio (Ley 1333 de 2009).

**Tabla 1.**

*Marco legal comparativo: gestión de RCD y producción de prefabricados*

Área / objetivo	Norma / instrumento	Qué regula (resumen)	Implicación para la escombrera sostenible
Marco general ambiental	Ley 99 de 1993; Decreto 1076 de 2015	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece competencias de ministerio y CAR; regula licenciamiento, vertimientos, emisiones y responsabilidades ambientales. (Ley 99, 1993; Decreto 1076, 2015).	Define autoridades competentes (CAR/ANLA) que aprueban permisos y licencias para instalación y operación de escombreras.
Gestión integral de RCD (obligaciones y trazabilidad)	Resolución 0472 de 2017 (Ministerio de Ambiente)	Reglamenta gestión integral de residuos de construcción y demolición: obligaciones de generadores, gestores,	Obliga inscripción como gestor RCD, diseño e implementación de

		puntos limpios; exige PMA-RCD y trazabilidad. (MinAmbiente, 2017).	Plan de Manejo Ambiental RCD y reportes periódicos.
Fortalecimiento / actualizaciones	Resolución 1257 de 2021 (MinAmbiente)	Modifica y precisa requisitos de la 0472/2017: formatos de reporte, certificación de receptores y seguimiento para mejorar trazabilidad. (MinAmbiente, 2021).	Requiere cumplimiento de nuevos anexos y procedimientos; aumenta controles de reporte y certificación de receptores.
Política nacional y sostenibilidad de edificaciones	CONPES 3919 (Política Nacional de Edificaciones Sostenibles, DNP, 2018)	Integra criterios de sostenibilidad en ciclo de vida de edificaciones, incentivo uso de materiales recuperados y medidas de circularidad. (DNP, 2018).	Soporta demandas institucionales de prefabricados sostenibles; facilita argumentos para buscar incentivos e incorporar prefabricados reciclados en obras públicas.
Gestión local (ej. Bogotá)	Decreto 586 de 2015; Resolución 2397 de 2011 (Bogotá)	Modelo local de gestión de RCD con metas y requisitos más exigentes (trazabilidad, porcentajes de incorporación obligatoria en obras públicas/privadas). (Alcaldía Bogotá, 2015; SDA, 2011).	Referente para diseñar metas internas (p. ej. objetivos de incorporación de RCD en productos); muestra viabilidad de exigir porcentajes a generadores.
Normas técnicas para prefabricados	NTC 6093 (ICONTEC, 2014) / Sello Ambiental Colombiano (SAC)	Define criterios ambientales (evaluación ciclo de vida, requisitos de materias primas, etiquetado) para prefabricados en concreto. (ICONTEC, 2014).	Necesario para certificar prefabricados reciclados; guía criterios de calidad, ensayos y documentación técnica a exigir.
Incentivos y herramientas complementarias	Resoluciones tributarias y programas (p. ej. incentivos energéticos) y certificaciones voluntarias (SAC)	Existen instrumentos que pueden facilitar financiamiento o ventajas tributarias a proyectos sostenibles; sello ambiental apoya mercado. (MinAmbiente, 2022; ICONTEC, 2014).	Pueden emplearse para estructurar incentivos financieros o de mercado para prefabricados reciclados.

**Tabla 2.**

*Resumen requisitos ambientales y licencias aplicables*

Requisito / permiso	¿Qué exige?	Autoridad competente	Documento / soporte requerido	Norma de referencia
Registro como gestor de RCD	Inscripción obligatoria para operar como receptor, aprovechador o disposición de RCD; incluye capacidad, ubicación y actividades.	CAR territorial (p. ej. CAS en Santander).	Formato de inscripción ante CAR; copia de la resolución de inscripción; PMA-RCD.	(MinAmbiente, 2017; MinAmbiente, 2021).
Plan de Manejo Ambiental RCD (PMA-RCD)	Documento técnico-operativo que define recepción, clasificación, tratamiento, aprovechamiento, control de emisiones y plan de monitoreo.	CAR / Alcaldía (vigilancia)	PMA detallado, cronogramas, responsables, procedimientos de gestión y reporte.	(MinAmbiente, 2017).
Licencia ambiental (si aplica)	Dependiendo de la escala y potencial impacto, la CAR o ANLA pueden exigir EIA o licencia ambiental para la instalación/operación.	CAR local / ANLA (si es proyecto de jurisdicción nacional)	Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o Estudio Ambiental simplificado; resolución de licencia.	(Ley 99, 1993; Decreto 1076, 2015).
Permiso de emisiones atmosféricas	Control de fuentes puntuales (trituradoras, bandas): inventario de fuentes, modelación y límites de emisión; plan de control de polvo.	CAR (CAS)	Inventario, cálculos de emisión, medidas de mitigación (filtros, humidificación), monitoreo.	(Decreto 1076, 2015; MinAmbiente, 2017).
Permiso/Autorización de vertimientos	Si se producen aguas residuales (lavado de áridos), requieren permisos de vertimiento o tratamiento antes de descarga.	CAR / Autoridad Hidrográfica	Estudio de caracterización de vertimientos; sistema de tratamiento; permiso de vertimiento.	(Decreto 1076, 2015).

Registro RESPEL (si aplica)	Si se generan residuos peligrosos (aceites, residuos contaminados), registro y manejo según reglamentación RESPEL.	CAR / IDEAM (RUA-RESPEL)	Registro en RUA, plan RESPEL, contrato con gestor autorizado.	(Decreto 1076, 2015).
Viabilidad de uso del suelo / licencia urbanística	Compatibilidad con POT, restricciones ambientales (áreas protegidas, zonas de protección hídrica), licencia de obra.	Alcaldía Municipal / Curaduría Urbana	Certificado de uso del suelo, licencia de construcción, permisos municipales.	(Ley 99, 1993; normatividad municipal).
Autorización para intervención forestal	Si se requiere tala o cambio en cobertura vegetal, autorización y plan de compensación.	CAR (CAS)	Inventario arbóreo, plan de manejo forestal / compensación.	(Decreto 1076, 2015).
Ensayos y certificación de materiales reciclados	Protocolos de control de calidad (granulometría, resistencia, contaminación) para uso en prefabricados.	ICONTEC / compradores / CAR (requisitos ambientales)	Resultados de laboratorio, certificado NTC aplicable, ficha técnica del material.	(ICONTEC, 2014).
Reportes periódicos y trazabilidad	Reporte de volúmenes recibidos, aprovechados y dispuestos; registro de origen y destino.	CAR / MinAmbiente (seguimiento)	Formularios y anexos exigidos por la Resolución; sistema de trazabilidad.	(MinAmbiente, 2017; MinAmbiente, 2021).
Medidas de gestión ambiental operativa	Control de polvo, gestión de aguas, almacenamiento seguro, control de olores, manejo de fauna/flora afectada.	CAR / Alcaldía	Planes operativos descritos en PMA y procedimientos SOP.	(MinAmbiente, 2017).
Sello Ambiental / Certificación voluntaria	Aplicable para posicionamiento de prefabricados sostenibles (compliance con NTC 6093).	ICONTEC / Organismos certificadores	Documentación de ciclo de vida, cumplimiento NTC 6093, auditorías.	(ICONTEC, 2014).

## **5. Estudio de mercado.**

### **5.1 Contexto del mercado de materiales para la construcción**

El sector de la construcción en Colombia constituye un componente fundamental del desarrollo económico, impulsado por proyectos de infraestructura, vivienda y obras civiles. Este dinamismo genera una demanda constante de materiales constructivos, particularmente insumos minerales utilizados en la producción de cemento, concretos y prefabricados.

El análisis de información sectorial evidencia una demanda significativa de materiales minerales y sus manufacturas, destacándose insumos como Clinker, yeso y escorias granuladas, los cuales son componentes esenciales en la producción de cemento y mezclas estructurales. La participación de grandes distribuidores y comercializadores del sector refleja la dinámica activa del mercado y la necesidad continua de abastecimiento para atender los requerimientos del sector constructivo (Legis Comex, 2024).

De igual manera, la presencia de escorias granuladas dentro de los productos utilizados evidencia la incorporación de subproductos industriales como alternativas técnicas viables, lo cual representa un avance hacia prácticas más sostenibles y eficientes en el uso de recursos. Este comportamiento del mercado evidencia una tendencia hacia la optimización de materiales y la búsqueda de soluciones que reduzcan costos y mejoren el desempeño ambiental.

### **5.2 Necesidades del sector y oportunidad de mercado**

La creciente demanda de materiales constructivos ejerce presión sobre los recursos naturales, particularmente en la extracción de agregados pétreos, lo que plantea retos ambientales y logísticos para el abastecimiento sostenible del sector. En este contexto, la gestión inadecuada de residuos de construcción y demolición (RCD) continúa representando un desafío significativo

en Colombia, debido a limitaciones en infraestructura, control territorial y disponibilidad de sitios autorizados para su disposición (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Adicionalmente, los costos asociados al transporte y disposición de escombros, así como las exigencias normativas, representan factores operativos relevantes para los contratistas, quienes requieren soluciones cercanas, ágiles y formalizadas que faciliten el cumplimiento ambiental.

En este escenario, el aprovechamiento de RCD para la producción de agregados reciclados y prefabricados representa una oportunidad estratégica para complementar la oferta de materiales, reducir la dependencia de materias primas vírgenes y disminuir los impactos ambientales asociados a su extracción. La valorización de residuos dentro de esquemas de economía circular contribuye a optimizar el uso de recursos y mejorar la sostenibilidad del sector construcción (Silva et al., 2022).

### **5.3. Introducción y Objetivo del Focus Group**

Con el fin de complementar el análisis técnico y económico del modelo de negocio, se desarrolló un focus group orientado a comprender las percepciones, expectativas y criterios de decisión de actores clave dentro del sector de la construcción en el municipio de Yondó. El uso de esta técnica cualitativa permite obtener información profunda, contextual y directamente relacionada con la aceptación potencial de los prefabricados elaborados a partir de residuos de construcción y demolición (RCD), así como identificar barreras, oportunidades y necesidades específicas del mercado local.

El grupo estuvo conformado por un propietario de ferretería, el cual representa el canal de distribución tradicional, también hace parte del grupo tres contratistas vinculados a empresas

de obras civiles, quienes participan en actividades de construcción, mantenimiento e infraestructura. Estos perfiles fueron seleccionados de manera intencional debido a su experiencia en la compra, uso y especificación de materiales constructivos, lo que los convierte en informantes estratégicos para evaluar la viabilidad comercial del proyecto.

El objetivo principal del focus group fue analizar la percepción del mercado respecto al uso de prefabricados elaborados con materiales reciclados provenientes de RCD, identificando:

- Nivel de aceptación y confianza en el uso de estos productos.
- Criterios de compra más relevantes para ferreterías y contratistas (precio, resistencia, durabilidad, disponibilidad, respaldo técnico).
- Barreras percibidas frente a materiales reciclados (mitos, desconocimiento, preocupaciones técnicas).
- Factores que incentivarían la adopción de productos sustentados en economía circular.
- Valoración de beneficios ambientales y económicos asociados a los prefabricados con RCD.

El desarrollo de este espacio permite obtener información cualitativa clave para fortalecer el diseño del modelo de negocio, ajustar la propuesta de valor y orientar estrategias de entrada al mercado basadas en necesidades reales y aterrizadas del territorio.

