

**Evaluación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de Adoquines Fabricados con Material Proveniente de Escombrera de la Ciudad de Popayán**



**Ing. Andrés Felipe Astudillo Sanjuán**  
**Ing. Rodrigo José González Ortega**

**Universidad del Cauca**  
**Facultad de Ingeniería Civil**  
**Popayán, 2023**

**Evaluación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de Adoquines Fabricados con Material  
Proveniente de Escombrera de la Ciudad de Popayán**



**Proyecto de Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería de la  
Construcción  
Modalidad: Trabajo de Profundización**

**Ing. Andrés Felipe Astudillo San Juan  
Ing. Rodrigo José González Ortega  
Estudiantes**

**Henry Mauricio Muñoz Tróchez  
Director de Investigación**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Popayán, 2023**

## **Nota de Aceptación**

Este trabajo ha sido revisado y analizado, encontrándose que reúne los requisitos exigidos de elaboración y presentación, por lo cual se notifica su aceptación

---

**Jurado**

---

**Jurado**

## **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado a todas aquellas personas que creyeron y apoyaron durante todo el proceso.

En primer lugar, a las familias, quienes siempre han brindado su confianza y apoyo incondicional. Sin su apoyo y sacrificio, no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

En segundo lugar, a la universidad, quienes nos brindaron su conocimiento y apoyo, en cada una de las etapas del proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron con este trabajo de grado.

## **Agradecimientos**

Estimados miembros del jurado evaluador de mi trabajo de grado:

Queremos agradecer por el importante papel que a lo largo de todo el trabajo han desempeñado, por su tiempo y por transmitirnos su conocimiento, han contribuido a culminar la investigación y al crecimiento académico en nuestras carreras.

Nos gustaría expresar un agradecimiento especial al director de trabajo de grado, por su orientación, compromiso y apoyo durante todo el proceso de investigación, gracias a su conocimiento y experiencia logramos llevar a feliz término nuestro trabajo.

Por último, expresamos nuestro agradecimiento y gratitud a nuestras familias por su incondicional apoyo a lo largo de todo este proceso académico.

Una vez más, muchas gracias por su tiempo, dedicación y retroalimentación estamos agradecidos por esta experiencia única y enriquecedora.

## Resumen

El desarrollo de actividades de construcción o remodelación en las obras civiles en un sitio determinado, generan gran cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD), provocando la contaminación del suelo, agua, aire y paisaje que, a su vez, contribuye al agotamiento de los recursos naturales.

Este estudio de caso describe el ejercicio experimental de reutilización de los RCD en un porcentaje considerable en la elaboración de adoquines, previo análisis de las características físicas y mecánicas de estos residuos, que permitan cumplir las normas técnicas colombianas y con ello, se pueda contribuir a la disminución de los efectos ambientales por la disposición final, así como, la generación de una alternativa de empleo para familias en la ciudad de Popayán y, finalmente, suministrar este material de adoquines requerido en las obras de desarrollo vial.

Por tal razón el objeto de este estudio de caso, es elaborar adoquines con RCD, previo análisis de las características físicas y mecánicas, para lo cual, se recurrirá al método experimental para cumplir con las normas técnicas nacionales, identificando aspectos tecnológicos e investigativos sobre prácticas de aprovechamiento y disposición final.

**Palabras Clave:** RCD, Aprovechamiento de Residuos, Adoquines

## **Abstract**

The development of construction or remodeling activities in civil works at a given site generates a large amount of construction and demolition waste (CDW), causing soil, water, air and landscape contamination, which in turn contributes to the depletion of natural resources.

This research describes the experimental exercise of reusing CDW in the production of paving stones, after analyzing the physical and mechanical characteristics of these wastes, which will make it possible to comply with Colombian technical standards and thus contribute to the reduction of the environmental effects of final disposal, as well as the generation of an alternative employment for families in the city of Popayán and, finally, to supply this paving stone material required in road development works.

For this reason, the purpose of this research is to elaborate paving blocks with CDW, after analyzing the physical and mechanical characteristics, for which the experimental method will be used to comply with the national technical standards, identifying technological and research aspects on utilization and final disposal practices.

**Key words:** RCD, Waste Utilization, Paving Blocks.

## Contenido

Introducción .....	1
I. Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Pregunta Problema .....	6
1.2. Hipótesis.....	6
1.3. Variables.....	6
1.4. Alcance del Trabajo de Profundización .....	7
II. Justificación.....	8
2.1. Justificación Técnica .....	8
2.2. Justificación Académica.....	10
2.3. Justificación Ambiental.....	10
III. Objetivos .....	11
3.1. Objetivo General .....	11
3.2. Objetivos Específicos.....	11
IV. Marco Teórico .....	12
4.1. Estado del Arte .....	12
4.2. Marco Conceptual .....	18
V. Metodología .....	22
5.1. Enfoque de la Investigación .....	22
5.2. Tipo de Estudio .....	23
5.3. Fases de la Investigación.....	24
5.4. Localización del Estudio .....	24
5.5. Instrumentos para la Recolección de Datos .....	25
5.6. Técnicas de Sistematización y Análisis de Datos .....	26
VI. Resultados.....	27
6.1. Análisis de las características y propiedades de los componentes de los RCD depositados en la Escombrera de Popayán, determinando la factibilidad de reutilización.....	29
6.1.1. Revisión bibliográfica y documental sobre RCD, en repositorios universitarios institucionales Verificación en campo.....	30

6.1.2. Cuantificación de la generación de RCD y dispuestos en la Escombrera en la ciudad de Popayán.....	31
6.1.3. Análisis de laboratorio para RCD.....	31
6.2. Ensayos de Caracterización de Material de RCD .....	34
6.2.1. Ensayo 1. Determinación de humedad NTC 1776 o INV E -12213.....	34
6.2.2. Ensayo 2: Análisis granulométrico NTC 77 o INV E -213 y 214 -2013.....	34
6.2.3. Ensayo 3: Densidad relativa (gravedad específica) y absorción NTC 237 o INV E -222 - 13 35	
6.2.4. Ensayo 4: Resistencia al desgaste NTC 98 o INV E - 218 Y 219 - 13.....	36
6.2.5. Ensayo 4: Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable NTC 589 o INV E - 211 - 13 .....	36
6.2.6. Ensayo 6: Equivalente de arena de suelos y agregados finos NTC 6179 o INV E - 133 - 13 37	
6.2.7. Ensayo 7: Impurezas orgánicas NTC 127 o INV E - 212 - 13 .....	38
6.2.8. Objetivo: Procedimiento para determinar de manera aproximada la presencia de impurezas orgánicas nocivas en arenas. Su propósito general es advertir sobre la presencia de impurezas organizas nocivas en el agregado fino.....	38
6.2.9. Peso unitario NTC 92 o INV E - 217 - 13 .....	38
6.3. Estimación mediante pruebas de laboratorio, la composición de mezcla requerida en la elaboración de los adoquines en cumplimiento de las Normas Técnicas Colombianas (NTC)	39
6.3.1. Muestra patrón.....	39
6.4. Realización de pruebas de resistencia verificando mediante el análisis de ciclo de vida la reducción de los impactos ambientales negativos durante la elaboración de adoquines. ....	47
6.4.1. Normatividad referente sobre la fabricación de adoquines .....	47
6.4.2. Normatividad referente sobre gestión ambiental de RCD.....	52
6.4.3. Pruebas de resistencia para verificar el ciclo de vida de los adoquines .....	55
VII. ANALISIS DE RESULTADOS .....	58
Discusión.....	62
Recomendaciones .....	64
Conclusiones: .....	66
Bibliografía .....	70

## Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Toneladas de residuos de construcción y demolición, en las principales ciudades de Colombia. Año 2017.....	4
Ilustración 2. Generación de los RCD en las distintas etapas de un proyecto.....	13
Ilustración 3. Tipos de Adoquines.....	18
Ilustración 4. Máquina de compresión ROSSEMBERG.....	20
Ilustración 5. Máquina de compresión ROSSEMBERG – Ensayo Flexotracción Modulo De rotura MR.....	20
Ilustración 6. Tipología del método y diseño de investigación mixta.....	23
Ilustración 7. Escombrera municipio de Popayán.....	25
Ilustración 8. Material RCD – Escombrera.....	30
Ilustración 9. Material RCD – Escombrera.....	31
Ilustración 10. Ensayo Esclerómetro – Escombrera.....	32
Ilustración 11. Ensayo flexotracción.....	39
Ilustración 12. Etapas del ciclo de vida de un producto.....	48

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Caracterización de los RCD .....	15
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de tipos de RCD .....	21
<b>Tabla 3.</b> Valores de resistencia a la compresión Esclerómetro .....	32
<b>Tabla 4.</b> Cálculo % humedad Material RCD.....	34
<b>Tabla 5.</b> Análisis granulométrico de material agregado RCD.....	35
<b>Tabla 6.</b> Densidad relativa material agregado RCD.....	35
<b>Tabla 7.</b> Máquina de los ángeles material agregado RCD .....	36
<b>Tabla 8.</b> Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales material agregado RCD.....	37
<b>Tabla 9.</b> Equivalente de arena material agregado RCD .....	37
<b>Tabla 10.</b> Impurezas orgánicas en agregado fino para concretos (método de colorimetría) material agregado RCD.....	38
<b>Tabla 11.</b> Densidad Bulk (peso unitario) y % de vacíos de agregados en estado suelto y compacto. Agregado RCD.....	38
<b>Tabla 12.</b> Resultados ensayo Flexotracción .....	40
<b>Tabla 13.</b> Características de los materiales. ....	40
<b>Tabla 14.</b> Masa de materiales para la fabricación de 100 adoquines. ....	41
<b>Tabla 15.</b> Masa de materiales para la fabricación de 25 adoquines - Proporciones. ....	41
<b>Tabla 16.</b> Ajuste por Humedad. Aporte de agua de los agregados .....	41
<b>Tabla 17.</b> Masa seca de la muestra patrón.....	42
<b>Tabla 18.</b> Cálculo del número de ensayos para resistencia a la flexotracción. ....	44
<b>Tabla 19.</b> % Absorción Promedio VS Requisito NTC 2017.....	45
<b>Tabla 20. Determinación de cumplimiento del requisito del módulo de rotura en adoquines, según NTC 2017 .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 21. Determinación de cumplimiento del requisito de resistencia a la compresión en adoquines, según INV .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 22.</b> Comparativo de los impactos ambientales de entrada .....	51
<b>Tabla 23.</b> Comparativo de los impactos ambientales de salida.....	52
<b>Tabla 24.</b> Mediciones ideales de resistencia a la flexotracción en 5 especímenes.....	55
<b>Tabla 25.</b> % Absorción Promedio VS Requisito NTC 2017.....	55
<b>Tabla 26.</b> Determinación de cumplimiento del requisito del módulo de rotura en adoquines, según NTC 2017 .....	56
<b>Tabla 27.</b> Porcentaje pasa ICPC - % Pasa material RCD.....	58
<b>Tabla 28.</b> Requisitos de agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico .....	59
<b>Tabla 29.</b> Requisitos de agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico.....	60
<b>Tabla 30.</b> Requisitos de agregado fino (arcilla y partículas deleznales) para pavimentos de concreto hidráulico .....	60
<b>Tabla 31.</b> Requisitos de agregado fino (arena) para pavimentos de concreto hidráulico.....	61
<b>Tabla 32.</b> Requisitos de agregado fino, respecto de impurezas orgánicas .....	61

## Índice de Gráficos

<b>Gráfico 1.</b> Granulometría RCD e ICPC .....	59
--	----

## **Introducción**

En la actualidad, la disposición final de escombros, ya sea, por cuenta de los residuos generados en la construcción o debido a la demolición de infraestructura física obsoleta o requerida para adelantar nuevos proyectos constructivos, es uno de los mayores factores de contaminación ambiental, considerando el volumen y composición de estos, contaminación que afecta principalmente al paisaje en donde se disponga, así como al suelo debido a los diferentes elementos y materiales que lo conforman y a fuentes de agua en donde por escorrentía o por lixiviación reciben el lavado de esos componentes, contaminándose aguas abajo.

Esto se agrava cada vez más, teniendo en cuenta el crecimiento que viene dándose en los proyectos constructivos de expansión de vivienda urbana y rural, en la ejecución de grandes obras viales y de infraestructura básica para la prestación de los servicios educativos, de salud, deportivos y culturales, así como para la provisión para los servicios públicos domiciliarios, que de acuerdo con Salazar R, et al. (2015), el desarrollo socioeconómico, al igual que el crecimiento urbanístico y el ordenamiento territorial son detonadores de la generación de grandes cantidades de este tipo de residuo.

En atención a lo anterior, el reciclaje de este tipo de residuos puede significar un gran aporte en la mitigación del impacto que estos ejercen en el medio ambiente, por cuanto, reducen los focos de contaminación y problemas de salud pública relacionados con este (paisaje, suelo y aire contaminado), al igual que, la reducción significativa en los costos de manejo y disposición final por parte de las unidades encargadas de aseo en las municipalidades, disminuyendo los botaderos de escombros no autorizados, permitiendo además reducir los riesgos ambientales y evitando la devaluación de los predios cercanos a estos lugares.

Por otra parte, la alta demanda de materiales de construcción requeridos en la expansión urbanística de las ciudades, particularmente de ladrillos, adobes o adoquines, ameritan disponer de este tipo de material para satisfacer la demanda requerida en la ciudad de Popayán en condiciones de calidad y cantidad.

En virtud de lo anterior, con el presente constructo académico, se pretende adelantar mediante un estudio experimental, la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los componentes de los escombros generados, que permitan la fabricación de adoquines en condiciones de calidad y resistencia, satisfaciendo la demanda local de este tipo de material y contribuyendo a la disposición final adecuada de estos residuos y disminuyendo la contaminación que generan al entorno ambiental de la ciudad.

Así mismo, desde el ejercicio profesional como ingenieros, se pretende con este estudio de caso, aplicar una de las áreas del contenido programático de la Maestría Ingeniería de la Construcción cursada, como lo es en los Módulos Tecnología del concreto, Manejo de residuos sólidos y Efecto Ambiental.

## **I. Planteamiento del Problema**

El acelerado crecimiento demográfico que vienen teniendo las ciudades colombianas producto de diferentes fenómenos sociales y económicos, así como la expansión urbanística que este crecimiento poblacional exige, requiere igualmente del incremento de la infraestructura física (viviendas, centros comerciales, escenarios deportivos, avenidas, puentes peatonales y vehiculares, redes de servicio público, terminales de transporte, parques, construcción de edificaciones públicas), que permita garantizar la efectiva prestación de los servicios básicos para los conglomerados sociales, situación que, por una parte, requieren de materiales o elementos para la construcción, y por otra, generan a partir de la ejecución y desarrollo de las obras, residuos sólidos denominados como residuos de construcción y demolición (RCD) o escombros que, al no dárseles un adecuado manejo y disposición final, generan contaminación ambiental en los entornos donde se dispongan.

Adicional a lo anterior, estos residuos en palabras de Acevedo (2015), presentan inconvenientes adicionales que van desde su generación, transporte y disposición final. Este autor, estima que, durante la etapa de construcción, el 10% de los materiales utilizados se convierten en residuos, y durante las tareas de demolición se pueden producir hasta diez (10) veces más residuos que al ser mal manejados o dispuestos finalmente, pueden afectar el ambiente o provocar la disminución de la vida útil de los rellenos o sitios dispuestos para esa disposición debido a la saturación con los escombros.

A lo antes referido, se adiciona la falta de conciencia, cultura y educación ambiental que poseen algunos miembros de la comunidad en el uso y disposición final, al igual que, la deficiencia institucional en la implementación de las políticas y reglamentación normativa, los planes de gestión, manejo y control de estos residuos que incrementa esta problemática, convirtiéndose a través del tiempo en un agente negativo transformador del entorno, social y ambiental específicamente.

En Colombia, según Lozano y Castro, 2018, los megaproyectos de construcción, las obras públicas y las obras de origen domiciliario, son los tres grandes generadores de RCD en el país, de los cuales, menos del 20% son dispuestos de manera adecuada, considerando causas como falta de conciencia ambiental de los productores, desconocimiento del manejo adecuado, no pago a empresas encargadas de recogerlos o porque se los entregan a carretilleros o motocargueros y volqueteros para que se deshagan del material, a lo cual, se suma el hecho de que, en algunas áreas urbanas no existen sitios de ubicación final (escombreras) o las existentes, ya agotaron su capacidad, generando el aumento de lugares ilegales para la disposición final de estos residuos.

A la par, Sierra (2020), refiere que en Colombia se generan un total de 20 millones de toneladas de RCD al año siendo Bogotá la ciudad que más genera este tipo de residuos, con 12 millones de toneladas al año, incrementándose del año 2017 en cerca de 8 toneladas/año, tal como se muestra en el gráfico

	CIUDAD			
	BOGOTÁ	MEDELLÍN	CALI	BARRANQUILLA
✓ <b>LEGALES</b>	8.326.626 tons	1.827.040 tons	432.000 tons	15.168 tons
— <b>ILEGALES</b>	3.673.374 tons	372.960 tons	288.000 tons	2.832 tons
<b>TOTAL DE RESIDUOS / Construcciones y Demoliciones</b>	<b>12.000.000tons</b>	<b>2.200.000tons</b>	<b>720.000tons</b>	<b>18.000tons</b>
✓ <b>SITIOS LEGALES DE DISPOSICIÓN</b>	4	1	2	1
— <b>BOTADEROS ILEGALES O PUNTOS CRÍTICOS</b>	368	205	134	26

*Ilustración 1. Toneladas de residuos de construcción y demolición, en las principales ciudades de Colombia. Año 2017.*

**Fuente:** Revista Catorce6. 2017.

En virtud de lo expuesto en la *Ilustración 1*, si bien existen sitios legales de disposición final, son más los sitios ilegales o “botaderos” y puntos críticos en estas grandes ciudades, aspecto que se

incrementa en las ciudades intermedias y en los municipios del país, ante la falta de control y reglamentación local específica.

En el contexto regional, de acuerdo con los datos suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), autoridad ambiental en la región, en la ciudad de Popayán, para el año 2021, se generaron 2.073 toneladas de este tipo de residuos para esa vigencia, que en su mayoría, fueron dispuestos en dos espacios (escombreras) determinados por la Administración Municipal, en tanto que, una menor parte, se depositó en lotes o espacios baldíos, a las orillas de los ríos Molino y Ejido, en humedales o en las calles que aún no disponen de pavimento como alternativa para resanar los baches que presentan, situación que generan un aspecto visual negativo a estos espacios, así como problemas adicionales como presencia de roedores, generación de material particulado, que deterioran el ambiente en las zonas donde se disponen inadecuadamente.

En virtud de lo anterior, surge como alternativa de mitigación de los efectos contaminantes de estos residuos, la fabricación de adoquines a partir de la reutilización de un alto porcentaje de residuos, una vez se hayan efectuado los análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los componentes que los conforman y que se requieren en esta producción, considerando además que actualmente Popayán cuenta con un sitio de disposición final para residuos de escombros pretendiendo darle un mejor manejo y aprovechamiento a estos, por cuanto, el residuo proveniente de la escombrera abre una puerta grande para el aprovechamiento de estos elementos, generando una transformación de esta materia prima en un producto que cumpla con los normas y exigencias de la ley colombiana, que además, disminuya los costos de producción en la fabricación de adoquines y su aprovechamiento en obras de urbanismo de la ciudad.

Lo antes referido, considerando que, en la región, se viene adelantando el crecimiento de la malla vial y espacio público, que requieren de materiales para ornamento (adoquines), lo cual, motiva la realización del presente trabajo, pretendiendo establecer el grado de uso de material de escombrera utilizando los agregados de la región para la producción de estos elementos que, de resultar como alternativa viable técnica y económicamente, contribuirá con el bienestar social de

la región, mediante la generación de empleo para las personas. De ello, surge entonces, la siguiente pregunta de investigación:

### **1.1. Pregunta Problema**

¿Cómo contribuye la reutilización de residuos de construcción y demolición en la elaboración de adoquines, a la disminución de la contaminación ambiental producida por estos residuos en la ciudad de Popayán?

### **1.2. Hipótesis**

De acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas evaluadas en los residuos de construcción y demolición dispuestos en las escombreras de Popayán, es factible elaborar adoquines para la demanda de estos en obras de mejoramiento vial y ornato público que cumplan con la calidad exigidas por las normas colombianas para este tipo de material.

### **1.3. Variables**

En el desarrollo de la investigación se considera el tratamiento de las variables:

- **Propiedades de los RCD:** para lo cual, es preciso analizar las características de los RCD de la Escombrera de Popayán para garantizar las condiciones mínimas de calidad de los adoquines o del material que será utilizado en obras de construcción.
- **Calidad del Proceso de elaboración de los adoquines a partir de RCD:** entendido como el proceso de producción de adoquines con Residuos de Construcción y Demolición, considerando las fases sucesivas llevadas a cabo al interior de una planta debidamente acondicionada para transformar los RCD en material aprovechable para obras de construcción.

#### **1.4. Alcance del Trabajo de Profundización**

El alcance de la investigación, a partir del desarrollo de un estudio de tipo experimental, por cuanto, se identificarán las características de los componentes de los RCD de las escombreras del municipio de Popayán y mediante pruebas de laboratorio, producir una mezcla con los materiales residuos, que permita la fabricación de adoquines que cumplan las condiciones requeridas por la norma colombiana.

## **II. Justificación**

Considerando la creciente problemática que genera la disposición final de los residuos sólidos en las localidades colombianas y particularmente en los municipios y centros poblados del país, la presente propuesta de trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería de la Construcción de la Universidad del Cauca, surge a partir de la necesidad que se tiene de aportar al establecimiento de alternativas de reutilización de altos porcentajes de estos residuos para elaborar materiales que puedan ser usados en obras civiles, locales o regionales.

Se considera pertinente este ejercicio académico, atendiendo a dos aspectos fundamentales: en primer lugar, porque se contribuye desde la academia, a la solución de problemas ambientales de una comunidad en específico con la reutilización de residuos sólidos de gran volumen, reduciendo las afectaciones que estos traen para el ambiente y colateralmente para la población y, en segunda instancia, por cuanto, se fortalece la función institucional y la misión social de la Universidad del Cauca en la región, planteando alternativas que posibiliten el mejoramiento de la calidad de vida de la población, haciendo que esta, sea sostenible y sustentable.

Es importante también, por cuanto, al ser factible la elaboración de adoquines a partir del uso de los residuos de construcción y demolición, se puede contar con una prueba piloto que contribuirá a la adecuada gestión y disposición de este tipo de residuos sólidos, al igual que, en la generación de una fuente de trabajo para la población y en la oferta de material requerido en obras civiles y de ornato público que se ejecuten en la ciudad de Popayán y municipios aledaños.

### **2.1. Justificación Técnica**

La sociedad actual manifiesta una gran preocupación por el deterioro ambiental y de salud debido a los problemas que generan los residuos y su mala disposición dentro de la comunidad, debido a que no se cuenta con una cultura de reutilización de residuos, así como, la falta de implementación de políticas de control gubernamental a la problemática, al igual que,

una incipiente infraestructura física que no contribuye a la adecuada disposición final de estos residuos y en particular, los generados en la construcción o en la demolición de obras de infraestructura.

Es preciso considerar en este estudio de caso, la exigencia normativa que al respecto existe sobre la producción, disposición final y reutilización de este tipo de residuos, atendiendo a lo establecido en la misma Constitución Política de Colombia, que en su Artículo 66 y 80 específicamente, al igual que en el Decreto 1077 de 2015 , expedido por el gobierno nacional, en sus Artículos 2.2.2.1.2.1.2 y el 2.3.2.2.2.3.44, donde se determina que la recolección de estos RCD será responsabilidad del generador por el manejo y disposición

Por otra parte, Resolución 1257 de 2021, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión de Residuos de Construcción y Demolición – RCD determinan las definiciones, así como, lo referente al aprovechamiento en zonas fijas o móviles, las cuales deben cumplir con unas normas mínimas como: recepción y pesaje, separación y almacenamiento de RCD aprovechables, aprovechamiento y almacenamiento de procesados, planteando por otra parte, las medidas mínimas de manejo ambiental de los sitios de disposición final de RCD.

Así mismo, lo establecido en la Resolución 0472 de 2017, expedida por el mismo Ministerio, la cual, reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se establece el objeto y ámbito de aplicación, tanto para las personas naturales, como para las jurídicas que, generen, recolecten, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan RCD en obras civiles o conexas en Colombia. Establece por otra parte, un marco conceptual y los procedimientos para la gestión integral de RCD.