### ***5.3.1. Metodología del Focus Group.***

El focus group se desarrolló como una técnica cualitativa orientada a comprender percepciones, creencias, expectativas y criterios de decisión de actores clave del sector construcción en Yondó y Barrancabermeja, con respecto al uso de prefabricados elaborados a

partir de residuos de construcción y demolición (RCD). Esta metodología permite obtener información profunda, contextual y basada en la interacción entre los participantes, lo cual enriquece el análisis del mercado objetivo y la propuesta de valor del modelo de negocio.

### ***5.3.2. Enfoque metodológico***

Se utilizó un enfoque cualitativo descriptivo, basado en la interacción grupal como fuente de construcción de ideas, percepciones y valoraciones. Este enfoque permite identificar patrones y discursos colectivos que no suelen emerger en entrevistas individuales.

El focus group se seleccionó por su capacidad de:

- Explorar actitudes hacia materiales reciclados.
- Identificar barreras y facilitadores de adopción.
- Reconocer criterios de compra y preferencias del mercado.
- Analizar la percepción de calidad, durabilidad y confianza técnica.

### ***5.3.4. Perfil de los participantes***

Los participantes fueron seleccionados mediante muestreo intencional, teniendo en cuenta su experiencia directa en el uso, comercialización o especificación de materiales para obras civiles.

El grupo estuvo conformado por:

- Propietario de una ferretería de Yondó: Representa el canal de distribución de prefabricados más usual y conoce patrones de compra, rotación de inventario y demanda local.

- Tres contratistas vinculados a empresas de obras civiles: Encargados de adquirir materiales para proyectos de infraestructura y construcción. Aportan criterios técnicos sobre resistencia, comportamiento y confiabilidad y representan la demanda directa del producto final.

Este tipo de participantes constituye lo que la literatura denomina “informantes clave”, debido a su capacidad para influir en decisiones de compra y adopción tecnológica.

### ***5.3.5. Procedimiento***

El focus group fue llevado a cabo de la siguiente manera:

1. Convocatoria y selección: Se contacta a cada participante, explicando objetivos y alcance de la sesión, garantizando voluntariedad, confidencialidad y autorización de la información recolectada para fines pertinentes.
2. Ambientación y presentación: Se explica el propósito del estudio, la dinámica del grupo y la duración aproximada (60 minutos).
3. Desarrollo de la sesión: Se utilizan preguntas semiestructuradas para facilitar el diálogo fluido, fomentando la participación equitativa.
4. Registro de información: Se realiza registro mediante notas y grabación de audio para análisis posterior (siempre con autorización previa).
5. Cierre: Se agradeció la participación y se solicitó comentarios finales o sugerencias adicionales.

### **5.3.6. Preguntas guía del focus group**

Las preguntas se diseñaron para abordar las dimensiones clave del mercado: percepción, calidad, confianza, disponibilidad y precio.

- ¿Qué conocen sobre el uso de materiales reciclados en la construcción?
- ¿Han utilizado o visto prefabricados elaborados con agregados reciclados?
- ¿Cuáles son los factores más importantes a la hora de comprar bloques o adoquines?
- ¿Qué características consideran indispensables para confiar en un producto fabricado con RCD?
- ¿Qué dudas o preocupaciones tendrían al usar prefabricados hechos con material reciclado?
- ¿Qué factores podrían dificultar su adopción?
- ¿Qué beneficios perciben en el uso de productos elaborados con RCD?
- ¿Estarían dispuestos a comprar o recomendar este tipo de productos? ¿Por qué?
- ¿Qué condiciones debería ofrecer un fabricante para que ustedes compren de manera confiable?
- ¿Cómo creen que reaccionaría el mercado local ante esta propuesta?

### **5.4. Conclusiones según focus group.**

Esta herramienta cualitativa permitió obtener información directa sobre las prácticas actuales en la disposición de residuos de construcción y demolición (RCD) y explorar el nivel de aceptación que podrían tener los prefabricados elaborados con materiales reciclados.

El grupo estuvo integrado por contratistas con experiencia en obras civiles y un distribuidor de materiales de construcción, seleccionados por su participación directa en la generación, manejo y compra de insumos para obras. Su experiencia práctica permitió identificar situaciones reales del sector, así como factores que influyen en la toma de decisiones relacionadas con la disposición de escombros y la adquisición de materiales.

Durante el desarrollo del ejercicio se identificaron problemáticas asociadas al manejo de residuos, criterios de selección de materiales, percepciones frente al uso de productos reciclados y condiciones que podrían favorecer su adopción. Este tipo de análisis permite comprender dinámicas del mercado local y orientar propuestas alineadas con modelos de economía circular y sostenibilidad.

Los resultados obtenidos evidencian que la disposición adecuada de escombros continúa siendo un reto operativo para los contratistas, principalmente por la distancia a sitios autorizados, los costos asociados al transporte y la necesidad de cumplir con la normativa ambiental. En este contexto, la existencia de un punto formal cercano para la recepción de RCD es percibida como una solución práctica que facilitaría el cumplimiento de las obligaciones ambientales y optimizaría los tiempos operativos en obra. Este hallazgo respalda el componente de recepción de residuos planteado en el modelo de negocio.

De igual manera, se identificó una disposición favorable hacia el uso de prefabricados elaborados con materiales reciclados, siempre que estos garanticen resistencia, uniformidad y precios competitivos, que sean de calidad. En la práctica, los participantes señalaron que la decisión de compra se basa principalmente en la relación calidad-precio y en la disponibilidad inmediata del producto, aspectos que resultan determinantes para la continuidad de las obras, ya que no se puede interrumpir la operatividad de éstas.

También se evidenció que las ferreterías y distribuidores locales pueden desempeñar un papel clave en la comercialización de los prefabricados, ya que actúan como intermediarios confiables dentro del mercado regional. Esto fortalece la estrategia comercial planteada, orientada a aprovechar canales existentes para facilitar la aceptación e introducción del producto al mercado.

No obstante, se identificaron barreras asociadas al desconocimiento sobre materiales reciclados y a percepciones de menor calidad frente a productos tradicionales. Esto sugiere la necesidad de implementar estrategias de divulgación y sensibilización que destaquen los beneficios ambientales y económicos del aprovechamiento de RCD.

Los resultados del focus group confirman la conveniencia del modelo de negocio propuesto, evidenciando tanto la necesidad de un servicio formal de recepción de escombros como el potencial de aceptación de prefabricados reciclados en el mercado local. De esta manera, el proyecto se configura como una alternativa viable que responde a necesidades reales del sector y aporta beneficios ambientales y económicos al territorio.

## **6. Viabilidad técnica**

### **6.1. Localización de la escombrera**

La selección del sitio para la implantación de la escombrera sostenible constituye una etapa fundamental en el proceso de planificación e ingeniería del proyecto, pues la localización incide directamente en los costos operativos, la eficiencia logística, el impacto ambiental y la viabilidad técnica de la planta de aprovechamiento. Para tal fin, se realizó un

análisis de alternativas considerando factores de accesibilidad, topografía, compatibilidad del uso del suelo, disponibilidad de servicios básicos y cercanía a las principales fuentes generadoras de residuos de construcción y demolición (RCD).

El área propuesta se ubica en la periferia del distrito de Barrancabermeja (Santander), en las coordenadas aproximadas 7.021819° N y -73.921911° O. Este terreno se localiza en una zona de baja densidad poblacional y predominio de usos industriales y logísticos, lo cual resulta favorable para la instalación de infraestructura asociada al manejo y aprovechamiento de RCD.

**Figura 1.**

*Localización lote*



Desde el punto de vista logístico, el predio presenta ventajas de conectividad al encontrarse próximo a las vías nacionales Ruta del Cacao (Bucaramanga – Barrancabermeja) y a

los corredores que comunican con el municipio de Yondó (Antioquia), a través del puente Guillermo Gaviria Correa.

El lote cuenta con un área aproximada de 2.420 metros cuadrados (0,24 hectáreas), extensión que resulta adecuada para la instalación de una planta piloto de aprovechamiento de RCD, orientada a la clasificación, trituración, almacenamiento y carga de materiales. Su topografía regular y el acceso a vías secundarias en buen estado favorecen la operación y la posibilidad a futuras expansiones.

Adicionalmente, la localización en la periferia disminuye la probabilidad de conflictos con áreas residenciales. Por tanto, la localización seleccionada se considera técnicamente viable, con condiciones favorables para la implantación de la planta de aprovechamiento de RCD.

## **6.2. Capacidad**

Se realizó una estimación preliminar de la generación anual de residuos de construcción y demolición (RCD) en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, con el propósito de determinar la capacidad de tratamiento necesaria para la planta evaluando que reciba el 5 % del volumen total generado localmente. Ante la limitada disponibilidad de registros locales, la metodología se basó en una tasa per cápita nacional de generación de RCD complementada con proyecciones demográficas municipales, conforme a estudios recientes sobre el flujo de residuos en el país (Colorado et al., 2022; DANE, 2023).

La tasa de referencia utilizada es de 0,467 t/persona por año, que sale de la distribución de la generación nacional estimada de 24,45 millones de toneladas anuales (Colorado et al., 2022). Aplicando dicha tasa a la población proyectada por el DANE para 2023 que es de 214.571

habitantes en Barrancabermeja y 20.572 habitantes en Yondó se obtiene una generación estimada de 100.000 t/año y 9.600 t/año, respectivamente.

Suponiendo una recepción del 5 % del RCD total, los volúmenes anuales a tratar serían de aproximadamente 5.000 t/año para Barrancabermeja y 480 t/año para Yondó. Asumiendo una jornada operativa de 1.776 horas/año, la capacidad requerida de procesamiento sería cercana a 2,8 t/h para Barrancabermeja y 0,27 t/h para Yondó. En un escenario conservador teniendo en cuenta al 50 % de la tasa nacional, las capacidades descenderían a rangos de 1,4 t/h y 0,13 t/h, respectivamente. Estos resultados indican que para instalar una planta de aprovechamiento inicial debe tener una capacidad entre 2 y 3 t/h.

## **7. Proceso productivo de la planta.**

### **7.1. Diseño del Proceso Productivo**

La planta propuesta tendrá la capacidad de producir agregados reciclados (subbases, arenas recicladas) y prefabricados no estructurales (bloques y adoquines), a partir de residuos de construcción y demolición (RCD). El enfoque se sustenta en la valorización de materiales pétreos provenientes de la demolición y construcción, reduciendo impactos ambientales y disminuyendo la demanda de agregados naturales (Cabrera Trujillo, 2020).

Según Mesa Cruz (2023), las plantas de aprovechamiento de RCD deben estructurar su proceso productivo en flujos secuenciales que aseguren: (a) separación adecuada en la recepción, (b) trituración progresiva, (c) clasificación granulométrica y (d) estabilización del material para

su reutilización en prefabricados. Este enfoque también es respaldado por lineamientos técnicos en programas de ingeniería ambiental orientados al reciclaje de materiales pétreos (Máster en Ingeniería Ambiental, 2007).