En la actualidad, estos residuos pueden mediante el estudio de las características físicas del material que los conforman, reutilizarse en la fabricación de adoquines, que cumpliendo con las normas técnicas nacionales, pueden utilizarse en el ornato de vías, parques, senderos, entre otros, lo que contribuye a la reducción en la disposición final del volumen generado en las ciudades y

además en la generación de alternativas en la generación de empleo y de ingresos para algunas familias de la región.

Por ello, la propuesta de elaboración de adoquines a partir de material de escombros es pertinente por cuanto en la ciudad de Popayán y en la región, se vienen adelantando obras de infraestructura vial que requieren de este tipo de material para la adecuación de andenes, separadores viales, demarcación en parques, delimitación de zonas, entre otros. También considerando que, en la ciudad existe un (1) sitio de disposición final de este tipo de residuos denominado escombrera, en las que, se depositan y compactan, pudiéndose aprovechar para la elaboración de otro tipo de producto que puede dársele otro uso.

## **2.2. Justificación Académica**

La formación recibida en la Maestría Ingeniería de la Construcción, Facultad de Ingeniería civil, Universidad del Cauca, permite la aplicación de los conceptos académicos y los conocimientos técnicos vistos en los Módulos Construcción I, II y II, y el Seminario Investigativo, lo que permite el desarrollo de la propuesta de Elaboración de Adoquines con Material Proveniente de Escombrera y Evaluación de las Propiedades Físicas y Mecánicas según las Condiciones Específicas de las Existentes en la Ciudad de Popayán.

## **2.3. Justificación Ambiental**

El proceso de reutilización de los materiales de desperdicio, ya sea de madera, aceros, láminas, losas de concreto, empaques de cartón, plástico, papel y residuos de construcción, aparte de generar oportunidades económicas y de empleo, se favorece al medio ambiente, por cuanto, disminuye la contaminación del agua y el aire, al igual que, reduce la compra de materiales nuevos, se aumenta la vida útil de los sitios de disposición final, reduce los botaderos clandestinos, maximiza el uso de materiales reciclables, evita accidentes y riesgos ocupacionales.

### **III. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material proveniente de la escombrera de Popayán, determinando la viabilidad para la fabricación de adoquines que cumplan la Norma Técnica Nacional.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Analizar las características y propiedades de los componentes de los RCD depositados en la Escombrera de Popayán, determinando la factibilidad de reutilización.
- Estimar mediante pruebas de laboratorio, la composición de mezcla requerida en la elaboración de los adoquines en cumplimiento de las Normas Técnicas Colombianas (NTC).
- Realizar pruebas de resistencia verificando mediante el análisis de ciclo de vida la reducción de los impactos ambientales negativos durante la elaboración de adoquines.

## **IV. Marco Teórico**

De acuerdo con Bustos (2009), la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI, 2007) define desecho como todo lo que es generado como producto de una actividad, ya sea por la acción directa del hombre o por la actividad de otros organismos vivos, formándose una masa heterogénea que, en muchos casos, es difícil de reincorporar a los ciclos naturales; en tanto que, para Henry y Heinke (1999), estos desechos incluyen diversos materiales combustibles como plástico, papel, textiles, madera y no combustibles como metal, vidrio, residuos de construcción y demolición, entre otros”

Actualmente en las ciudades, la inadecuada disposición de estos residuos genera problemas de salud pública, debido a la reproducción de roedores, insectos, que se convierten en transmisores de enfermedades, al igual que, estos residuos, contaminan el aire, el agua y deterioran el paisaje producto del impropio almacenamiento, recogida y evacuación de los desechos sólidos.

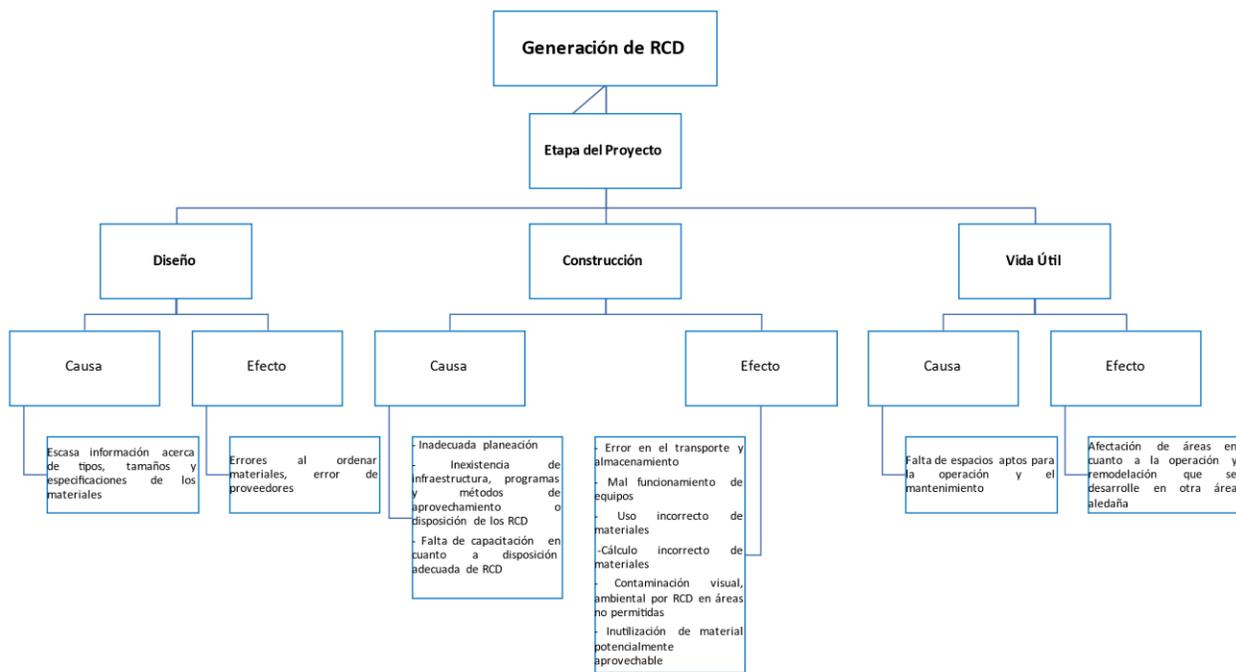
### **4.1. Estado del Arte**

Para abordar el estado del arte de este documento académico, es preciso considerar algunos elementos teóricos descritos por autores, tratadistas del tema entre quienes se consideran:

De acuerdo con Rincón (2018), el impacto negativo inminente que la contaminación ambiental viene causando a la sociedad, hace que se deba tomar conciencia del daño que se causa con la ejecución de distintas actividades productivas, como es el caso de las construcciones tradicionales, donde se evidencia el consumo de grandes cantidades de energía, agua, materia prima a base de recursos naturales no renovables, que a la postre, contaminan el aire, el suelo, el agua y el paisaje. (p.15)

Plantea esta autora que, la generación de RCD en una obra civil, es causado no solo por el desperdicio de materiales en el momento de ejecución, sino también, en el transporte y, almacenamiento de estos, errores humanos en los cálculos de cantidades, mala administración y planificación del proyecto, entre otros, factores que determinan la generación de estos residuos y que ameritan establecer los mecanismos de disposición final. (p.19)

Para ilustrar la producción de RCD se presenta como ejemplo el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS, 2015) de la ciudad de Bucaramanga, el ciclo de generación de RCD, así como sus causas y efectos, se muestra en el siguiente esquema:



*Ilustración 2. Generación de los RCD en las distintas etapas de un proyecto*

**Fuente:** PGIRS Bucaramanga. 2015.

Adicional a lo anterior, Garrigues (2003) planteó que, antiguamente la eliminación de los residuos producidos por los humanos no representaban un problema significativo, por cuanto, la población era pequeña y la cantidad de espacio (terreno) disponible para la disposición de los residuos era grande; no obstante, la problemática de este tipo de residuos de construcción comienza con el desarrollo de la sociedad moderna, no sólo por el aspecto de cantidad de

residuos que ésta genera, sino, por la calidad o compuestos con los que estos se elaboran o fabrican.

De ahí que, es posible identificar los factores que inciden en el crecimiento de la generación de los residuos sólidos urbanos y que, para el caso colombiano de las construcciones de infraestructura física, se determinan como:

1. El rápido crecimiento demográfico de la población en el país.
2. La concentración de la población en los centros urbanos o poblados de las localidades, que amerita la provisión de infraestructura física que provea diferentes servicios esenciales.
3. La utilización en estas obras, de bienes materiales de alto consumo, como es el caso de cemento, arena, acero, agregados pétreos, ladrillo, productos sintéticos, entre otros, productos que, de ser mal dispuestos, terminan siendo contaminantes.

La Guía Ambiental para el Manejo de Escombros en la Ciudad de Bogotá D.C (2006) determina la producción de estos residuos de acuerdo con los siguientes tipos de generadores, que una vez originados, se deben separar y clasificar con el fin de determinar acciones de reutilizar el material apto técnicamente y el sobrante realizarle la debida disposición:

- Tipo 1. Generadores de escombros de excavación.
- Tipo 2. Generadores de escombros de construcción.
- Tipo 3. Generadores de escombros de demolición.
- Tipo 4. Generadores de sedimentos.
- Tipo 5. Generadores de remodelaciones. (p.12)

Lo anterior, atendiendo a que, una de las formas más fáciles y económicas para deshacerse de los RCD, es disponiéndolos en las escombreras, actividad que debe estar a cargo del constructor, para lo cual, dentro de los proyectos a ejecutar, la firma encargada de la obra, debe cuantificar y realizar el balance entre el anterior costo y el costo en la extracción de materias primas, al igual, que la implementación de técnicas de aprovechamiento, investigaciones y demás factores

Normativamente en Colombia, se ha expedido la Ley 1259 de 2008 (diciembre 19), por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones, en la cual, en el Artículo 6, se establecen las infracciones respecto de:

“... 3. Disponer residuos sólidos y escombros en sitios de uso público no acordados ni autorizados por autoridad competente.

4. Disponer basura, residuos y escombros en bienes inmuebles de carácter público o privado, como colegios, centros de atención de salud, expendios de alimentos, droguerías, entre otros.

5. Arrojar basura y escombros a fuentes de aguas y bosques.

...8. Dificultar, de alguna manera, la actividad de barrido y recolección de la basura y escombros.

9. Almacenar materiales y residuos de obras de construcción o de demoliciones en vías y/o áreas públicas.

10. Realizar quema de basura y/o escombros sin las debidas medidas de seguridad, en sitios no autorizados por autoridad competente”.

Por otra parte, en la revista Costrudata, citada por Rincón (2018) se caracterizan los RCD, definiendo:

*Tabla 1. Caracterización de los RCD*

<b>Residuos Altamente Reciclables</b>	<b>Residuos de Excavación</b>
Prefabricados de mortero o concreto (bloques, tabicones, adoquines, tubos, etc.)	Suelo Orgánico
Concreto Simple	Suelo no contaminado y materiales arcillosos, pétreos,
Concreto Armado	Otros materiales minerales no contaminados y no peligrosos
Cerámicas	
Concretos Asfálticos	
Concreto Asfáltico producto del Fresado	
Productos de Mampostería	
Prefabricado de cerámica recosida (tabiques, ladrillos, bloques, etc.)	
Bloques	
Mortero	

Fuente: Rincón (2018), a partir de Costrudata

López, Pérez y Garnica (2014), desarrollan en su investigación “Estado del arte sobre el uso de residuos y subproductos industriales en la construcción de carreteras”, el análisis de:

“...los procesos que actualmente se están realizando en cuanto al reciclado y la reutilización de residuos y subproductos industriales, dónde se están aplicando, bajo qué controles y la legislación o normativa que rige en México, marco legislativo que hace la promoción e impulsa la gestión adecuada de residuos y la reutilización de materiales que aún puedan tener propiedades que lo puedan reincorporar a algún proceso productivo”. (p. viii).