### ***7.1.1 Diagrama general del proceso***

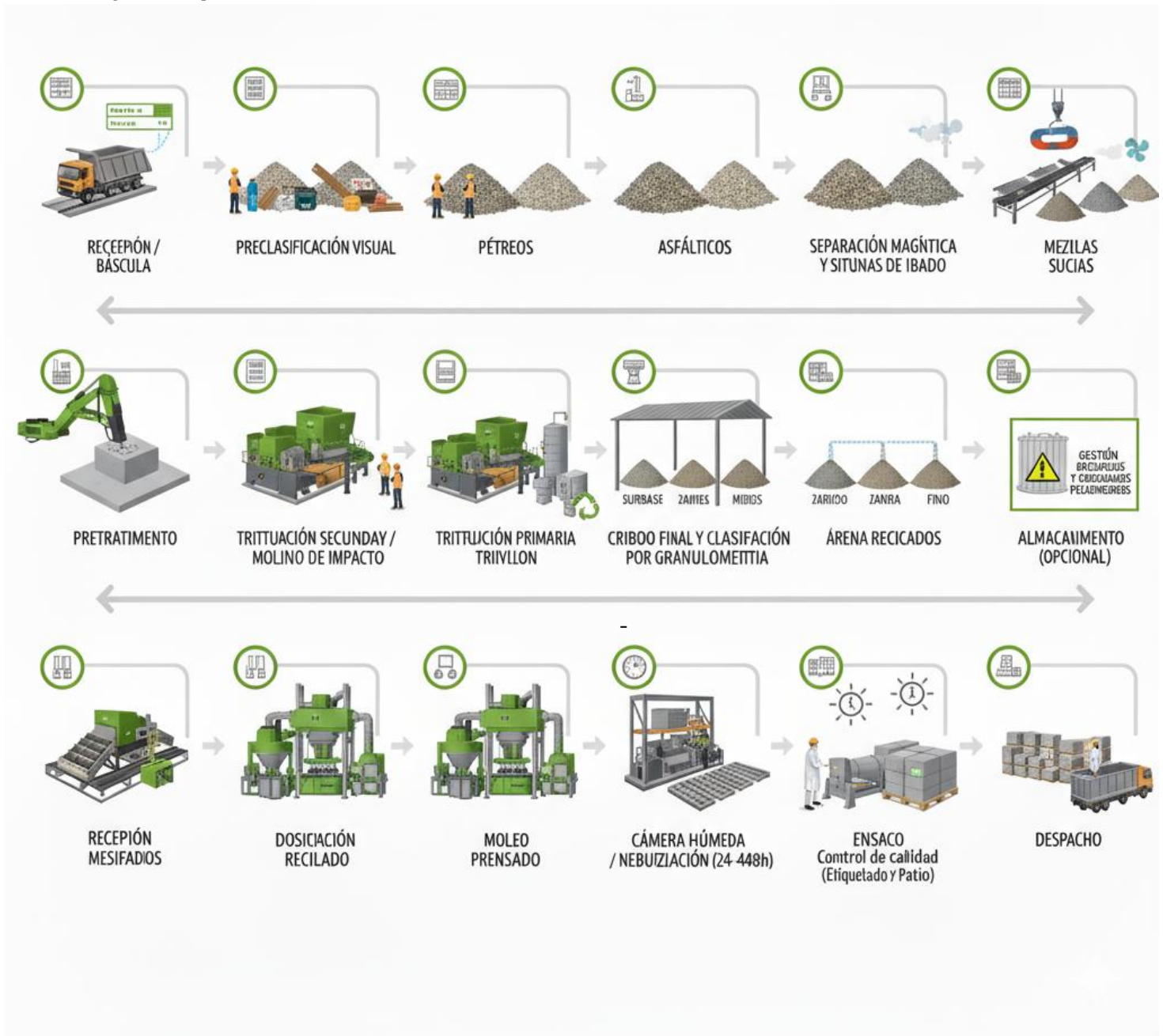
- a.** Recepción y pesaje del material
- b.** Preclasificación y retiro de impropios
- c.** Trituración primaria (reducción gruesa)
- d.** Cribado y separación de fracciones
- e.** Trituración secundaria y refinado
- f.** Separación magnética y de materiales ligeros
- g.** Lavado (opcional según destino del árido)
- h.** Acopio de agregados reciclados
- i.** Dosificación y mezcla para prefabricados
- j.** Moldeo y vibro prensado
- k.** Curado controlado
- l.** Control de calidad
- m.** Almacenamiento y despacho final

Este proceso permite dos líneas de producción paralelas:

- Línea de agregados reciclados (hasta obtener material granular para subbases).
- Línea de prefabricados (mezcla, vibro prensa, curado y acopio).

**Figura 2.**

*Diagrama del proceso*



*Nota: Ilustración generada con ayuda de IA, Gemini*

**7.2 Descripción técnica por etapas.**

1. Recepción y pesaje: Se registra el origen del RCD, volumen ingresado y características visibles para trazabilidad operativa (Cabrera Trujillo, 2020).

2. Preclasificación: Retiro de residuos no pétreos, peligrosos o contaminados. La calidad de separación inicial influye directamente en el rendimiento y aceptación del producto final (Mesa Cruz, 2023).

3. Trituración primaria y secundaria: Se emplea trituradora de mandíbula en la primera etapa y molino de impacto en la segunda, logrando granulometrías aptas para aplicaciones viales y mezclas para prefabricados (Mesa Cruz, 2023).

4. Cribado, separación y lavado: Cribas vibratorias permiten clasificar el material según distribución granulométrica. La separación magnética elimina partículas metálicas. En caso de producir arenas finas para prefabricados, se recomienda lavado con recirculación de aguas (Máster en Ingeniería Ambiental, 2007).

5. Dosificación, mezcla y moldeo: Para la producción de bloques y adoquines, se utiliza mezclador forzado y vibro prensa. El curado se realiza por 7 a 28 días dependiendo de la resistencia requerida (Mesa Cruz, 2023).

### 7.3 Maquinaria principal

**Tabla 3.**

*Maquinaria principal recomendada*

Equipo	Función	Justificación
<b>Báscula puente</b>	Control de entrada/salida	Permite trazabilidad y gestión comercial.
<b>Trituradora de</b>	Trituración primaria	Alta resistencia y durabilidad.

---

<b>mandíbula</b>		
<b>Molino de impacto</b>	Trituración secundaria	Asegura granulometría controlada.
<b>Criba vibratoria</b>	Separación granulométrica	Indispensable para clasificación.
<b>Separador magnético</b>	Retiro de metales	Mejora la pureza del material.
<b>Mezclador forzado</b>	Mezcla para prefabricados	Proporciona homogeneidad.
<b>Vibro prensa</b>	Moldeo de bloques/adoquines	Define densidad y resistencia final.
<b>Cámara de curado</b>	Estabilización de prefabricados	Garantiza calidad mecánica.

---

#### **7.4. Logística de Recolección, Operación y Distribución**

##### **7.4.1. Modelo de recolección**

Se propone un modelo único: Entrega directa por constructor o contratista, incentivando la clasificación en origen. Por motivos de logística y costos, inicialmente no se contempla el servicio de domicilio y transporte del material.

##### **7.4.2. Distribución interna en planta.**

Se tiene contemplado la distribución de la siguiente manera:

- Zona de acceso y báscula
- Patio de acopio de RCD sin procesar
- Área de trituración y cribado
- Zona de producción de prefabricados
- Cámara de curado

- Acopio de productos terminados (Mesa Cruz, 2023).

#### ***7.4.3. Personal mínimo de operación***

- 1 jefe de planta
- 2 operadores de equipo fijo
- 1 operador de cargador
- 1 auxiliar de clasificación
- operarios de moldeo/curado
- 1 auxiliar administrativo

#### ***7.4.4. Descripción ampliada del proceso productivo***

El proceso productivo para la fabricación de prefabricados a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) en una escombrera sostenible se estructura en una secuencia técnica que busca garantizar calidad, eficiencia operativa y cumplimiento normativo ambiental. Este flujo integra actividades de recepción, tratamiento mecánico, adecuación granulométrica, mezclado, conformado y curado del producto final.

En primer lugar, se efectúa la recepción y preclasificación del material, donde los RCD ingresan a la planta mediante pesaje y registro. En esta etapa se realiza una separación manual inicial para retirar residuos no aprovechables como plásticos, madera, textiles o material orgánico, lo cual reduce la contaminación del material pétreo y mejora la eficiencia del tratamiento posterior.

Posteriormente se realiza la reducción granulométrica mediante trituración primaria y secundaria. La trituración es fundamental para transformar los fragmentos heterogéneos en

áridos reciclados de tamaño similares. Este proceso suele ser complementado con cribado mecánico, donde los agregados son separados en fracciones gruesas y finas. Según Cabrera Trujillo (2020), este control granulométrico es determinante para asegurar la calidad de los prefabricados y la estabilidad de la mezcla.

Luego se integra la etapa de separación y limpieza, separación magnética y, cuando el proceso lo permite, lavado con recirculación de agua. El lavado mejora la adherencia pasta-agregado y reduce el contenido de polvo y sulfatos, lo cual aumenta la resistencia mecánica y disminuye la absorción del material (Estudio de viabilidad y anteproyecto de planta RCD, s.f.).

Una vez acondicionados los agregados reciclados, se realiza la dosificación y mezcla. La literatura sugiere reemplazos parciales de árido natural por árido reciclado entre el 20% y el 50% dependiendo de la resistencia objetivo y del tipo de prefabricado (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). Las Normas UNE-EN 206 y UNE-EN 1097 establecen los criterios para verificar la absorción y densidad de los áridos reciclados antes de su incorporación en la mezcla.

La mezcla resultante pasa a la etapa de moldeo, realizada generalmente mediante vibro compresión, lo cual permite obtener bloques, adoquines u otros prefabricados con alta densidad y compacidad estructural. Como demostraron Quijano, Díez-Silva, Montes-Guerra y Castro-Silva (2014), la vibro compresión favorece la durabilidad y resistencia, incluso cuando se utilizan materiales reciclados como componente de la matriz pétreo.

Finalmente, los elementos conformados pasan al curado mixto, que puede combinar un curado inicial en cámara húmeda durante 24 - 48 horas, seguido de curado al aire protegido hasta alcanzar el desarrollo óptimo de resistencias necesarias. Este esquema reduce fisuración y mejora la estabilidad dimensional (Residuos de construcción, s.f.).

**Tabla 4.***Flujo resumido del proceso*

Etapa	Actividad principal	Resultados esperados
<b>Recepción y preclasificación</b>	Retiro de impropios y pesaje	Material apto para trituración
<b>Trituración y cribado</b>	Reducción granulométrica	Agregados reciclados clasificables
<b>Separación y lavado</b>	Limpieza y retiro de partículas finas	Árido reciclado de mayor calidad
<b>Dosificación y mezcla</b>	Integración con cemento y aditivos	Mezcla homogénea y trabajable
<b>Moldeo y compactación</b>	Vibro prensado de piezas	Prefabricados con alta densidad
<b>Curado mixto</b>	Humectación y estabilización	Desarrollo de resistencia y durabilidad

#### **7.4.5. Equipos y tecnologías utilizadas.**

La selección de equipos industriales se realiza considerando los volúmenes requeridos, la granulometría objetivo y el nivel de automatización que se quiera alcanzar. Los equipos incluidos en la planta son:

**Tabla 5.***Equipos utilizados en planta*

Etapa	Equipo principal	Función técnica
<b>Preclasificación</b>	Mesa de selección + minicargador	Retiro de impropios y alimentación controlada
<b>Trituración</b>	Trituradora de quijada / impacto	Reducción primaria del tamaño del material
<b>Cribado</b>	Zaranda vibratoria de 2 o 3 niveles	Clasificación granulométrica por tamaños
<b>Separación</b>	Banda magnética y mesa densimétrica	Retiro de metales y partículas livianas
<b>Lavado</b>	Tornillo lavador / trómel con recirculación	Limpieza y eliminación de finos no deseables
<b>Mezcla</b>	Mezcladora planetaria o de eje vertical	Homogeneización de cemento, áridos y aditivos
<b>Moldeo</b>	Vibro prensa hidráulica	Compactación y conformado de bloques o adoquines
<b>Curado</b>	Cámara húmeda + patio controlado	Desarrollo de resistencia y estabilidad dimensional

#### **7.4.6. Control de calidad**

El control de calidad se realiza en:

- **Materia prima:** caracterización físico-mecánica del árido reciclado (densidad, absorción, equivalente de arena).
- **Mezcla fresca:** verificación de trabajabilidad y relación agua/cemento.
- **Producto final:** ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días, resistencia al desgaste, y absorción de agua.

## **8. Plan logístico de recepción, transporte interno y comercialización de prefabricados en el marco normativo colombiano.**

### **8.1. Enfoque logístico del modelo operativo.**

El modelo logístico propuesto para la planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) está estructurado en un sistema de recepción directa en planta sin flota vehicular propia durante la fase inicial del proyecto. Esta decisión estratégica responde a factores de viabilidad financiera, reducción de riesgos operativos y simplificación del cumplimiento normativo, permitiendo concentrar los recursos en la transformación productiva y consolidación comercial.

Desde la perspectiva de la gestión de la cadena de abastecimiento, la logística se debe entender como un sistema integrado que articula proveedores, procesos internos y clientes finales (Monterroso, 2000). En el caso de los RCD, el modelo se aproxima al concepto de logística inversa, en el cual los residuos retornan al sistema productivo para ser reincorporados como materia prima secundaria, fortaleciendo principios de economía circular (Palacios Moreno et al., 2025).

Adicionalmente, el diseño logístico se ajusta al marco regulatorio colombiano establecido en la Resolución 472 de 2017, modificada por la Resolución 1257 de 2021, y al Decreto 1076 de 2015, los cuales regulan la gestión integral de RCD y las responsabilidades ambientales asociadas.

## **8.2. Logística de recepción de RCD.**

### ***8.2.1 Responsabilidad del generador y abastecimiento.***

La Resolución 472 de 2017 establece que el generador de RCD es responsable de la separación en la fuente y del transporte hasta un gestor autorizado. En coherencia con esta disposición, el modelo planteado evita asumir directamente la operación de transporte externo en la etapa inicial, trasladando dicha responsabilidad al generador o transportador autorizado.

Esto genera varias ventajas como:

- Reduce costos fijos asociados a flota y mantenimiento.
- Disminuye carga administrativa y obligaciones regulatorias.
- Minimiza riesgos jurídicos en transporte de residuos.
- Permite mayor enfoque en eficiencia productiva en la planta.

La literatura en logística inversa indica que la coordinación eficiente con proveedores externos puede ser más rentable en fases iniciales que la internalización completa del transporte (Montes Castillo & Rodríguez López, 2021).

### ***8.2.2. Procedimiento de ingreso en planta***

El proceso de recepción de la planta contempla inicialmente:

- i. Registro del generador.
- ii. Inspección preliminar del material.
- iii. Pesaje cuando sea requerido.
- iv. Descarga en zona segregada.
- v. Clasificación inicial.

### **8.3. Logística interna y flujo operacional.**

Una vez recibido el material es recibido, la logística interna se organiza bajo un esquema lineal y secuencial: recepción → trituración → clasificación → acondicionamiento → fabricación de prefabricados → almacenamiento final.

De acuerdo con Monterroso (2000), la eficiencia logística interna depende de la correcta coordinación entre procesos físicos y control de inventarios. En el contexto de plantas de RCD, la organización del flujo reduce tiempos improductivos, mejora la seguridad industrial y facilita el control ambiental, todo esto traduciéndose en una mayor eficiencia en el proceso productivo.

Las actividades internas incluyen: Separación manual de material inadecuado, trituración y cribado, clasificación por granulometría, almacenamiento temporal organizado, transporte interno mediante cargadores compactos.

Palacios Moreno et al. (2025) destacan que la eficiencia en la fase de clasificación y reincorporación del material es determinante para el éxito de modelos de economía circular. Del mismo modo, el Decreto 1076 de 2015 establece que las actividades productivas deben prevenir impactos ambientales, lo que implica diseñar flujos internos que minimicen la dispersión de material particulado, acumulación de residuos secundarios y riesgos de contaminación.

#### **8.4. Logística de comercialización y distribución de prefabricados**

En la fase inicial, la comercialización se estructurará principalmente bajo un modelo de retiro en planta por parte del cliente, evitando costos asociados a transporte propio.

Este esquema contempla:

- Organización del área de almacenamiento por tipo de producto.
- Programación de cargue para evitar congestiones.
- Registro de salida y facturación formal.
- Coordinación con ferreterías y contratistas locales.

La literatura sobre logística inversa señala que los productos derivados de reciclaje requieren una estrategia de comunicación que resalte su valor ambiental y económico para mejorar su aceptación en el mercado (Palacios Moreno et al., 2025).

Desde la perspectiva regulatoria, la comercialización de prefabricados elaborados con agregados reciclados es viable siempre que cumplan con estándares técnicos aplicables y no contravengan disposiciones ambientales vigentes.

El diseño del plan logístico para la planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye un componente determinante en la viabilidad técnica, financiera y regulatoria del proyecto. La estructura propuesta, basada en un modelo inicial sin flota vehicular propia y con recepción directa de material en planta, responde a un enfoque estratégico orientado a la optimización de recursos, reducción de riesgos operativos y capacidad de ampliación progresiva del negocio.

Desde la perspectiva gerencial, esta decisión permite concentrar la inversión inicial en el núcleo productivo del proyecto que es la transformación de RCD en prefabricados, evitando asumir cargas financieras y regulatorias asociadas al transporte externo. Asimismo, el esquema se encuentra alineado con el marco normativo colombiano vigente, particularmente con lo establecido en la Resolución 472 de 2017 y su modificación mediante la Resolución 1257 de 2021, al reconocer la responsabilidad del generador en el transporte y disposición adecuada del residuo.

El diseño del flujo interno, estructurado bajo un esquema lineal y perimetral con control de acceso, báscula, zona de recepción, áreas de procesamiento y almacenamiento final, permite optimizar tiempos operativos, reducir interferencias entre maquinaria y transporte externo, y mejorar las condiciones de seguridad industrial. Esta organización espacial no solo fortalece la eficiencia operativa, sino que también facilita el control ambiental y la trazabilidad y el flujo del material ingresado y transformado.

Adicionalmente, la estrategia de comercialización basada en retiro en planta y coordinación con clientes locales representa una alternativa coherente con el contexto territorial del proyecto minimiza costos logísticos en etapa temprana, favorece la competitividad del precio final y permite una adaptación gradual a la demanda del mercado, dejando abierta la posibilidad de incorporar flota propia en fases de expansión a futuro.

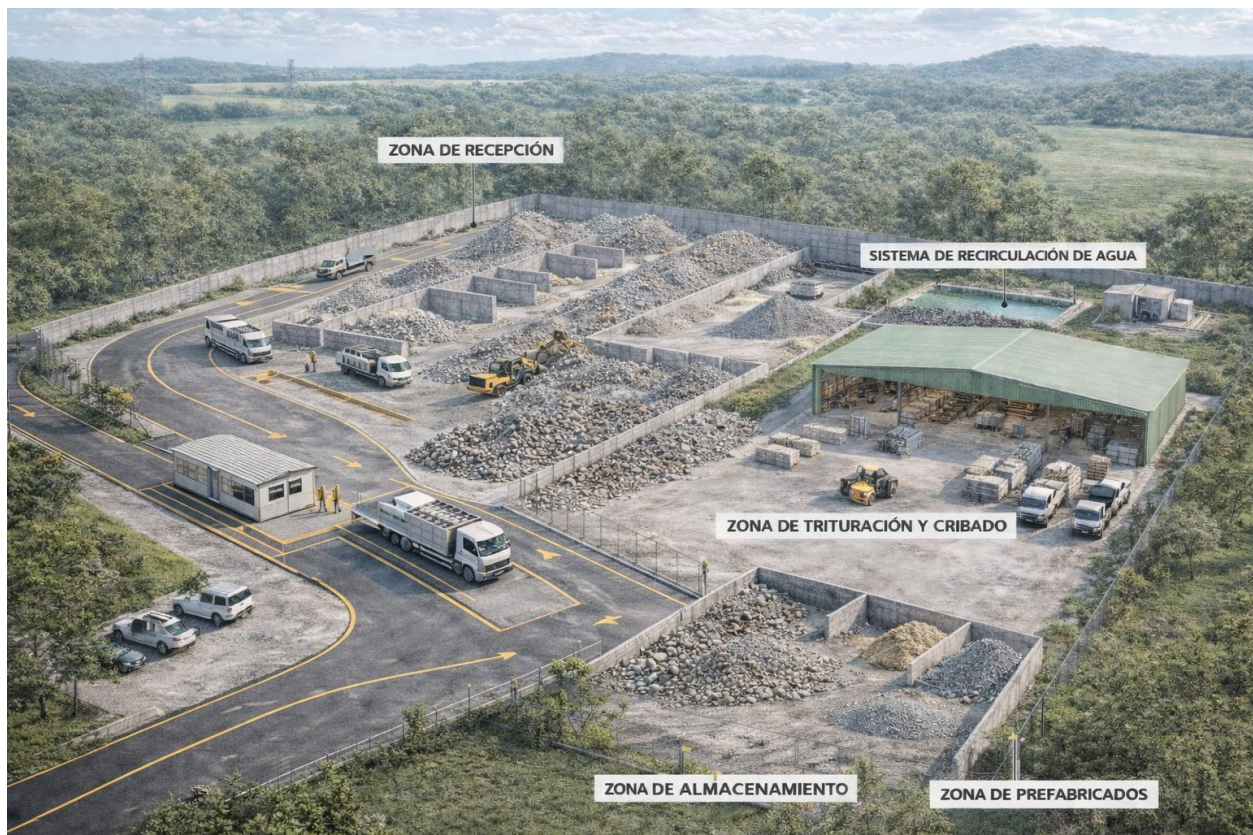
En términos estratégicos, el plan logístico adoptado demuestra coherencia entre sostenibilidad, cumplimiento normativo y recursos financieros. La integración de principios de

logística inversa y economía circular refuerza la propuesta de valor del proyecto, posicionándolo no solo como una alternativa productiva, sino como un modelo alineado con las políticas ambientales nacionales y con las tendencias contemporáneas de gestión sostenible de materiales.