El estudio determinó que, los residuos y subproductos más utilizados son las escorias de fundición, cenizas volantes, plásticos y en menor frecuencia lodos, llantas usadas y residuos de celulosa con las características y especificaciones técnicas que tienen o aplican para cada uno de ellos, así como la reutilización del concreto proveniente de la construcción, al igual que el hierro y el acero que junto con material de la carpeta asfáltica de caminos antiguos, permiten el uso más frecuente como material en el relleno y construcción de terraplenes y desde una perspectiva de ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados deben ser utilizados de una manera tal que el rendimiento esperado del proyecto no se vea comprometido. (p.1)

Por otra parte, para Jurado y Ortiz (2021), los efectos del cambio climático presenciados en los últimos años y que ha disparado las alarmas de los entes gubernamentales nacionales en todo el mundo, han llevado a las organizaciones constructoras de infraestructura física modernas, buscando aportar a la consecución de las metas propuestas para mitigar el impacto medioambiental, vienen realizando la reutilización de agregados en obras ingenieriles, es decir, Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como base para elaborar construcciones, de esta forma se disminuye la extracción de recursos naturales como agua, hormigón, arcilla, cal, etc. Esto atendiendo a que, en el año 2021, de acuerdo con los datos DANE en mayo de 2021 se licenciaron 1.724.026 m<sup>2</sup> para obras de ingeniería civil, 803.060 m<sup>2</sup> más en comparación con mayo del año 2020 (920.966 m<sup>2</sup>), situación que produjo un incremento de 87,2% en el área licenciada, con una expansión de 92,9% en el área destinada para vivienda y de 66,3% para los destinos no habitacionales. (p.11)

Para estos autores, lo anterior ha conllevado a las empresas constructoras ha:

...determinar con claridad las características geométricas, físicas y químicas en los agregados, para garantizar un mejor aprovechamiento y múltiples beneficios para las empresas constructoras, beneficios que, pueden ir desde la parte netamente ambiental como el menor impacto en hábitats o ecosistemas que se ven afectados por el vertido de RCD (agregados, ladrillos, cerámicos, panel yeso, concreto, mortero, acero entre otros) de forma indiscriminada, hasta la baja contaminación de las fuentes hídricas existentes en la superficie y de manera subterránea hasta la parte económica que de cierta forma se beneficia en tanto la inversión en materias primas podría disminuir considerablemente. (p.9)

Referencian igualmente como en países como Egipto, China, Malasia, Brasil y España, han desarrollado fichas técnicas y regulación normativa para el uso de los RCD, determinando los requisitos tales como el índice de plasticidad, el valor de trituración agregado (ACV), el índice de descamación, la solidez, el valor CBR, el valor equivalente de arena y la gradación de los agregados; la clasificación del agregado entre grueso y fino, con sus pruebas por separado, así como la asimilación de agua y la densidad, el porcentaje de rotura y el límite líquido. En tanto que en Colombia:

El panorama de normatividad y ensayos sobre los materiales RCD dista de estar completo en su totalidad, tan solo existen algunos ensayos aislados que se sustentan en las normas I.N.V. E-126, I.N.V. E-121, I.N.V. E-218, I.N.V. E-133, I.N.V. E217, I.N.V. E-222 y I.N.V. E-142, principalmente utilizados para evaluar materiales vírgenes, sin embargo, pese a la inexistencia de fichas técnicas y normatividad, los RCD se evalúan con estos estándares y ensayos. Dichos ensayos tienen en cuenta valores de referencia para el plástico y la plasticidad, el contenido de materia orgánica, el desgaste los ángeles, la absorción y porosidad, la prueba de proctor y equivalente de arena. (p.13)

No obstante, en el país buscando regular las condiciones de calidad en la fabricación de los adoquines de concreto, mediante la promulgación de la Norma Técnica Colombiana NTC 2017, se:

...establecieron los requisitos para adoquines de concreto y sus piezas complementarias, aptos para construir pavimentos de adoquines de concreto para: Tráfico peatonal, tráfico vehicular sobre llanta neumática (incluyendo patios de puertos y de terminales de carga, aeropuertos, terminales de transporte, estaciones de servicio, bodegas, entre otros), y cargas estáticas distribuidas (de almacenamiento a granel). (p.4)

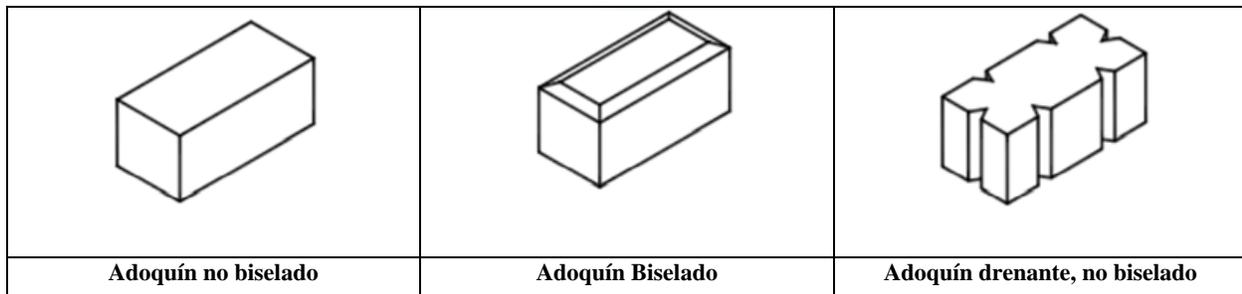
Requisitos que, se deben cumplir, atendiendo también a las condiciones técnicas establecidas en normas específicas tales como:

- NTC 121. Especificación de desempeño para cemento hidráulico.
- NTC 174. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.
- NTC 3459. Concretos. Agua para la elaboración de concreto.
- NTC 5147. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho.
- NTC 6008. Terminología y clasificación para adoquines y losetas de concreto. (p.4)

## 4.2. Marco Conceptual

Buscando mayor comprensión del lector o consultor de la presente investigación, se establece el siguiente marco conceptual, que facilite el entendimiento de los resultados obtenidos.

**Adoquín de concreto:** “Elemento macizo de concreto, prefabricado, con forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos que, en conjunto, permiten conformar una superficie que se utiliza como capa de rodadura para peatonal o vehicular”, (Norma Técnica Colombiana NTC 6008). “Los adoquines de concreto tendrán en el momento de utilización una resistencia tal que sean capaces de soportar, sin partirse, el tráfico de vehículos pesados, y no se desgasten con la abrasión inducida por las llantas de los vehículos.” (Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), 1986). Existen diferentes tipos de adoquines los cuales varían según se geometría (véase la Figura, Norma Técnica Colombiana NTC 6008).



*Ilustración 3. Tipos de Adoquines*

**Fuente:** Norma Técnica colombiana NTC 2017 (Tercera actualización)

**Absorción de agua de los adoquines de concreto:** Se refiere a la determinación de la cantidad de agua que absorbe el espécimen cuando se somete a unas condiciones de inmersión especificadas. (NTC 2017)

**Ajustes granulométricos:** Consiste en ajustar la granulometría de un árido a un uso granulométrico.

**Fracción granulométrica:** Es la cantidad de árido que pasa por un tamiz y queda retenido en otro.

**Granulometría:** Es la distribución por tamaños de las partículas de un árido. Para conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de árido se separan estos mediante cedazos o tamices. (NTC 32)

**Pavimento de adoquines de concreto:** “Pavimento de uso peatonal o vehicular que tiene una capa de base y una de subbase, cuya rodadura está conformada por, adoquines de concreto, una capa de arena sobre la cual van colocados los mismos y un sello de arena en las juntas entre adoquines”, (Norma Técnica Colombiana NTC 6008).

**Porcentaje de Absorción de Agua:** El porcentaje de absorción de agua (Aa%) del total de la masa de espécimen se debe calcular para cada espécimen mediante la siguiente ecuación, con una aproximación de 0,1% (NTC 2017)

$$\text{Absorción (Aa\%)} = \left[ \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \right] \times 100\%$$

En dónde:     $M_h$  = Masa saturada (humedad del espécimen, en gr  
                   $M_s$  = Masa seca del espécimen, en gr

**Resistencia a la compresión de adoquines:** Se refiere al esfuerzo máximo provocado sobre un espécimen al aplicarle una carga sobre toda su área, todos los adoquines deben ser de configuración y dimensiones similares, deben mantener una relación de esbeltez entre espesor y ancho del elemento. (Norma INV E -426 -13)

$$Rca = \frac{[Pmax]}{[An]} * Fa$$

***Rca:*** Resistencia a la compresión en el área neta, MPa (*lbf/mm<sup>2</sup>*)

***Pmax:*** Carga máxima de compresión, N (lbf)

***An:*** Área neta promedio del espécimen, *mm<sup>2</sup>*

***Fa:*** Relación de aspecto

*Ilustración 4. Máquina de compresión ROSSEMBERG*



Fuente: Propia

**Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura):** El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura (MR), cuando se aplica una carga máxima en el punto medio sobre el espécimen simplemente apoyado, esta carga produce un momento máximo, que genera una falla al adoquín en las fibras de tensión. (NTC 2017)

$$Mr = \frac{[3 C_{max} X (li - 20)]}{[(ar + ai)er^2]}$$

Mr      Módulo de rotura, N/mm<sup>2</sup>, en Mpa  
Cmax    Carga máxima de rotura, en N  
li      Longitud del rectángulo inscrito, en mm  
ar      Ancho real del espécimen, en mm  
ai      Ancho del rectángulo inscrito, en mm  
er<sup>2</sup>    Espesor real (promedio) del espécimen, en mm

*Ilustración 5. Máquina de compresión ROSSEMBERG – Ensayo Flexotracción Modulo De rotura MR*



Fuente: Grupo Investigador. 2023

## Clasificación de RCD

De acuerdo con la Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición RCD en obra (2015), elaborada por la Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá. Se determinan las siguientes clases de RCD.

*Tabla 2. Clasificación de tipos de RCD*

Categoría	Grupo	Clase	Componente
<b>RCD Aprovechables</b>	I. Residuos mezclados	Residuos pétreos	Concretos, cerámicas, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales, no pasante al tamiz # 200
	II. Residuos de material fino	Residuos finos no expansivos	Arcilla, limo, residuos inertes que pasen el tamiz # 200
		Residuos finos expansivos	Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que pasen el tamiz # 200
	III. Otros residuos	Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, papel, siliconas, vidrios, cauchos
		Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio
		Residuos orgánicos	Residuos de tierra negra
		Residuos orgánicos vegetales	Residuos vegetales y otras especies bióticas
<b>RCD no aprovechables</b>	IV. Residuos peligrosos	Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos, explosivos, tóxicos y	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes orgánicos, aceites, resinas, plastificantes, tintas y betunes
	V. Residuos especiales	No definida	Poliestireno, icopor, cartón, yeso (drywall)
	VI. Residuos contaminados con otros residuos	Residuos contaminados con residuos peligrosos	Materiales pertenecientes a los grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos
		No definida	Residuos contaminados con otros residuos que hayan perdido las características propias de su aprovechamiento
<b>Otros</b>	VII. Otros residuos	No definida	Residuos que por requisitos técnicos no es permitido su reúso en obras

**Fuente:** Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición RCD en obra, Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2015

## V. Metodología

En el desarrollo y construcción de la investigación, se siguió el siguiente desarrollo metodológico.

### 5.1. Enfoque de la Investigación

Siguiendo a Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2008) la investigación se realizará siguiendo el método mixto que implica un conjunto de procesos de recolección, análisis y vinculación de información que contenga datos cuantitativos y cualitativos en el mismo estudio para responder al planteamiento del problema, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (metainferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio. (p.532)

Contextualizando lo anterior, al proceso de investigación que se pretende adelantar, cobra especial vigencia por cuanto, se recopilarán y describirán datos del tipo y características del material de RCD depositados en la “Escombrera” de Popayán, determinando el estudio cualitativo, así como, datos de tipo cuantitativo, considerando que se deben establecer cantidades de componentes y agregados requeridos para la elaboración de los adoquines, determinándose entonces, datos de tipo cuantitativo.

Otros autores citados por Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista, como Chen (2006) define el método mixto de investigación, como:

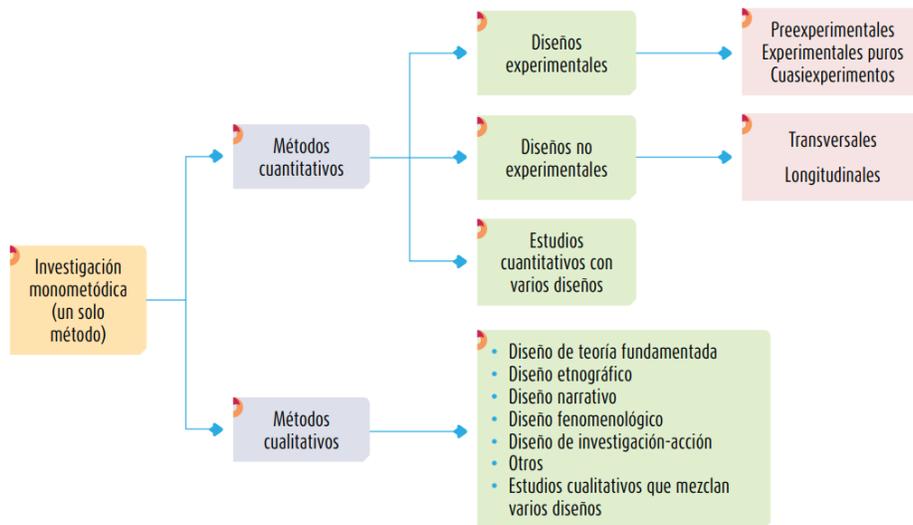
La integración sistemática de los métodos cuantitativo y cualitativo en un solo estudio con el fin de obtener una “fotografía” más completa del fenómeno, y señala que éstos pueden ser conjuntados de tal manera que las aproximaciones cuantitativa y cualitativa conserven sus estructuras y procedimientos originales (“forma pura de los métodos mixtos”); o bien, que dichos métodos pueden ser adaptados, alterados o sintetizados para efectuar la investigación y lidiar con los costos del estudio. En resumen, los métodos mixtos utilizan evidencia de datos numéricos, verbales, textuales, visuales, simbólicos y de otras clases para entender problemas en las ciencias. (p.534)

## 5.2. Tipo de Estudio

Siguiendo y aplicando lo preceptuado por Bernal (2010), para el desarrollo de la presente investigación se recurrirá a la aplicación del diseño experimental, el cual se caracteriza porque en él, quien investiga, actúa conscientemente sobre el objeto de estudio, no obstante, los objetivos de estos estudios son específicamente conocer los efectos de los actos producidos por el propio investigador como mecanismo o técnica para probar una hipótesis. (p.133)

En atención a lo preceptuado por Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2008) en el desarrollo del presente constructo académico y considerando que, es preciso adelantar estudios y pruebas de laboratorio que permitan determinar propiedades físicas y mecánicas de los RCD, las cantidades requeridas en la mezcla para la elaboración de los adoquines, así como pruebas de resistencia tanto en laboratorio como en campo, se materializa la aplicación de este tipo de estudio.

En síntesis, tanto el método como el tipo de investigación se resume en la siguiente ilustración:



*Ilustración 6. Tipología del método y diseño de investigación mixta.*

**Fuente:** Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2008)

### **5.3. Fases de la Investigación**

En el desarrollo de la propuesta investigativa aplicará las siguientes fases:

- A. Presentación y aprobación del Anteproyecto de Investigación, para que sea revisado y aprobado por el Comité de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Cauca.
- B. Consulta bibliográfica en los repositorios institucionales de universidades e institutos que den cuenta de información actualizada sobre: cantidad de RCD producidos en Popayán, proceso de reciclaje, normatividad técnica en la elaboración de materiales a partir de RCD, ensayos de laboratorio para preparación de mezclas para fabricación de adoquines.
- C. Diseño de instrumentos de recolección de información, que permitan cuantificar y cualificar los RCD.
- D. Aplicación de instrumentos y análisis cuantitativo y cualitativo de la información, mediante el desarrollo de laboratorios para determinar las propiedades y características de los RCD.
- E. Análisis de los resultados obtenidos y presentación preliminar de resultados en informe parcial de avance de la investigación.
- F. Estructuración de informe final, presentación y sustentación de resultados.

### **5.4. Localización del Estudio**

El proyecto de investigación se desarrolló en la ciudad de Popayán, departamento del Cauca, considerando que existe una Escombrera que recibe los RCD que se producen en la zona y que amerita adelantar esta intervención con la investigación para contribuir al reciclaje de este tipo de residuos y disminuir los efectos que la disposición final de ellos implica para el sitio en particular y para el ambiente de la ciudad en general.

Lo anterior, considerando que la Administración Municipal de Popayán dispone de una Escombrera autorizada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca C.R.C, autoridad ambiental, en la cual se deben disponer todos los residuos de construcciones del Municipio y que incluso sirve a municipios aledaños que trasladan dichos residuos a este lugar.



*Ilustración 7. Escombrera municipal de Popayán*

Fuente: Grupo Investigador. 2023

## **5.5. Instrumentos para la Recolección de Datos**

Para la obtención de la información se diseñaron los siguientes instrumentos:

- Revisión documental sobre la gestión y manejo de RCD en Escombrera.
- Ficha de cuantificación in situ de la producción de RCD en Popayán y región.
- Ficha de caracterización de propiedades físicas y mecánicas de los RCD de la Escombrera de Popayán.
- Protocolos de laboratorio para caracterización de propiedades físicas y mecánicas de los RCD; de cantidades de material requeridos en la mezcla y, de pruebas para revisión de calidad de los adoquines producidos.
- Visitas de campo para verificar in situ la calidad del material fabricado.

## 5.6. Técnicas de Sistematización y Análisis de Datos

Recolectada la información se procederá a cualificación de las características de los RCD para luego, cuantificar los resultados. Posteriormente, se presentarán los cálculos y pruebas de los laboratorios desarrollados y de la información producida en la fabricación de los adoquines, para luego presentar los resultados del material producido y su utilización en las obras de construcción vial, de ornato público de la ciudad o en proyectos regionales en desarrollo.

En esta sistematización, se referencian los resultados de las pruebas de laboratorio que evidencian el cumplimiento de las NTC descritas anteriormente y un chequeo a la norma INV, tales como:

- Características geométricas (adoquín biselado, no biselado, drenante no biselado).
- Dimensiones (longitud, ancho, espesor, tolerancias, aristas, bisel)
- Apariencia (acabados, textura de la cara de desgaste, color)
- Absorción de agua; resistencia a la abrasión.
- Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura)
- Resistencia a la compresión

De cada uno de estos ensayos se deja en el documento final, la evidencia de cálculos y pruebas realizadas, con la descripción de protocolos y procedimientos realizados.

## VI. Resultados

En virtud de lo establecido en los objetivos específicos y de las fases establecidas en el marco metodológico para adelantar la investigación y en ella, el trabajo de campo y de laboratorio, se presentan a continuación los resultados obtenidos.

Para dar inicio al proceso del análisis de caso detallado y específico del proyecto, surgieron varias ideas con las que se definieron aspectos fundamentales que fueron la base para examinar los resultados obtenidos. Por lo que, a continuación, se plasman las ideas que contribuyeron a determinar los objetivos, hipótesis y variables del presente trabajo de investigación:

- Fabricar adoquines en laboratorio a partir de un diseño de mezcla y ensayarlos para realizar los ajustes hasta cumplir con los requisitos de la norma NTC 2017.
- Realizar un chequeo al artículo 510 INV pavimento de adoquines de concreto, Resistencia a la compresión a 28 días.
- A la dosificación encontrada que cumpla con la norma NTC 2017, realizar cambios de material grueso por material grueso de RCD.
- Qué tipo de maquina utilizar durante la fabricación de los adoquines que garantice las condiciones necesarias para cumplir con la norma,
- A la dosificación encontrada que cumpla con la norma NTC 2017, realizar cambios de material grueso y fino por material grueso y fino proveniente de RCD.
- Utilizar la mayor cantidad de agregado proveniente de RCD para que su uso sea bastante representativo en el impacto ambiental.
- Modificar la cantidad de cemento para garantizar el cumplimiento de requisitos.
- Qué tipo de cemento utilizar y la marca.
- Usar material de RCD proveniente de cerámicas, ladrillo, bloque, concreto, etc.
- Obtener agregado de RCD proveniente únicamente de cerámica, ladrillo o bloque.
- Obtener agregado de RCD proveniente de concreto.
- La dosificación encontrada debe ser económicamente viable.

- Utilizar algún tipo de fibras para mejorar la resistencia a la flexión.

Finalmente, y considerando varias situaciones se optó por la ejecución del siguiente procedimiento:

1. Utilizar material de RCD proveniente únicamente de concreto (losas de concreto demolidas actualmente en la ciudad de Popayán)
2. Con la ayuda de un esclerómetro obtener una muestra representativa y de características similares en la escombrera.
3. Realizar al material RCD un trabajo previo utilizando un demoledor para llevarlo a la trituradora y obtener el agregado de RCD.
4. Realizar los ensayos correspondientes para la caracterización de los agregados.

Es importante referir que, encontrar la dosificación de la muestra patrón (mezcla que cumpla la NTC 2017) implica un trabajo bastante extenso en laboratorio, con continua disponibilidad de equipos, al igual que, establecer diálogo con un empresario que fabrica adoquines en la región y los distribuye en obras de ingeniería civil que se realizan en el Departamento del Cauca, para garantizar esa disponibilidad de los equipos para el análisis. Esta situación permitió considerar varias posibilidades:

- Partir de una muestra patrón que ya cumple los requisitos de norma NTC 2017
- Verificar que efectivamente estos adoquines que se están vendiendo cumplen los requisitos NTC-2017 para uso vehicular.
- Verificar si los adoquines con adición de RCD cumplen las especificaciones para uso vehicular.
- Durante la fabricación de los adoquines utilizar una máquina que permita la aplicación de una fuerza distribuida homogéneamente sobre el molde con la mezcla.
- Tener a disposición un tanque para realizar el curado de los adoquines, paso importante en la obtención de buenas resistencias.
- La fabrica suministra concretos y prefabricados a obras de la región, maneja un control de calidad y garantiza el cumplimiento de la norma y la economía en la fabricación del producto.

- Utilizar los mismos agregados que la empresa usa en la fabricación de los adoquines, pues los tienen en stock.
- Mantener constante una relación agua-cemento (A/C)
- Mantener constante la cantidad de agua necesaria para la pasta, adicionando para cada mezcla el agua necesaria para llenar los poros de los agregados según su humedad y absorción.

Para dar continuidad al proceso, se procedió a realizar los ensayos para obtener distintas mezclas, partiendo de la mezcla patrón entregada por la empresa y cambiando sus porcentajes de agregado grueso (arena de trituración de CONEXPE) por agregado de RCD, y mezcla de tres agregados arena de puerto tejada, arena de conexpe y material RCD; dándoles la relevancia a los porcentajes de agregado RCD, por cuanto este material, interesa en el análisis de impacto ambiental.

### **6.1. Análisis de las características y propiedades de los componentes de los RCD depositados en la Escombrera de Popayán, determinando la factibilidad de reutilización**

El material de RCD, se obtuvo de la Escombrera de la Ciudad de Popayán donde se analizó las características de todos los materiales que se depositan en este lugar. No obstante, para el cumplimiento de este objetivo se encontró que, en la ciudad de Popayán no se hace una escogencia ni una clasificación de todos los materiales que se reciben en la escombrera, lo cual, generó una gran incertidumbre y demasiadas variables de los materiales que podríamos aprovechar y que cumplieran con las exigencias mínimas para ser utilizados en materiales de construcción.

De este análisis inicial realizado, se descartó el material proveniente de excavaciones, aun cuando estos presentaran algún porcentaje de material de residuos de construcción, considerando que, estos residuos presentan contaminación con materia orgánica, toda vez que, dentro de los materiales que se encontraron en la escombrera se mezclan con los materiales de RCD de edificaciones, observando residuos de mampostería, vigas, columnas, secciones de algunas losas

de entropiso y especialmente, mixtura con los residuos de pavimento asfáltico, circunstancia que, genera un material muy variable el cual no brinda la certeza de su comportamiento y especialmente en que no es factible repetir sus características para la fabricación de elementos constructivos con materiales de residuo.



*Ilustración 8. Material RCD – Escombrera*

**Fuente:** Grupo Investigador. 2023

En segunda instancia, se pudo observar que la escombrera que sirve a la ciudad de Popayán, viene realizando una clasificación y almacenamiento de los RCD, provenientes de las losas de concreto hidráulico, que se están demoliendo actualmente, en virtud de la reposición de malla vial de la ciudad, encontrando que, este material en su gran mayoría no presenta contaminación de materia orgánica, ni elementos de transferencia de cargas acero de refuerzo, dovelas y pasadores. Estas características, se pudieron observar y comprobar con las visitas a de campo al sitio de disposición final de estos residuos y permitieron determinar que, este material, presenta características iniciales que permiten ser reutilizado en la construcción de otros elementos requeridos en el proceso constructivo.

De igual manera, se verificó si este material dispone de propiedades homogéneas, comprobando que presentaran algunas características básicas para poderlos utilizar y aprovechar en la fabricación de adoquines objeto de esta investigación, características y propiedades que se midieron tanto campo como en el laboratorio, las cuales se describen a continuación:

6.1.1. Revisión bibliográfica y documental sobre RCD, en repositorios universitarios institucionales Verificación en campo

En este ejercicio, se realizaron visitas a la escombrera, efectuando comprobación:

- Visual: encontrando losas de concreto hidráulico sin materia contaminante orgánica ni elementos de refuerzo, así como, determinando y validando las dimensiones largo, ancho y espesor, así como, el color en particular, este último aspecto, sin condicionante o limitación específica.