En consecuencia, el plan logístico no solo se limita a una función operativa, sino que se consolida como un elemento estructural del modelo de negocio, garantizando viabilidad, control y capacidad de crecimiento futuro.

**Figura 3.**

*Prototipo conceptual de distribución operativa de la planta de aprovechamiento de RCD*



*Nota: Imagen conceptual elaborada con IA como simulación del diseño logístico y operativo de la planta propuesta.*

El diseño incorpora un flujo vehicular perimetral en sentido único, permitiendo ingreso, pesaje, descarga y salida sin interferencias operativas. Se incluyen zonas diferenciadas para recepción, trituración, almacenamiento y prefabricación, así como sistema de recirculación de agua y oficina administrativa tipo contenedor.

## **9. Lineamientos ambientales aplicados a la planta RCD.**

### **9.1 Revisión documental de normativa colombiana aplicable.**

Con el fin de garantizar que el proyecto se desarrolle en cumplimiento del marco regulatorio vigente y bajo criterios de sostenibilidad ambiental, se realizó una revisión documental de la normativa colombiana aplicable a la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) y a las actividades productivas con potencial impacto ambiental.

Esta revisión permitió identificar las obligaciones legales, responsabilidades operativas y lineamientos técnicos que deben considerarse en el diseño y funcionamiento de la planta de aprovechamiento. Igualmente, facilitó la comprensión del rol del proyecto dentro de la cadena de gestión de RCD, así como los requerimientos relacionados con trazabilidad, manejo adecuado del material, control de impactos y cumplimiento de reportes ante las autoridades ambientales.

Como resultado de esta actividad, se elaboró una matriz normativa que sintetiza las disposiciones más relevantes y su implicación directa para la operación de la planta,

constituyéndose en una herramienta de referencia para la toma de decisiones y el cumplimiento ambiental del proyecto.

**Tabla 6.**

*Resumen normativo e implicaciones para la planta.*

Norma	Requisito (qué exige)	Implicación para la planta (qué debe hacer el proyecto)
Resolución 0472 de 2017 (MinAmbiente)	Define el marco de gestión integral de RCD y obligaciones para actores (generadores/gestores), incluyendo separación, manejo y disposición. (MinAmbiente)	Enmarcar la operación como gestor/instalación de aprovechamiento y ajustar procedimientos internos (recepción, clasificación, almacenamiento, disposición) al esquema de gestión integral de RCD.
Resolución 0472 de 2017 (MinAmbiente)	Establece lineamientos sobre prohibiciones de manejo inadecuado y necesidad de entregar/gestionar RCD dentro de los canales establecidos. (MinAmbiente)	Implementar control de ingreso (inspección y segregación), evitando recibir residuos no conformes y estableciendo reglas claras de aceptación/rechazo del material para prevenir prácticas prohibidas.
Resolución 1257 de 2021 (MinAmbiente)	Modifica la 0472 e incorpora mecanismos de inscripción y reporte (formatos/anexos) para seguimiento a gestores y generadores. (MinAmbiente)	Definir un sistema básico de trazabilidad y reportes (registro de entradas/salidas, origen, cantidades, destino de no aprovechables) y preparar soportes para reportes a la

		autoridad ambiental cuando aplique.
Resolución 1257 de 2021 (MinAmbiente)	Precisa/ordena el tratamiento de RCD no susceptibles de aprovechamiento (p. ej., almacenamiento o con características que impiden su aprovechamiento).  (MinAmbiente)	Establecer un procedimiento para segregar y gestionar RCD no aprovechables: almacenamiento temporal controlado y entrega a gestores/disposición autorizada (sin mezclarlos con flujo aprovechable).
Decreto 1076 de 2015 (Sector Ambiente)	Marco general para permisos y autorizaciones ambientales vinculadas al uso de recursos naturales (según aplique: agua, vertimientos, emisiones, etc.).  (MinAmbiente)	Identificar requisitos específicos según el diseño final: si hay lavado/recirculación, definir cómo se manejarán aguas y lodos; si hay emisiones de polvo/ruido, implementar controles y verificar si se requieren trámites/controles ante autoridad competente.
Decreto 1076 de 2015 (Sector Ambiente)	Principios de prevención y control de impactos ambientales en actividades productivas (control de contaminación y gestión de riesgos ambientales).  (Función Pública)	Incorporar desde el diseño operativo medidas de control: manejo de polvo, ruido, escorrentías, almacenamiento seguro, orden y aseo, y protocolos para contingencias (derrame, acumulación de lodos, quejas comunitarias).

Resolución 0472 de 2017 + Resolución 1257 de 2021	Reafirma la necesidad de gestión y seguimiento de la cadena de RCD (roles, responsabilidades, trazabilidad). (MinAmbiente)	Definir el rol del proyecto como actor de la cadena (gestor/aprovechador) y documentar el flujo: quién entrega, qué se recibe, qué se aprovecha, y qué se dispone; esto respalda sostenibilidad y gobernanza del proceso.
Lineamientos técnicos sectoriales (MinVivienda, documento técnico relacionado)	Lineamientos generales para gestión de residuos en obras civiles (aplicable como referencia técnica para prácticas y formatos). (Minvivienda)	Usar como guía para estructurar procedimientos internos, formatos de control y buenas prácticas operativas (recepción, clasificación, almacenamiento, seguridad y registro).

**Tabla 7.**

*Checklist de cumplimiento inicial.*

Tema	Qué exige la norma	Cómo lo cumple el diseño propuesto	Evidencia/soporte a preparar	Norma
<b>Rol del proyecto</b>	Gestión integral de RCD por gestor/aprovechador	Operación como planta de aprovechamiento con clasificación, tratamiento y reincorporación	Descripción del proceso y flujo (diagrama/layout )	Res. 0472/2017

			productiva			
<b>Trazabilidad del residuo</b>	Registro y control de origen, cantidades y destino	Control de ingreso (registro, inspección, pesaje cuando aplique) y control de salida	Formato de Res. 1257/2021			
<b>Recepción adecuada</b>	Evitar manejo inadecuado y mezcla no permitida	Zona de recepción segregada e inspección visual previa	Procedimiento de aceptación/rechazo	Res. 0472/2017		
<b>Manejo de no aprovechables</b>	Separación y entrega a gestor autorizado	Área señalizada para impropios almacenamiento temporal	Registro de entrega a gestor autorizado	Res. 1257/2021		
<b>Prevención de impactos</b>	Control de emisiones, escorrentías, ruido y riesgos	Flujo perimetral, zonas separadas, polvo y orden operativo	Procedimientos operativos y señalización	Dec. 1076/2015		
<b>Manejo de aguas aplica lavado)</b>	Control de vertimientos y recirculación	Sistema de sedimentación/recirculación y manejo de lodos	Esquema de manejo de aguas y mantenimiento	Dec. 1076/2015		
<b>Seguridad y operación</b>	Prevención de riesgos y control operativo	Rutas internas señalizadas, báscula al ingreso, control de	Plan básico de señalización y EPP	Dec. 1076/2015		

---

accesos				
<b>Reportes/insc</b>	Mecanismos	Preparación de soportes	Carpeta	de Res.
<b>ripción</b>	de reporte y seguimiento	y y registros para reportes	formatos registros	y 1257/2021

---

La revisión normativa permitió identificar los requisitos esenciales para la gestión integral de RCD y traducirlos en controles operativos concretos para la planta, tales como trazabilidad del material, segregación de impropios, control de impactos y cumplimiento de reportes. Este análisis asegura que el diseño propuesto opere bajo los principios de prevención y control ambiental y facilita su implementación conforme a la normativa vigente.

**9.2. Identificación preliminar de impactos ambientales por etapas del proceso.**

Con el fin de reconocer los posibles efectos ambientales asociados a la operación de la planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD), se realizó una identificación preliminar de impactos considerando cada etapa del proceso productivo y logístico. La identificación se fundamenta en guías técnicas ambientales y estudios sobre manejo de RCD y operaciones con materiales particulados, los cuales señalan que las principales afectaciones potenciales se relacionan con emisiones de polvo, ruido, manejo de aguas con sedimentos y disposición de residuos no aprovechables (IFC, 2007; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017; Silva et al., 2022).

**Tabla 8.***Impactos ambientales en el proceso*

Etapa del proceso	Impacto potencial	Medio afectado	Nivel	Medidas de control preliminares
<b>Recepción y descarga de RCD</b>	Emisión de polvo por manipulación del material	Aire	Medio	Humectación del material y control de velocidad vehicular
<b>Recepción y descarga</b>	Ruido por descarga y maniobras de camiones	Ruido	Bajo	Señalización y horarios operativos
<b>Trituración y cribado</b>	Generación de material particulado suspendido	Aire	Alto	Aspersión de agua y cerramientos parciales
<b>Trituración</b>	Emisión de ruido y vibraciones	Ruido	Medio	Mantenimiento preventivo y barreras físicas
<b>Clasificación y separación</b>	Generación de residuos no aprovechables	Suelo	Medio	Segregar y entregar a gestor autorizado
<b>Lavado de agregados (si aplica)</b>	Aguas con sedimentos y lodos	Agua	Medio	Sistema de sedimentación y recirculación
<b>Acopio de agregados reciclados</b>	Arrastre de partículas por lluvia o viento	Suelo / Agua	Bajo	Cubiertas parciales y drenajes adecuados
<b>Producción de prefabricados</b>	Residuos menores de mezcla	Suelo	Bajo	Reincorporación al proceso productivo
<b>Tránsito interno de maquinaria y camiones</b>	Emisión de polvo y ruido	Aire / Ruido	Medio	Riego periódico y señalización interna
<b>Almacenamiento de producto final</b>	Ocupación del suelo	Suelo	Bajo	Organización y rotación del inventario

Los impactos identificados corresponden a los efectos ambientales comúnmente asociados a plantas de tratamiento y aprovechamiento de RCD, así como a operaciones de trituración y manejo de agregados. La valoración cualitativa del nivel de impacto se realizó considerando la probabilidad de ocurrencia y la magnitud potencial, con el fin de priorizar medidas de control y prevención en el diseño operativo.

## 10. Análisis financiero.

El análisis financiero del proyecto se desarrolla con el propósito de evaluar la viabilidad económica preliminar de la implementación de una planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) para la producción de prefabricados. Este análisis permite estimar los requerimientos de inversión inicial, los costos operativos, los ingresos potenciales y el punto de equilibrio necesario para la sostenibilidad del modelo de negocio.

Para efectos de este estudio, se plantea un escenario base de operación a escala inicial, orientado al contexto regional y a la capacidad operativa proyectada. Se asume que el material será transportado por los generadores hasta la planta, evitando la adquisición inicial de flota vehicular propia, lo cual reduce costos de inversión, logística y requerimientos normativos asociados al transporte especializado de residuos.

El modelo contempla el aprovechamiento de RCD mediante procesos de trituración, clasificación y transformación en agregados reciclados y prefabricados para uso constructivo. Este enfoque permite generar valor a partir de residuos, disminuir la presión sobre recursos naturales y alinearse con principios de economía circular.

El análisis considera una infraestructura básica operativa, maquinaria esencial para el procesamiento del material, mano de obra mínima requerida y costos operativos asociados a la operación diaria. Los ingresos se estiman principalmente a partir de la comercialización de prefabricados y materiales reciclados, contemplando además la posibilidad de ingresos por recepción de escombros, dependiendo del esquema tarifario adoptado.