*Ilustración 9. Material RCD – Escombrera*

**Fuente:** Grupo Investigador. 2023

### 6.1.2. Cuantificación de la generación de RCD y dispuestos en la Escombrera en la ciudad de Popayán

De acuerdo con los datos suministrado por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), autoridad ambiental en la región, en la ciudad de Popayán, para el año 2021, se generaron 2.073 toneladas anuales, de este tipo de residuos que, en su mayoría, fueron dispuestos en dos espacios (escombreras) determinados por la administración municipal, en tanto que, una pequeña parte se depositó en lotes o espacios baldíos, a las orillas de los ríos Molino y Ejido, en humedales o en las calles que aún no disponen de pavimento como alternativa para resanar los baches que presentan.

### 6.1.3. Análisis de laboratorio para RCD

- Esclerómetro: mediante este instrumento se obtienen datos de rebote, que al correlacionarlos se adquiere la resistencia a compresión de un hormigón. Para ello, se tomaron diferentes lecturas en un gran lote de material RCD de losas de concreto, con el

objetivo de analizar la uniformidad del hormigón, y poder comparar los valores y resultados.

Este procedimiento es aplicable para determinar la uniformidad del concreto en sitio (escombrera), con la finalidad de escoger una muestra representativa y con características similares (origen, color, espesor). Este ensayo consiste en sostener el esclerómetro firmemente de manera que el embolo este perpendicular a la superficie de la prueba, se empuja gradualmente el instrumento hacia la superficie de la prueba hasta que el martillo impacte.

Se lee el número de rebote en la escala, al número entero más cerca y se registra, las pruebas se realizan a no menos de 1 pulgada entre los puntos, durante el ensayo se deben evitar factores que afecten el número del rebote como son: el contenido de humedad de la superficie de prueba, la textura de material o tipo de acabado y verificación de no presencia de acero de refuerzo. Los resultados se presentan a continuación:



*Ilustración 10. Ensayo Esclerómetro – Escombrera*

Fuente: Grupo Investigador. 2023

*Tabla 3. Valores de resistencia a la compresión Esclerómetro*

Losa	Valor Rebote	Valor Estimado de Resistencia a la Compresión (Mpa)
1	38	26
2	39	28
3	36	23
4	36	23

<b>Losa</b>	<b>Valor Rebote</b>	<b>Valor Estimado de Resistencia a la Compresión (Mpa)</b>
5	39	28
6	40	29,5
7	36	23
8	36	23
9	35	21,8
10	38	26
11	38	26
12	37	24,5
13	36	23
14	39	28
15	35	21,8
16	39	28

**Fuente:** Grupo Investigador. 2023

De los resultados obtenidos anteriormente, se pudo verificar que, el material de losas hidráulicas provenientes del cambio de la malla vial de Popayán, presentan valores similares de los cuales se obtuvieron valores correlacionados de la resistencia a la compresión entre 218-280 Kg/cm<sup>2</sup>, determinando que, este material presenta buenas características de resistencia según su lectura, pero serán corroboradas con sus respectivos ensayos de laboratorio, y su comportamiento al mezclarlo con otros materiales.

De acuerdo con las investigaciones y recomendaciones de los fabricantes y especialmente del Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) que, en sus notas técnicas recomienda para el diseño y preparación de mezclas de concreto para adoquines un Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 3/8", de la muestra obtenida de la escombrera de la ciudad, se encontró que, los bloques de RCD, presentaron distintos tamaños (sobre tamaños), los cuales, para su utilización, deben pasar por un proceso de trituración donde se inicia con una reducción de tamaño con demolidor, estos nuevos fragmentos se introducen a la trituradora de mandíbula, y se gradúa para que el TMN de 3/8", ejercicio que se realizó de manera previa al diseño, elaboración y análisis de resultados.

En virtud de lo anterior, posterior al proceso de trituración se realizaron los siguientes ensayos con la finalidad de caracterizar el material de RCD, así como medir los parámetros y determinar su factibilidad para su reutilización.

## 6.2. Ensayos de Caracterización de Material de RCD

### 6.2.1. Ensayo 1. Determinación de humedad NTC 1776 o INV E -12213

Objetivo: Se aplica para determinar el contenido de agua, por masa, de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado. Su propósito general es para el ajuste de la masa de los ingredientes durante la preparación de mezclas de concreto. En la cual, se obtuvo un porcentaje de humedad del 7.2%

*Tabla 4. Cálculo % humedad Material RCD*

<b>Masas Muestra (g)</b>	
Masa seca antes de lavado	1.718,9
Masa seca después de lavado	1.701,4
Pasa N° 200 por lavado	17,5
<b>Porcentajes en muestra</b>	
% de grava	20,4
% de arena	178,5
% Pasa N° 200	1,1
Módulo de finura	3,88
Tamaño máximo	3/8"
% Humedad	<b>7,20%</b>

**Fuente:** Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

### 6.2.2. Ensayo 2: Análisis granulométrico NTC 77 o INV E -213 y 214 -2013

Objetivo: Determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados por medio del tamizado, se usa principalmente, para determinar la granulometría de los materiales propuestos en nuestro caso RCD, con el fin de poder ajustar la distribución de las partículas en la mezcla y acercarnos al cumplimiento de las recomendaciones para la fabricación de adoquines.

Tabla 5. Análisis granulométrico de material agregado RCD

TAMIZ		MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA TOTAL	ESPECIFICACION		MASA S MUESTRA (g)	
Pulg.	mm					LIM. INFERIOR	LIM. SUPERIOR	MASA SECA ANTES DE LAVADO:	
								1/18,9	
								MASA SECA DESPUÉS DE LAVADO	1701,4
								PASA No. 200 POR LAVADO:	17,5
								<b>PORCENTAJES EN MUESTRA</b>	
								% DE GRAVA	20,4
								% DE ARENA	78,5
								% PASA No. 200	1,1
1/2"	12	0,0	0,0	0,0	100,0			MODULO DE FINURA:	3,88
3/8"	9,525	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	TAMAÑO MÁXIMO:	3/8"
No. 4	4,75	350,6	20,4	20,4	79,6	95	100	<b>CLASIFICACIÓN</b>	
No. 8	2,36	406,3	23,6	44,0	56,0	80	100	SUCS	
No. 16	1,18	304,2	17,7	61,7	38,3	50	85	% HUMEDAD	7,2%
No. 30	0,6	253,4	14,7	76,5	23,5	25	60		
No. 50	0,3	207,8	12,1	88,6	11,4	10	30		
No. 100	0,15	134,1	7,8	96,4	3,6	2	10		
No. 200	0,075	43,9	2,6	98,9	1,1				
Pasa No. 200 por tamizado		1,1							
Pasa No. 200 Total		18,6	1,1						
TOTAL		1718,9	100	100,0	0,0				

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

### 6.2.3. Ensayo 3: Densidad relativa (gravedad específica) y absorción NTC 237 o INV E - 222 - 13

Objetivo: Procedimiento para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción es el incremento de la masa de un agregado, debido a la penetración de agua dentro de los poros de sus partículas durante un periodo especificado, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas y se expresa como un % de la masa seca del agregado. Su propósito general es para el ajuste del agua durante la preparación de la mezcla. En el cual se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 6. Densidad relativa material agregado RCD

AGREGADO FINO					
PRUEBA N°:	1	2		PROMEDIO	PROMEDIO
PICNÓMETRO No. :	7	8			
A.- MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA, g	460,03	460,32		g/cm <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
B.- MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA A TEMPERATURA DE EN	678,91	674,29			
C.- MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA SSS + AGUA, g	968,92	965,02			
S.- MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SSS, g	500,57	500,40			
DENSIDAD SECA AL HORNO= $0,9975A / (B + S - C)$ g/cm <sup>3</sup>	2,179	2,190		2,185	2184,5
DENSIDAD SSS = $0,9975 S / (B + S - C)$ g/cm <sup>3</sup>	2,371	2,381		2,376	2376,0
DENSIDAD APARENTE = $0,9975 A / (B + A - C)$ g/cm <sup>3</sup>	2,699	2,707		2,703	2703,0
% ABSORCIÓN = $(S - A) / A \times 100$	8,81	8,71		8,76	
TEMPERATURA DEL AGUA DE ENSAYO (°C) =	24,6	26,1			

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

6.2.4. Ensayo 4: Resistencia al desgaste NTC 98 o INV E - 218 Y 219 - 13

Objetivo: Procedimiento para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaño menor a 37.55 mm (1 1/2”) por medio de la máquina de Los Ángeles.

El propósito general de esta medición es generar un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos similares a composiciones mineralógicas que se utilizan o se usarán en los bloques que se desean construir, a partir de los RCD, resultados que pueden verse en la *Tabla 7*.

*Tabla 7. Máquina de los ángeles material agregado RCD*

CONDICIÓN DE PRUEBA	SECA		
GRADACIÓN USADA	C		
NUMERO DE ESFERAS	8		
NUMERO DE REVOLUCIONES	500		
P1: MASA MUESTRA SECA ANTES DEL ENSAYO, g.	5008		
P2: MASA MUESTRA SECA DESPUÉS DEL ENSAYO LAVADA SOBRE EL TAMIZ No. 12, g	3001		
PERDIDA = P1 - P2, g	2007		
% PÉRDIDA = ((P1 - P2) / P1) x 100	<b>40,0</b>		

ESPECIFICACIÓN	
MATERIAL ENSAYADO	AGREGADO PARA MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO
ESPECIFICACIÓN A APLICAR	ART 500 Y 630 INV - 13
REQUISITO DE DESGASTE, %	500 <del>Revol.</del> : ≤ 40 % En seco

DATOS SOBRE GRADACIÓN, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES								
TAMAÑOS		PESO Y GRADACIÓN DE LA MUESTRA, g.						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	1	2	3
3"	2 1/2"					2500 ± 50		
2 1/2"	2"					2500 ± 50		
2"	1 1/2"					5000 ± 50	5000 ± 50	
1 1/2"	1"	1250 ± 25					5000 ± 25	5000 ± 25
1"	3/4"	1250 ± 25						5000 ± 25
3/4"	1/2"	1250 ± 10	2500 ± 10					
1/2"	3/8"	1250 ± 10	2500 ± 10					
3/8"	1/4"			2500 ± 10				
1/4"	No.4			2500 ± 10				
No.4	No.8				5000 ± 10			
TOTALES		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 50	10000 ± 75
No. DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
No. REVOLUCIONES		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFÍSICA SAS.

6.2.5. Ensayo 4: Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable NTC 589 o INV E - 211 - 13

Objetivo: Procedimiento para determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznable (fiabes) en los agregados. Su uso es fundamental para aprobar el empleo de agregados destinados a la elaboración de concretos hidráulicos.

Tabla 8. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable material agregado RCD

TAMAÑO DEL AGREGADO		MASA INICIAL, M g	MASA RETENIDO, R g	% TERR. DE ARCILLA Y PART. DELEZNABLES	% RETENIDO GRANULOMETRÍA		% TERR. DE ARCILLA Y PART. DELEZNABLES CORREGIDO
PASA	RETENIDO				ORIGINAL	CORREGIDO	
MAYOR A 1½"							
1½"	¾"						
¾"	3/8"						
3/8"	Nº4	1000,5	997,1	0,3	20,4	100,0	0,3
<b>% TERR. DE ARCILLA Y PART. DELEZNABLES CORREGIDO FRACCIÓN GRUESA</b>							<b>0,34</b>

FRACCIÓN FINA				
TAMAÑO DEL AGREGADO		MASA INICIAL, M g	MASA RETENIDO, R, g	% TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES
PASA	RETENIDO			
Nº 4	Nº 16	25,03	24,79	1,0
<b>% TERR. DE ARCILLA Y PART. DELEZNABLES CORREGIDO FRACCIÓN FINA</b>				<b>1,0</b>
<b>% TERR. DE ARCILLA Y PART. DELEZNABLES CORREGIDO DEL MATERIAL ENSAYADO</b>				<b>0,65</b>

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFÍSICA SAS.

### 6.2.6. Ensayo 6: Equivalente de arena de suelos y agregados finos NTC 6179 o INV E - 133 - 13

Objetivo: Procedimiento para determinar bajo condiciones normalizadas, las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos de tamaño inferior a 4,75mm. El termino equivalente de arena expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y los agregados finos son mezclas de arena y partículas gruesas deseables, y de polvo y finos arcillosos o plásticos indeseables. Su propósito general es para limitar la cantidad de finos nocivos en un agregado.