Los valores utilizados corresponden a estimaciones basadas en precios de mercado, referencias de proveedores y estudios similares del sector, con el fin de construir un escenario financiero realista que permita evaluar la sostenibilidad económica del proyecto.

Este análisis no pretende establecer proyecciones financieras definitivas, sino ofrecer una aproximación que permita determinar la factibilidad económica inicial y la viabilidad del modelo propuesto.

### **10.1. Inversión inicial.**

La inversión inicial del proyecto contempla los recursos necesarios para la puesta en marcha de la planta de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD), considerando los elementos fundamentales que garantizan su operatividad en una fase inicial.

Es importante aclarar que, si bien en el apartado técnico se define una configuración completa de maquinaria para una planta de tratamiento de RCD en condiciones óptimas, para efectos del análisis financiero se tiene en cuenta un enfoque de implementación progresiva, priorizando aquellos equipos esenciales que permiten iniciar la operación con una inversión controlada y escalable.

En este sentido, la inversión en terreno se estima en \$120.000.000, correspondiente a un lote ubicado en una zona estratégica para la operación del proyecto. Adicionalmente, se contemplan \$25.000.000 para la adecuación del terreno, lo anterior incluye actividades de nivelación, compactación y acondicionamiento básico para el funcionamiento de la planta.

La maquinaria principal en esta fase inicial da un total aproximado de \$114.000.000 e incluye equipos fundamentales como trituradora de mandíbula, criba vibratoria, banda transportadora, tolva de alimentación, mezclador forzado y báscula, así como un sistema de supresión de polvo que permite mitigar impactos ambientales asociados a la operación.

Además, se consideran \$3.000.000 correspondientes a herramientas y equipos menores necesarios para la operación diaria, y \$7.000.000 destinados a otros costos iniciales como

permisos, adecuaciones menores e imprevistos. Adicionalmente, se contempla la adquisición de un contenedor acondicionado como oficina, con un valor estimado de \$8.000.000, el cual permitirá disponer de un espacio administrativo funcional dentro de la planta, acorde con la operación en etapa inicial.

En total, la inversión inicial del proyecto asciende a \$269.000.000, constituyéndose como una base sólida para el inicio de operaciones, con posibilidad de expansión futura mediante la incorporación de equipos adicionales conforme al crecimiento del negocio.

**Tabla 9.**

*Inversión inicial*

Concepto	Descripción	Valor (COP)
<b>Adquisición de terreno</b>	Lote para instalación de la planta	\$120.000.000
<b>Adecuación del terreno</b>	Nivelación, compactación y acondicionamiento	\$20.000.000
<b>Maquinaria (fase inicial)</b>	Equipos esenciales para operación	\$114.000.000
<b>Equipos y herramientas menores</b>	Carretillas, palas y herramientas	\$3.000.000
<b>Otros costos iniciales</b>	Permisos, imprevistos y adecuaciones	\$5.000.000
<b>Contenedor tipo oficina</b>	Espacio administrativo en planta	\$8.000.000
<b>TOTAL</b>		<b>\$270.000.000</b>

**Tabla 10.**

*Precios de maquinaria (Fase inicial)*

Equipo	Función	Valor (COP)
<b>Trituradora de mandíbula</b>	Trituración primaria	\$45.000.000
<b>Criba vibratoria</b>	Clasificación granulométrica	\$25.000.000
<b>Banda transportadora</b>	Transporte interno de material	\$10.000.000
<b>Tolva de alimentación</b>	Recepción y dosificación del material	\$8.000.000
<b>Mezclador forzado</b>	Preparación de mezcla para prefabricados	\$6.000.000
<b>Báscula puente</b>	Control de ingreso y salida de material	\$15.000.000
<b>Sistema de supresión de polvo</b>	Control ambiental de material particulado	\$5.000.000
<b>TOTAL</b>		<b>\$114.000.000</b>

## **10.2. Costos de operación**

### ***10.2.1 Costos de mano de obra***

Los costos de mano de obra del proyecto fueron estimados con base en la estructura organizativa definida para la operación de la planta, considerando el personal mínimo requerido en la etapa inicial.

Para su cálculo se tuvieron en cuenta los salarios base y las obligaciones laborales correspondientes, de acuerdo con la normatividad vigente. Se consideraron dos operarios de planta, un administrador, un auxiliar administrativo y un contador.

En este orden de ideas, el costo total anual de mano de obra suma un total de \$139.559.730, lo que equivale a un valor mensual aproximado de \$11.629.978. Este valor representa uno de los principales costos del proyecto, dado que incluye el personal operativo y administrativo necesario para garantizar el funcionamiento continuo de la planta. En el apéndice No. A se encuentra detallado estos valores.

### ***10.2.2 Costos operativos y administrativos***

Además de los costos de mano de obra, la operación de la planta requiere una estimación de los costos asociados al funcionamiento diario de los equipos, el consumo de servicios y los gastos administrativos básicos. Para ello, se tomó en cuenta un enfoque simplificado, pero técnicamente sustentado, tomando como referencia la lógica empleada en estudios de viabilidad de plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición ya implementados en la literatura, en los cuales los costos de explotación incluyen, consumo de energía, combustible, agua, mantenimiento y costos fijos varios.

En el caso del presente proyecto, estos costos fueron adaptados a una planta piloto de menor escala que estará en su fase inicial como se ha mencionado anteriormente, por lo cual, no se asumió una operación continua de toda la maquinaria durante toda la jornada laboral, sino un funcionamiento intermitente y racional, acorde con el tamaño del proyecto, la capacidad instalada y la primera etapa del negocio.

**Tabla 11.**

*Estimación de costos operativos mensuales*

Concepto	Descripción	Valor mensual (COP)
<b>Energía eléctrica</b>	Consumo de maquinaria y operación general	\$1.500.000
<b>Agua</b>	Uso en procesos y limpieza	\$300.000
<b>Combustible / apoyo operativo</b>	Uso de maquinaria auxiliar y movimiento interno de materiales	\$2.500.000
<b>Mantenimiento</b>	Reparaciones menores, lubricación y repuestos básicos	\$800.000
<b>Seguridad y EPP</b>	Dotación y elementos de protección personal	\$400.000
<b>Gastos administrativos menores</b>	Papelería, comunicaciones y gastos varios	\$300.000
Total mensual		<b>\$5.800.000</b>
Total anual		<b>\$69.600.000</b>

- **Energía eléctrica:** El valor de \$1.500.000 mensuales corresponde al consumo eléctrico asociado al funcionamiento de los equipos principales de la planta, especialmente trituradora, criba vibratoria, banda transportadora, mezclador forzado, báscula y servicios auxiliares. No se asume que todos los equipos operen simultáneamente ni durante la totalidad de la jornada, sino por ciclos de trabajo según las etapas del proceso: recepción, trituración, cribado, mezcla y moldeo. En términos operativos, esto significa que los equipos se encienden durante el desarrollo de las actividades del día y se apagan al finalizar la jornada, así como en los momentos de espera, mantenimiento o cambio de operación. Por ello, el

costo estimado no representa una carga industrial alta, sino una demanda moderada propia de una planta de pequeña escala.

- Agua: El valor de \$300.000 mensuales se estimó para cubrir el uso básico de agua en actividades como humectación del material para control de polvo, limpieza de áreas operativas y apoyo a procesos productivos que requieran condiciones mínimas de lavado o control ambiental. En el proyecto, el lavado del material se concibe como una actividad opcional y no permanente, por lo cual no se prevea un consumo alto.
- Combustible y apoyo operativo: El valor de \$2.500.000 mensuales corresponde al consumo de combustible asociado al uso de equipos de apoyo para el movimiento interno del material, tales como minicargador, cargador alquilado o maquinaria auxiliar empleada para la alimentación de la trituradora, movilización de acopios y organización de materiales dentro de la planta. Este rubro no implica que exista una flota propia ni operación logística externa, pues el modelo ya definió que los residuos llegan directamente a la planta por cuenta del generador. En este caso, el combustible responde únicamente a la operación interna. Su valor se justifica considerando un uso periódico durante la jornada laboral, especialmente en actividades de cargue, descargue, acomodo y alimentación de equipos, sin que esto signifique funcionamiento constante durante todo el día.
- Mantenimiento: El costo de \$800.000 mensuales se proyectó como un valor de mantenimiento preventivo y correctivo menor de la maquinaria principal y de los equipos auxiliares. Este rubro incluye actividades como lubricación, revisión de piezas de desgaste, ajustes mecánicos, cambio de correas, limpieza técnica,

reposición de elementos menores y reparaciones básicas derivadas del uso normal de los equipos. No corresponde a reposiciones mayores ni a fallas estructurales de maquinaria pesada, sino al mantenimiento periódico necesario para garantizar continuidad operativa y reducir el riesgo de paradas no programadas.

- Seguridad industrial y elementos de protección personal: El valor de \$400.000 mensuales cubre la reposición y adquisición de elementos de protección personal, tales como cascos, guantes, botas, tapabocas, gafas y otros implementos requeridos para la operación segura del personal dentro de la planta. Asimismo, puede incluir señalización menor y reposición de implementos básicos para la prevención de riesgos. Su inclusión es coherente con la naturaleza del proceso, ya que la planta trabaja con trituración, material particulado y movimiento de equipos, lo que exige condiciones mínimas de seguridad para el personal operativo.
- Gastos administrativos menores: Por último, se estimó un valor de \$300.000 mensuales para cubrir gastos administrativos menores, incluyendo papelería, impresiones, comunicaciones, transporte ocasional y otros consumos básicos asociados a la gestión diaria del proyecto. Este rubro se mantuvo bajo, dado que la planta operará con una estructura administrativa liviana y que los costos administrativos principales ya se encuentran integrados en la mano de obra.

Los costos operativos y administrativos suman \$5.800.000 mensuales, equivalentes a \$69.600.000 anuales. Esta cifra corresponde a un escenario moderado y razonable para una planta de aprovechamiento de RCD en etapa inicial, donde la maquinaria no opera de manera

continua durante toda la jornada, sino conforme a la demanda real de material y al flujo operativo proyectado.

**Tabla 12.**

*Total costos de operación*

Concepto	Valor anual (COP)
<b>Mano de obra</b>	\$139.559.730
<b>Costos operativos y administrativos</b>	\$69.600.000
<b>Total costos de operación</b>	<b>\$209.159.730</b>

### 10.3 Ingresos del proyecto.

Los ingresos del proyecto se estructuran a partir de un modelo de negocio basado en la economía circular, en el cual los residuos de construcción y demolición (RCD) no solo representan una materia prima para la producción de nuevos materiales, sino también una fuente directa de ingresos mediante su recepción en la planta.

En este sentido, el proyecto contempla dos fuentes principales de ingreso: la comercialización de productos derivados del aprovechamiento de RCD, tales como bloques, adoquines y agregados reciclados, y el cobro por la recepción de estos residuos.

Esta doble fuente de ingresos permite fortalecer la sostenibilidad financiera del modelo, el proyecto no depende exclusivamente de la venta de productos, sino que también genera valor a partir del servicio de gestión de residuos.