Tabla 9. Equivalente de arena material agregado RCD

Ensayo N°	1	2	3	Promedio
Lectura de arena con constante, mm	354	347	349	
Constante, mm	254	254	254	
Lectura de arena. Mm	100	93	95	
Lectura de arcilla	116	109	113	
Equivalente de arena	87	86	85	<b>86</b>

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFÍSICA SAS.

6.2.7. Ensayo 7: Impurezas orgánicas NTC 127 o INV E - 212 - 13

6.2.8. **Objetivo:** Procedimiento para determinar de manera aproximada la presencia de impurezas orgánicas nocivas en arenas. Su propósito general es advertir sobre la presencia de impurezas organizas nocivas en el agregado fino.

*Tabla 10. Impurezas orgánicas en agregado fino para concretos (método de colorimetría) material agregado RCD*

Frasco N°	Color Final Muestra
1	1
1	1
3	1
<b>COLOR DE REFERENCIA =3</b>	
<b>(Color Garner de referencia N° 11)</b>	
<b>Material Ensayado</b>	Agregado fino para concreto hidráulico estructural
<b>Especificación Aplicable</b>	Artículo 630 INV – 13
<b>Requisito</b>	Color menor o igual al color de referencia

**Fuente:** Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

6.2.9. Peso unitario NTC 92 o INV E - 217 - 13

*Tabla 11. Densidad Bulk (peso unitario) y % de vacíos de agregados en estado suelto y compacto. Agregado RCD*

<b>DENSIDAD BULK EN ESTADO SUELTO</b>					
PRUEBA No.	1	2	3	PROMEDIO	
Masa de la muestra + molde, G, g.	6926	6971	6954	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Masa del molde, T, g.	3337,8	3337,8	3337,8		
Volumen del molde, V, cm <sup>3</sup>	2983,93	2983,93	2983,93		
Densidad Bulk suelta Húmeda por paladas, M, g/cm <sup>3</sup>	1,203	1,218	1,212	<b>1,211</b>	<b>1210,663</b>
Humedad, %	4,8	4,8	4,8	4,8	
Densidad Bulk suelta seca por paladas, g/cm <sup>3</sup>	1,148	1,162	1,157	<b>1,156</b>	<b>1155,573</b>
Gravedad específica Bulk de material, S, g/cm <sup>3</sup>	--			2,703	
% vacíos en los agregados sueltos, %	--			<b>0,552</b>	

<b>DENSIDAD BULK EN ESTADO COMPACTO</b>					
PRUEBA No.	1	2	3	PROMEDIO	
Masa de la muestra + molde, G, g.	7534	7521	7517	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Masa del molde, T, g.	3337,8	3337,8	3337,8		
Volumen del molde, V, cm <sup>3</sup>	2983,93	2983,93	2983,93		
Densidad Bulk Compacta Húmeda, M, g/cm <sup>3</sup>	1,406	1,402	1,401	<b>1,403</b>	<b>1402,915</b>
Humedad, %	4,8	4,8	4,8	4,8	
Densidad Bulk Compacta Seca M, g/cm <sup>3</sup>	1,342	1,338	1,337	<b>1,339</b>	<b>1339,077</b>
Gravedad específica Bulk de material, S, g/cm <sup>3</sup>	--			2,703	
% vacíos en los agregados, %	--			<b>0,481</b>	

**Fuente:** Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

Objetivo: Procedimiento para determinar el peso unitario de agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos, en condición suelta o compacta y para calcular los vacíos.

Su propósito general es para determinar la relación masa - volumen para conversiones en acuerdos de compra y venta de agregados.

### 6.3. Estimación mediante pruebas de laboratorio, la composición de mezcla requerida en la elaboración de los adoquines en cumplimiento de las Normas Técnicas Colombianas (NTC)

En la ciudad de Popayán existen empresas dedicadas a la fabricación de adoquines, elementos que se utilizan en espacio público y para pavimentación de vías, por lo que, la finalidad es encontrar la mezcla adecuada para la fabricación de adoquines con materiales de la zona (arena de trituración de CONEXPE y arena fina de Puerto Tejada).

#### 6.3.1. Muestra patrón

En virtud de lo anterior y buscando garantizar, el cumplimiento de la norma NTC 2017, se consideró la dosificación utilizada por una de estas empresas, que a la fecha ha suministrado adoquines, para la construcción de obras locales y departamentales, no sin antes tener la certeza que cumple con los requerimientos de la Norma Técnica Colombiana de 2017.

*Ilustración 11. Ensayo flexotracción*



Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

Tabla 12. Resultados ensayo Flexotracción.

MODULO DE ROTURA (ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN)								
Muestra N°	REPRESENTACIÓN DEL LOTE	Longitud rect. inscrito, Li (mm)	Ancho Real, Ar (mm)	Ancho rect. inscrito, Ai (mm)	Espesor Real, er (mm)	Lectura de carga KN	Carga N	MODULO DE ROTURA N/mm²
1	28 Dias	187,2	101,4	87,0	53,5	4,50	4500,0	4,2
2		187,1	101,0	86,8	54,2	7,40	7400,0	6,7
3		187,5	101,5	87,1	54,1	6,55	6550,0	6,0
4								
5								
MODULO DE ROTURA DEL LOTE=		5,6			N/mm²	5,6		Mpa
DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO								
Muestra N°	REPRESENTACIÓN DEL LOTE	ESPESOR REAL PROMEDIO DE UNIDAD, er (mm)		ANCHO REAL PROMEDIO DE UNIDAD, Ar (mm)		LONGITUD REAL PROMEDIO DE UNIDAD, Lr (mm)		
1		53,5		101,4		201,0		
2		54,2		101,0		201,0		
3		54,1		101,5		200,6		
4								
5								
DIMENSIONES PROMEDIO DEL LOTE		54,0		101,3		200,9		

Fuente: Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFÍSICA SAS.

Considerando los resultados de la tabla 12, donde se evidencia que el módulo de rotura de los adoquines fabricados por la empresa CONCREINSA cumple los requerimientos exigidos por la norma NTC 201. Por lo tanto, la dosificación utilizada en la fabricación de los adoquines se toma como muestra patrón, en la elaboración y producción de los especímenes de ensayo; con las siguientes proporciones:

### 1. Diseño de mezclas para adoquines

Para la fabricación de los adoquines, se consideran las siguientes características, cantidades y unidades de medida.

Tabla 13. Características de los materiales.

N°	Característica	Valor	Unidad Medida
1	Densidad Aparente Arena Trituración CONEXPE	2,726	Kg/dm <sup>3</sup>
2	Densidad Aparente Arena de Puerto Tejada	2,731	Kg/dm <sup>3</sup>
3	Densidad Aparente RCD	2,703	Kg/dm <sup>3</sup>
4	Humedad Arena de Puerto Tejada	5,80	%
5	Humedad Arena de CONEXPE	2,50	%
6	Absorción Arena de Puerto Tejada	2,16	%
7	Absorción Arena de CONEXPE	3,40	%
8	Densidad Especifica del Cemento (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,90	Kg/dm <sup>3</sup>
9	Densidad Especifica del Agua (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,00	Kg/dm <sup>3</sup>
10	Humedad Arena RCD	7,20	%
11	Absorción Arena RCD	8,76	%

**Fuente:** Ensayo realizado en el Laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFÍSICA SAS.

La empresa fabricante, indica que, de acuerdo con las proporciones que manejan para la elaboración de 100 adoquines tienen patronado los siguientes materiales por peso.

*Tabla 14. Masa de materiales para la fabricación de 100 adoquines.*

Material	Und	Preparada 100 Adoquines
Cemento	Kg	39,17
Agua	Kg	5,29
RCD	Kg	0
Arena de Puerto Tejada	Kg	30,31
Arena de CONEXPE	Kg	171,35
No. de Adoquines	Und	100

**Fuente:** Concreinsa S.A.

De acuerdo con la anterior información y considerando que, el análisis estadístico indica que es preciso ensayar 25 muestras; a continuación, se calculan las masa seca para su fabricación:

*Tabla 15. Masa de materiales para la fabricación de 25 adoquines - Proporciones.*

Material	Cantidades		100 adoquines		25 adoquines	
	Und	masa seca (kg)	Densidad aparente (kg/dm <sup>3</sup> )	Volumen para preparar (dm <sup>3</sup> )	masa seca (kg)	Proporciones
Cemento	Kg	39.17	2.90	13.51	9.79	1
Agua	Kg	5.29	1.00	5.29	1.32	0.14
RCD	Kg	0	2.703			
Arena de Puerto Tejada	Kg	30.31	2.731	11.10	7.58	0.77
Arena de CONEXPE	Kg	171.35	2.726	62.86	42.84	4.37
<b>Total</b>				92.75	23.19	

**Fuente:** Empresa fabricante de adoquines (Popayán) – Propia.

*Tabla 16. Ajuste por Humedad. Aporte de agua de los agregados*

Material (1)	Proporción Inicial (2)	Masa Seca (Kg) (3)	Masa Húmeda (Kg) (4)	Agua Agregados (Kg) (5)	Absorción (Kg) (6)	Agua Libre (Kg) (7)	Aporte (Kg) (8)
Cemento	1.00	9.79					
Agua	0.14	1.32					
Arena Puerto Tejada	0.77	7.54	7.98	0.44	0.163	0.27	
Arena de CONEXPE	4.37	42.79	43.86	1.07	1.455	-0.39	-0.11

**Fuente:** Astudillo & González. 2023

## Fórmula:

$$\begin{aligned} \text{AGUA TOTAL DE LA MEZCLA} &= \text{Agua de Pasta} + \text{Agua Agregados} \\ \text{Agua Total de la Mezcla} &= 1.32 + 0.11 \\ \text{Agua Total de la Mezcla} &= 1.43 \end{aligned}$$

## 2. Masa de los materiales para la preparación de la muestra patrón

*Tabla 17. Masa seca de la muestra patrón*

Material	Und.	Masa Seca (Kg)
<b>Cemento</b>	Kg	9.79
<b>Agua</b>	Kg	1.43
<b>RCD</b>	Kg	
<b>Arena de Puerto Tejada</b>	Kg	7.98
<b>Arena de CONEXPE</b>	Kg	43.86

Fuente: Grupo Investigador. 2023

Con el objetivo de encontrar las posibles mezclas, que se ajusten a los diferentes parámetros que se establecen en las NOTAS TÉCNICAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO (ICPC), se realizaron cuatro (4) mezclas, descartándose hacer mezclas con 3 materiales de la zona; ARENA DE PUERTO TEJADA, ARENA DE TRITURACIÓN DE CONEXPE Y ARENA DE TRITURACIÓN DE RCD, debido al análisis granulométrico que gráficamente mostró que, entre el tamiz 3/8 y tamiz N° 50, la arena de Puerto Tejada presenta mayor porcentaje pasa, que la curva ideal, mientras que el RCD le falta material pasante en estos tamices. Por esta razón, al momento de mezclarlas se ajustan lo más cercano posible a la curva ideal, condición que no es superada al mezclar los tres materiales (arena de Puerto Tejada, arena CONEXPE y RCD), toda vez que, al realizar varias combinaciones de agregados, estos guardan una relación inversa los materiales RCD y CONEXPE; es decir que, para obtener un mejor ajuste granulométrico, a mayor cantidad de RCD menor cantidad de arena de CONEXPE, situación que lleva a descartar la utilización del agregado de CONEXPE. En virtud de esto, es preciso realizar los ensayos respectivos considerando:

- a) 100% material RCD, será materia de ensayo con la finalidad de utilizar la mayor cantidad de material reciclado para un máximo beneficio en el medio ambiente.
- b) 78% RCD y 22% ARENA DE PUERTO TEJADA, será materia de ensayo, por cuanto sus porcentajes tras realizar un ejercicio de combinación de mezclas, fueron los porcentajes que mejor se ajustaron a la curva sugerida del ICPC, razón por la cual, se fabricará especímenes de espesor  $\geq 60$  mm para uso vehicular.
- c) 60% RCD y 40% ARENA DE PUERTO TEJADA, será materia de ensayo por sugerencia de las NOTAS TECNICAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO – ICPC.
- d) 50% RCD y 50% ARENA DE PUERTO TEJADA, serán considerados, atendiendo a que, los agregados de trituración aportan resistencia en los adoquines y el material fino, incide en el acabado.