#### 10.3.1 Ingreso por venta de productos

**Tabla 13.**

*Ventas por productos*

Producto	Unidad	Cantidad mensual	Precio unitario (COP)	Ingreso mensual (COP)
<b>Bloques</b>	Unidad	5.000	\$2.500	\$12.500.000

<b>Adoquines</b>	Unidad	2.000	\$3.000	\$6.000.000
<b>Agregados reciclados</b>	m <sup>3</sup>	100	\$50.000	\$5.000.000
Total ingresos por productos				<b>\$23.500.000</b>

Para la estimación de los ingresos por venta de productos, se definió un escenario de producción mensual acorde con la capacidad operativa inicial de la planta, considerando una operación progresiva y no a máxima capacidad.

En el caso de los bloques, se proyecta una producción mensual de 5.000 unidades, con un precio estimado de \$2.500 por unidad, valor competitivo dentro del mercado local de materiales de construcción.

Para los adoquines, se estima una producción de 2.000 unidades mensuales, con un precio de \$3.000 por unidad, considerando su valor agregado y su uso en proyectos de urbanismo y espacio público.

Por su parte, los agregados reciclados se estiman en una producción de 100 m<sup>3</sup> mensuales, con un precio de \$50.000 por metro cúbico, valor que resulta competitivo frente a agregados naturales, especialmente en aplicaciones no estructurales.

Sumando los ingresos provenientes de la venta de prefabricados y del servicio de recepción de RCD, el proyecto puede generar aproximadamente \$23.500.000 mensuales, equivalente a \$357.000.000 anual, lo cual refleja un escenario conservador y coherente con la etapa inicial del proyecto.

### ***10.3.2 Ingresos por recepción de RCD.***

**Tabla 14.***Ventas por recepción de RCD*

Concepto	Cantidad	Valor unitario (COP)	Total mensual (COP)
<b>Recepción de escombros</b>	125 viajes/mes	\$50.000	\$6.250.000

El proyecto contempla ingresos derivados del cobro por la recepción de residuos de construcción y demolición. Este ingreso se fundamenta en la necesidad del sector construcción de disponer adecuadamente los escombros, cumpliendo con la normativa ambiental vigente y evitando sanciones por disposición inadecuada.

Para el escenario base, se estima una recepción promedio de cinco viajes diarios durante veinticinco días al mes, lo que equivale a un total de 125 viajes mensuales. Se establece una tarifa de \$50.000 por viaje, valor competitivo en el mercado local y que busca incentivar la utilización del servicio.

Bajo estos supuestos, los ingresos mensuales por este concepto ascienden a **\$6.250.000**, constituyéndose en una fuente complementaria clave dentro del modelo de negocio.

### 10.3.3. Ingresos totales del proyecto.

**Tabla 15.***Total ingresos*

Concepto	Ingreso mensual (COP)
<b>Venta de productos</b>	\$23.500.000
<b>Recepción de RCD</b>	\$6.250.000
<b>Total ingresos</b>	<b>\$29.750.000</b>

En conjunto, los ingresos totales del proyecto se estiman en \$29.750.000 mensuales, lo que equivale a \$357.000.000 anuales.

Este resultado evidencia la viabilidad de un modelo basado en el aprovechamiento de residuos, donde la generación de valor se produce tanto en la transformación del material como en la prestación del servicio de disposición. Es importante señalar que, la diversificación de ingresos permite mejorar la estabilidad financiera del proyecto y reducir riesgos asociados a la variabilidad de la demanda.

#### **10.4 Punto de equilibrio.**

El punto de equilibrio es un indicador financiero que permite determinar el nivel mínimo de operación en el cual los ingresos totales de un proyecto son iguales a sus costos totales, es decir, el punto a partir del cual la empresa no presenta ni pérdidas ni ganancias. Este concepto es ampliamente utilizado en la evaluación de proyectos, ya que permite identificar el volumen de ventas necesario para cubrir los costos fijos y variables, constituyéndose en una herramienta clave para la toma de decisiones financieras.

De acuerdo con la literatura especializada, el análisis del punto de equilibrio facilita la comprensión de la relación entre costos, volumen y utilidades, permitiendo evaluar la viabilidad de un modelo de negocio y estimar el riesgo asociado a variaciones en la demanda (Monterroso, 2000). Del mismo modo, autores como Garrison, Noreen y Brewer (2018) señalan que este indicador es fundamental para establecer estrategias de operación, al proporcionar una referencia clara del nivel mínimo de ventas requerido para alcanzar la sostenibilidad financiera.

$$\text{Punto de equilibrio (\%)} = \text{Costos totales} / \text{Ingresos totales.}$$

En este caso, tenemos ingresos mensuales de \$29.750.000 y costos mensuales de \$17.429.978, por lo cual el punto de equilibrio es igual al 59% de las ventas proyectadas, esto significa que el proyecto alcanza su punto de equilibrio al operar aproximadamente al 59% de su nivel de ventas proyectado, lo que significa que a partir de este nivel el proyecto comienza a generar utilidades. Esto significa que no sería necesario trabajar a toda la capacidad para cubrir los costos totales de la operación, lo cual es muy importante en su etapa inicial, donde la producción y la comercialización suelen crecer de forma gradual mientras el mercado se familiariza con el uso de materiales reciclados.

Adicionalmente, al comparar el punto de equilibrio con el nivel de operación proyectado, se observa que el proyecto contempla una utilización aproximada del 72% de su capacidad productiva, lo que representa un margen de seguridad cercano al 13%.

Este margen permite absorber posibles variaciones en la demanda o en la operación sin comprometer la sostenibilidad financiera del proyecto, evidenciando una estructura de costos adecuada y un modelo de negocio robusto en condiciones normales de funcionamiento.

Lo anterior demuestra que el modelo de negocio presenta una adecuada relación entre ingresos y costos, permitiendo generar utilidades en niveles de operación normales.

Con el fin de complementar el análisis del punto de equilibrio, se realizó una estimación del tiempo requerido para recuperar la inversión inicial del proyecto, a partir de los flujos de caja proyectados. Considerando una inversión inicial de aproximadamente \$270.000.000 y una utilidad mensual estimada cercana a \$12.300.000, se proyecta que el proyecto alcanzaría la recuperación de la inversión en un periodo aproximado de 22 meses, es decir casi dos años.

Este resultado indica que, bajo las condiciones planteadas, el proyecto podría alcanzar su punto de equilibrio financiero en un horizonte cercano a dos años, lo cual resulta razonable para un modelo de negocio en etapa inicial que contempla una implementación progresiva y un crecimiento gradual en su operación.

Es importante resaltar que esta estimación se basa en un escenario constante de ingresos y costos, por lo que puede variar en función del comportamiento real del mercado, la demanda y la eficiencia operativa del proyecto.

Lo anterior evidencia que el proyecto no solo es viable desde el punto de vista operativo, sino también financieramente sostenible en el mediano plazo.

#### **10.5. Tasa Interna de Retorno.**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión, representando la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros con la inversión inicial, es decir, aquella tasa que hace que el valor presente neto (VPN) sea igual a cero.

Este indicador es ampliamente utilizado en la evaluación de proyectos, ya que permite medir la eficiencia del capital invertido y comparar diferentes alternativas de inversión. De acuerdo con la literatura financiera, un proyecto es considerado viable cuando la TIR es superior al costo de oportunidad del capital o tasa mínima aceptable de rendimiento (Ross et al., 2018). Igualmente, autores como Sapag Chain (2011) señalan que la TIR constituye una herramienta fundamental en la toma de decisiones, al reflejar la capacidad del proyecto para generar retornos en el tiempo.

Para la estimación de la TIR del proyecto, se definieron los siguientes supuestos:

- Inversión inicial: \$270.000.000
- Ingresos mensuales constantes: \$29.750.000
- Costos mensuales constantes: \$17.429.978
- Utilidad mensual estimada: \$12.300.000
- Utilidad anual estimada: \$147.600.000
- Horizonte de evaluación: 5 años

Se asume un comportamiento estable de los ingresos y costos durante el periodo analizado, sin considerar inflación ni variaciones significativas en la demanda, con el fin de simplificar el modelo y obtener una estimación aproximada de la rentabilidad del proyecto.

Con base en los flujos de caja proyectados y los supuestos definidos, se estimó una Tasa Interna de Retorno (TIR) aproximada en un rango entre 52% y 56%, considerando una inversión inicial de \$270.000.000 y un horizonte de evaluación de cinco años.

Este resultado evidencia una alta rentabilidad del proyecto, al superar las tasas de referencia del mercado y el costo de oportunidad del capital, lo cual lo posiciona como una alternativa atractiva desde el punto de vista financiero.

A su vez, este indicador es afín con el periodo de recuperación estimado, cercano a dos años, reflejando una rápida generación de flujos de caja positivos. No obstante, es importante señalar que esta estimación corresponde a un escenario proyectado bajo condiciones de operación constantes, por lo que su comportamiento real puede variar en función de factores como la demanda, los costos operativos y las condiciones del entorno económico.

## 10.6. Análisis de escenarios.

Con el fin de evaluar la resiliencia y la sensibilidad del proyecto frente a distintos eventuales escenarios que se pueden presentar o diferentes variaciones del entorno, se plantean los siguientes planteamientos:

### *10.6.1. Escenario regulatorio: Restricción normativa al uso de RCD como materia prima*

Se plantea un escenario conservador en el cual, por cambios regulatorios o gubernamentales, técnicos o ambientales, se limite o prohíba el uso de ciertos RCD como insumo para la producción de prefabricados. Este escenario no implica necesariamente el cierre del negocio, pero sí obliga a modificar su estructura operativa y comercial.

El impacto sobre el modelo de negocio afectaría directamente la propuesta de valor del proyecto, especialmente en lo que está relacionado con la producción de prefabricados a partir de los materiales reciclados.

Los principales impactos serían:

- Reducción o eliminación de la línea de producción basada en agregados reciclados.
- Disminución de ingresos asociados a la venta de prefabricados.
- Afectación de los indicadores financieros, como la TIR y el periodo de recuperación.
- Pérdida parcial del componente diferenciador ambiental del modelo.

No obstante, el proyecto no necesariamente dejaría de ser viable, ya que podría mantener su operación como gestor formal de recepción, clasificación y disposición de RCD, conservando una fuente de ingresos estable asociada a este servicio. En este contexto, el modelo de negocio

podría adaptarse manteniendo la línea de recepción y gestión de RCD, mientras se ajusta la producción de prefabricados mediante el uso de materiales alternativos. Esta capacidad de adaptación permite evidenciar que el proyecto no depende exclusivamente del aprovechamiento directo de los residuos, sino que puede reconfigurarse para mantener su viabilidad bajo condiciones regulatorias cambiantes.

#### ***10.6.2. Escenario de mercado: Disminución en la demanda de prefabricados.***

Se plantea un escenario en el cual la demanda de prefabricados disminuye como resultado de una desaceleración del sector construcción, asociada a factores macroeconómicos como el aumento en las tasas de interés, la inflación en materiales y la reducción en la inversión pública y privada.

Como sustento a que se pueda presentar el anterior escenario se puede basar en que el sector de la construcción presenta un comportamiento cíclico y altamente dependiente de las condiciones macroeconómicas. En Colombia, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística ha evidenciado que indicadores como el área licenciada para construcción y la iniciación de obras tienden a disminuir en contextos de desaceleración económica, afectando directamente la demanda de materiales de construcción (DANE, 2023).

De igual forma, la Cámara Colombiana de la Construcción ha señalado que variables como el incremento en tasas de interés, el encarecimiento de insumos y las restricciones en el acceso al crédito inciden negativamente en la dinámica del sector, generando una reducción en la ejecución de proyectos constructivos (Camacol, 2022).

En este contexto, los materiales alternativos, como los prefabricados elaborados a partir de RCD, pueden verse particularmente afectados en escenarios de reducción del mercado, debido a la preferencia por materiales tradicionales y a la disminución de la actividad constructiva.

Bajo este escenario, el proyecto podría experimentar:

- Disminución en los ingresos por venta de prefabricados.
- Afectación en el flujo de caja operativo.
- Incremento en el periodo de recuperación de la inversión.
- Reducción de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

No obstante, el modelo presenta una ventaja al contemplar una fuente adicional de ingresos asociada a la recepción de residuos de construcción, lo cual permite compensar parcialmente la caída en la demanda de productos.

Como medidas de mitigación a este escenario se propone: Diversificación del portafolio de clientes, incluyendo obras públicas y proyectos de urbanismo, enfoque en productos no estructurales con demanda más estable, ajuste de la capacidad productiva en función del comportamiento del mercado, fortalecimiento de ingresos por recepción de RCD y estrategias de precios competitivos frente a materiales tradicionales.

### ***10.6.3. Escenario de costos: Incremento en los costos operativos.***

Se plantea un escenario en el cual los costos operativos del proyecto aumentan debido a variaciones en los precios de la energía, combustibles, mantenimiento de maquinaria y costos laborales, factores que inciden directamente en la operación de la planta.

Como sustento del planteamiento anterior se tiene que las actividades industriales y productivas están directamente influenciadas por el comportamiento de los costos energéticos y logísticos. En Colombia, la Unidad de Planeación Minero-Energética ha señalado que los costos de energía representan un componente relevante dentro de la estructura de costos de procesos productivos que dependen de maquinaria y equipos industriales (UPME, 2022).

Además, el Ministerio de Minas y Energía ha documentado variaciones en los precios de los combustibles, lo que impacta de manera directa los costos de transporte y operación en sectores relacionados con la construcción (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

En este sentido, proyectos como el propuesto, que dependen del uso de maquinaria para trituración y procesamiento de materiales, se encuentran expuestos a las variaciones en los costos operativos que dependen del entorno económico.

En este escenario, el proyecto podría presentar:

- Incremento en los costos operativos totales.
- Reducción en los márgenes de utilidad.
- Disminución de la rentabilidad del proyecto (TIR).
- Aumento en el punto de equilibrio.

Algunas estrategias que se pueden implementar para mitigar estos impactos pueden ser: Optimización del uso de maquinaria y recursos energéticos, implementación de mantenimiento preventivo, revisión periódica de la estructura de costos, ajuste progresivo de precios de venta.

### **10.7. Conclusión financiera.**

El análisis financiero desarrollado permitió evaluar la viabilidad económica del proyecto a partir de la estimación de la inversión inicial, los costos operativos y los ingresos proyectados. En este aspecto, se determinó una inversión inicial aproximada de \$270.000.000, junto con una estructura de costos coherente con una operación en etapa inicial.

Los resultados evidencian que el proyecto alcanza su punto de equilibrio al operar alrededor del 59% de su nivel de ventas proyectado, lo cual refleja una adecuada relación entre ingresos y costos. Además, se estimó un periodo de recuperación de la inversión cercano a los 22 meses, indicando una generación temprana de flujos positivos.

De igual forma, la Tasa Interna de Retorno estimada, superior al 50%, demuestra un alto nivel de rentabilidad, posicionando el proyecto como una alternativa atractiva desde el punto de vista financiero.

A partir de estos resultados se logra concluir que el modelo de negocio propuesto es económicamente viable, con una estructura financiera sólida y capacidad para sostener su operación en el mediano plazo.

## **11. Conclusiones**

El desarrollo del presente trabajo permitió estructurar un modelo de negocio integral orientado a la gestión sostenible de residuos de construcción y demolición (RCD), teniendo en cuenta los componentes técnicos, ambiental, de mercado y financiero. A partir del análisis realizado, se identificó una problemática relevante asociada a la disposición inadecuada de estos

residuos, así como una oportunidad concreta para su aprovechamiento mediante la transformación en materiales prefabricados.

En el ámbito del mercado, se evidenció la existencia de una demanda potencial tanto para la disposición de RCD como para el uso de materiales alternativos en la construcción, especialmente en aplicaciones no estructurales. Asimismo, el análisis de competencia y el desarrollo del focus group permitieron identificar brechas en la oferta actual, destacando la necesidad de soluciones formales, accesibles y ambientalmente responsables en la región.

Desde el componente técnico, se definió un proceso productivo coherente con las características del material y las condiciones del entorno, junto con una selección de maquinaria ajustada a una implementación progresiva. Este enfoque permite iniciar operaciones con una estructura eficiente, facilitando el crecimiento del proyecto conforme aumente la demanda y la capacidad operativa.

En términos ambientales, el modelo propuesto contribuye directamente a la reducción de impactos negativos asociados a la disposición inadecuada de RCD, promoviendo su reincorporación en el ciclo productivo y alineándose con los principios de economía circular y sostenibilidad. De esta manera, el proyecto no solo responde a una necesidad operativa del sector construcción, sino que también aporta a una gestión responsable de los recursos y al cumplimiento de los lineamientos ambientales vigentes.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo permitió identificar que el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición no solo representa una oportunidad ambiental, sino también una alternativa viable desde el punto de vista técnico y económico. A lo largo del análisis se evidenció que, bajo las condiciones planteadas, es posible estructurar un modelo de negocio que combine la gestión responsable de los residuos con la producción de materiales

útiles para el sector de la construcción. Si bien el proyecto se plantea inicialmente a una escala moderada, su diseño permite crecer de manera progresiva a medida que aumente la disponibilidad de residuos y la demanda de prefabricados reciclados en la región.

### Referencias Bibliográficas

Asociación Colombiana de Universidades. (2023). *Gestión de residuos de construcción en Colombia: Un problema ambiental con vacíos normativos*. ASCUN. <https://ascun.org.co/noticias-ies/gestion-de-residuos-de-construccion-en-colombia-un-problema-ambiental-con-vacios-normativos/>

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2015). *Decreto 586 de 2015: Modelo eficiente y sostenible de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD)*.

Alcaldía Municipal de Bucaramanga. (2016). *Plan de gestión integral de residuos sólidos: Bucaramanga 2016–2027*. [https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/PLAN\\_DE\\_GeSTION\\_INTEGRAL\\_DE\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_BUCARAMANGA\\_2016-2027.pdf](https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/PLAN_DE_GeSTION_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_BUCARAMANGA_2016-2027.pdf)

Cabrera Trujillo, H. G. (2020). *Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición para la producción de materiales prefabricados* [Trabajo de grado].

Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol). (2022). *Informe económico del sector de la construcción en Colombia*.

Colorado, H. A., et al. (2022). *Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia*. Sustainability.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2022). *Informe nacional de economía circular en construcción*. Bogotá.

Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS). (s. f.). *Residuos de construcción y demolición (RCD) – Trámites y requisitos*. <https://cas.gov.co/tramites-y-servicios/rcd/>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). *Estadísticas del sector construcción en Colombia*.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). *Proyecciones municipales de población*.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). *Política nacional de edificaciones sostenibles (CONPES 3919)*.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3919.pdf>

Fuentes Pumarejo, L. G., Pacheco Bustos, C. A., Rodón Quintana, H. A., & Sánchez Cotte, É. H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para Barranquilla. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533–555.  
<https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10674>

García, L., Mendoza, P., & Ríos, J. (2021). Propiedades mecánicas de adoquines con árido reciclado. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 23(2), 55–68.

Garrison, R. H., Noreen, E. W., & Brewer, P. C. (2018). *Contabilidad administrativa* (16.ª ed.). McGraw-Hill.

ICONTEC. (2005). *NTC 174: Agregados. Clasificación y requisitos*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC. (2014). *NTC 6093: Etiquetas ambientales tipo I. Criterios ambientales para prefabricados en concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

International Finance Corporation (IFC). (2007). *Environmental, health, and safety (EHS) guidelines*. World Bank Group.

Legis Comex. (2024). *Análisis de mercados internacionales: productos minerales y sus manufacturas*. Legis Información Profesional.

Ley 99 de 1993. (1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y el SINA. Diario Oficial No. 41.146.

Ley 1333 de 2009. (2009). Procedimiento sancionatorio ambiental. Diario Oficial No. 47.417.

Logyca & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022). *Logística inversa de residuos de construcción y demolición (RCD)*. <https://logyca.com/sites/default/files/documentos-recursos/Informe-Ejecutivo-RCD-DNP.pdf>

Máster en Ingeniería Ambiental. (2007). *Residuos de construcción y demolición* [Material académico].

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 0472 de 2017: Gestión integral de RCD*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1257 de 2021: Modificación de la Resolución 0472 de 2017*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Informe de gestión: Flujo de materiales de construcción y economía circular*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-de-Gestion-Minambiente-2021-VF-PUBLIC.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). *Flujo de materiales de construcción – Economía circular*. <https://economiacircular.minambiente.gov.co/>

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Evolución de precios de combustibles en Colombia*.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de RCD*.

Monterroso, E. (2000). *El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento*.  
Universidad Nacional de Luján.

Naciones Unidas. (2015). *Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*.  
<https://sdgs.un.org/es/2030agenda>

Palacios Moreno, J. J., Izurieta Recalde, C. W., & Vega Flor, J. G. (2025). Logística inversa y economía circular. *Perspectivas Sociales y Administrativas*.

Quijano, A. M., Díez-Silva, M., Montes-Guerra, M., & Castro-Silva, M. (2014). Reciclaje de residuos siderúrgicos. *Revista EAN*, (77), 82–103.

Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. (2018). *Finanzas corporativas* (11.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Sapag Chain, N. (2011). *Evaluación de proyectos de inversión en la empresa* (2.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *Resolución 2397 de 2011: Tratamiento de escombros*.

Secretaría Distrital de Planeación. (2023). *Decreto 507 de 2023: Gestión de RCD en Bogotá*. <https://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/reglamentacion/decreto/decreto-507-de-2023-gestion-integral-residuos-de-construccion-y-demolicion>

Silva, R. V., Neves, R., & de Brito, J. (2022). Construction and demolition waste recycling. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131927.

Universidad Industrial de Santander (UIS). (2024). *Plan de negocios para reciclaje de RCD en Bucaramanga*. <https://noesis.uis.edu.co/>

Veolia. (2025, abril 11). *Barrancabermeja más limpia y sostenible*. <https://www.santander.veolia.co/medios-comunicacion/noticias/barrancabermeja-limpia-sostenible-60-mil-toneladas-residuos-son>

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2022). *Análisis del comportamiento de los costos energéticos en Colombia*.

UNE-EN 206. (2016). *Hormigón: Especificación, producción y conformidad*.

UNE-EN 1097-6. (2013). *Ensayos de propiedades físicas de los áridos*.