El número de muestras necesarias para obtener la correlación, se obtuvo considerando el procedimiento descrito en el Manual de Diseño de Pavimentos Flexibles para Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito del Instituto Nacional de Vías, el cual se basa en los niveles de confianza, cuya descripción de la metodología determina: “La filosofía básica de estos niveles de confianza se explica por el concepto de la probabilidad o seguridad que la diferencia entre el valor medio de la muestra y el valor medio de la población esté dentro de los límites preestablecidos”. (INVÍAS, 1998)

En virtud de lo anterior, inicialmente se debe definir el error permitido, es decir, cuánto es conveniente que se aleje la media del muestreo ( $X_{med}$ ) de la media de la población ( $\mu$ ); posteriormente, escoger el nivel de confianza o probabilidad de que la diferencia entre ( $X_{med} - \mu$ ) sea igual o menor que el valor establecido como máximo error permitido. Para ello, se utiliza la expresión de intervalo de confianza de dos lados para una distribución Normal, por lo que, en ningún caso el número de ensayos será menor a cuatro.

Estadísticamente se planteó un error máximo permitido de 0,30 con un nivel de confianza del 95% y una desviación estándar de 0,75, datos que arrojaron que la muestra será de 25 unidades para flexotracción y 25 para compresión.

*Tabla 18. Cálculo del número de ensayos para resistencia a la flexotracción.*

<b>Resistencia a la flexotracción promedio (Mpa)</b>	<b>5,00</b>
<b>Error permitido (Mpa)</b>	0,30
<b>K (para confiabilidad del 95%)</b>	1,96
<b>Coefficiente de variación (CV)</b>	0,15
<b>Desviación estándar (Mpa) (<math>\sigma</math>)</b>	0,75
<b>Número de ensayos (n)</b>	25

Fuente: Grupo Investigador. 2023

### CHEQUEO POR ITERACIÓN:

$$\sigma = CV * \text{Resist flexot Promedio}$$

$$\sigma = 0,15 * 5 \text{ Mpa}$$

$$\sigma = 0,75$$

$$(X_{med} - \mu) = \frac{k * \alpha}{2} \frac{\sigma}{n^{(0.5)}} = \frac{1.96 * 0.75}{25^{(0.5)}} = 0,294 \cong 0,30 \text{ OK}$$

Se inician los diseños de mezcla, con cada uno de los porcentajes establecidos según los criterios anteriores 100% RCD, 78% RCD – 22 % ARENA PUERTO TEJADA, 60% RCD – 40 % ARENA PUERTO TEJADA, 50% RCD – 50 % ARENA PUERTO TEJADA, (véase anexo 1)

De los diseños de mezcla obtenidos, se fabricaron los adoquines correspondientes a cada porcentaje, posteriormente se realizan las respectivas mediciones para chequear los requisitos geométricos, de resistencia y absorción según las especificaciones.

A continuación, se presentan los formatos con los resúmenes de los resultados de los ensayos, para cada una de las muestras probadas, teniendo como base los requisitos establecidos en la norma NTC 2017 (véase anexo 2).

En seguida, se muestra unas tablas resúmenes de los formatos del anexo 2

*Tabla 19. % Absorción Promedio VS Requisito NTC 2017*

Mezcla	% Absorción Promedio	Requisito NTC 2017	Cumple
<b>Mezcla patrón</b>	6,40%	7%	SI
<b>100% agregado grueso de RCD</b>	13,40%		NO
<b>78% agregado grueso de RCD y 22% arena de puerto tejada</b>	13,70%		NO
<b>60% agregado grueso de RCD y 40% arena de puerto tejada</b>	12,90%		NO
<b>50% agregado grueso de RCD y 50% arena de puerto tejada</b>	12,4		NO

Fuente: Grupo Investigador. 2023

*Tabla 20. Determinación de cumplimiento del requisito del módulo de rotura en adoquines, según NTC 2017*

Mezcla	Módulo de Rotura	Requisito Ntc 2017	Cumple
<b>Mezcla patrón</b>	5,10	5,00	SI
<b>100% agregado grueso de RCD</b>	1,70		NO
<b>78% agregado grueso de RCD y 22% arena de puerto tejada</b>	3,80		NO
<b>60% agregado grueso de RCD y 40% arena de puerto tejada</b>	1,80		NO
<b>50% agregado grueso de RCD y 50% arena de puerto tejada</b>	1,90		NO

Fuente: Grupo Investigador. 2023

Como trabajo adicional planteado al proyecto de profundización, se chequea la resistencia a la compresión de la muestra patrón, debido a que esta cumple con las especificaciones NTC 2017.

El Instituto Nacional de Vías en su especificación del artículo 510, exige que ningún valor individual este por debajo de 50 MPa y que el promedio de 5 elementos se encuentre como mínimo en 55 MPa. Se presentan los resultados seguidamente:

*Tabla 21. Determinación de cumplimiento del requisito de resistencia a la compresión en adoquines, según INV*

No.	LECTURA DE CARGA (KN)	LECTURA DE CARGA (N)	$An=Ls*Ws$	$Ra=Ts/Ws$	$Fa=(-0,374/Ra) +1,611$	$Rca=(Pmax/An) *Fa$
1	244,9	244.900	10.144,6	0,60	0,99	23,92
2	260,0	260.000	10.163,5	0,60	0,99	25,39
3	250,8	250.800	10.188,2	0,60	0,99	24,26
4	235,5	235.500	10.178,7	0,60	0,99	22,87
5	256,8	256.800	10.221,2	0,60	0,99	24,79
6	262,2	262.200	10.207,9	0,60	0,99	25,32
7	239,7	239.700	10.153,4	0,60	0,99	23,41
8	241,8	241.800	10.209,9	0,60	0,99	23,37
9	226,9	226.900	10.160,4	0,60	0,99	22,12
10	217,2	217.200	10.133,7	0,61	0,99	21,28
11	224,5	224.500	10.113,4	0,60	0,99	21,97
12	236,8	236.800	10.197,8	0,61	0,99	23,08
13	241,6	241.600	10.189,1	0,60	0,99	23,39
14	218,7	218.700	10.120,1	0,60	0,99	21,40
15	233,3	233.300	10.174,8	0,60	0,99	22,66
16	238,1	238.100	10.175,1	0,60	0,99	23,15
17	248,2	248.200	10.095,6	0,61	1,00	24,47
18	231,8	231.800	10.103,8	0,61	0,99	22,82
19	227,7	227.700	10.166,4	0,60	0,99	22,20
20	215,6	215.600	10.147,5	0,61	0,99	21,14
21	220,3	220.300	10.169,1	0,60	0,99	21,45
22	209,9	209.900	10.135,9	0,60	0,99	20,56
23	259,5	259.500	10.197,3	0,60	0,99	25,17
24	244,3	244.300	10.171,7	0,60	0,99	23,75
25	246,2	246.200	10.181,3	0,60	0,99	23,93
					<b>PROMEDIO</b>	<b>23,11</b>

Fuente: Grupo Investigador. 2023

Los resultados anteriores evidencian que los adoquines de la muestra patrón no cumplen con el requerimiento de la resistencia a compresión solicitado por el INV.

#### **6.4. Realización de pruebas de resistencia verificando mediante el análisis de ciclo de vida la reducción de los impactos ambientales negativos durante la elaboración de adoquines.**

En virtud de lo establecido en el objetivo tres de la presente investigación, a continuación, se presentan los resultados de los ensayos de resistencia para cada una de las muestras ensayadas, teniendo como base los requisitos establecidos en la norma NTC 2017, norma que establece los requisitos para adoquines de concreto y sus piezas complementarias, que puedan ser aptos para la construcción de pavimentos de adoquines de concreto, ya sea para el tráfico peatonal o para el tráfico vehicular sobre llanta, entre las que se consideran patios de puertos y de terminales de carga, aeropuertos, terminales de transporte, estaciones de servicio y cargas estáticas distribuidas, tales como bodegas o sitios de almacenamiento a granel.

En efecto, esta norma, determina las características específicas de textura, acabado, color, menor grado de eflorescencia, mayor densidad, menor absorción, mayor resistencia a la flexotracción, entre otros, características que deben ser tenidas en cuenta, al momento de ser utilizados estos materiales en la construcción, las cuales, deben ser consideradas por el constructor, pero también por el proveedores de adoquines de concreto, buscando garantizar la calidad de la obra y el cumplimiento normativo al respecto.

Para efectuar este análisis del ciclo de vida de los adoquines, atendiendo al propósito de la reducción de los impactos ambientales, negativos durante la elaboración de los adoquines, a continuación, se presentan en primera instancia la normatividad que regula su fabricación, y en segundo momento, los resultados de las pruebas de resistencia que determinan en este constructo académico, la viabilidad de utilizar los RCD de la Escombrera de Popayán para fabricar adoquines en concreto y reducir el impacto ambiental que esos residuos generan en la ciudad.

##### **6.4.1. Normatividad referente sobre la fabricación de adoquines**

A continuación, se relacionan y describen las normas técnicas que relacionan en su contenido las características, componentes, requisitos y condiciones para los materiales y su utilización en la construcción de adoquines.

- a) Norma NTC 2017
- b) Norma INV – 435 – 13. Resistencia del concreto a la abrasión mediante chorro de arena (Sandblasting)
- c) Norma INV – 426 – 13. Resistencia a la compresión de adoquines de concreto
- d) Norma INV – 427 – 13. Absorción de agua por los adoquines de concreto
  
- e) NTC - ISO 14040: 2006. Análisis Ciclo de Vida

Buscando analizar y cuantificar los aspectos ambientales de la fabricación de los adoquines, es preciso considerar la evaluación ambiental del ciclo de vida (ACV), establecido en la norma 14040, de la Organización International de Estandardización (ISO), cuyo estudio vincula todas las etapas de su existencia, es decir, yendo desde la extracción y procesado de las materias primas, su manufactura, transporte, distribución, uso, reutilización o reciclaje y la disposición final de los residuos.

Para el caso en comento de esta investigación, se analizará el ciclo de vida determinado para los adoquines en concreto fabricados a partir del material de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) generados en la ciudad de Popayán y dispuestos en la Escombrera que sirve a esta ciudad, atendiendo las siguientes etapas del proceso:



*Ilustración 12. Etapas del ciclo de vida de un producto.*

Fuente: ISO 14040. Geoinnova.org.

Mediante este análisis, es posible, además identificar oportunidad de mejora, confrontándolas con los riesgos que se asocian a la fabricación, así como comparar entre procesos o entre productos de diferentes materiales, que incluso se adicionan en las normas ISO 1404 y 14044, que fusionaron tres normas precedentes (14041, 14042 y 14043). De acuerdo con esta norma, se determinan 4 fases para desarrollar el estudio Análisis del Ciclo de Vida de un producto:

Inicialmente el estudio debe definir de los objetivos y alcances, estableciendo la profundidad, amplitud y detalle del análisis, seguidamente el inventario del ciclo de vida, identificando y cuantificando en las entradas, el consumo de recursos y materiales, al igual que, en las salidas, las emisiones al aire, al suelo y la generación de residuos, los cuales, puedan causar un impacto durante el ciclo de vida del producto.

Igualmente, se debe presentar la evaluación de los impactos sobre el medio ambiente que generan las entradas y salidas de materiales y recursos requeridos en la fabricación y utilización de adoquines con el fin de clasificar, caracterizar y valorar la importancia que los potenciales impactos generan.

Finalmente, se presenta la interpretación de los resultados, con el objeto de tomar decisiones y recomendaciones cuando este proceso de fabricación genere impactos negativos al medio ambiente y se propongan las acciones de mitigación de los efectos de este impacto.

Con relación a este análisis realizado al proceso de fabricación de adoquines con material RCD dispuestos en la Escombrera de Popayán, se encontró:

1. Adquisición de la materia prima

Se recurrió a realizar los ensayos con el material depositado en la Escombrera que sirve a la ciudad de Popayán, en donde, se localiza gran parte de los residuos de construcción y demolición que se acopian de las obras civiles adelantadas en la ciudad, material que, desde el momento de la recolección, se ven contaminados con otro tipo de materiales, como tierra, hierros, latas, sobrantes de pintura, madera, plástico, entre otros. Sin embargo, para realizar los ensayos, se

tomaron muestras de trozos de hormigón limpio o lozas de concreto provenientes de residuos de vías, que inicialmente fueron sometidas a la prueba de esclerómetro, luego de lo cual, el material fue llevado al laboratorio para las pruebas respectivas respecto de las mezclas requeridas para la elaboración de los adoquines, entre ellas, la trituración de acuerdo con la granulometría requerida por el ICPC.

## 2. Producción de energía y materia

Con el material triturado, y con las dosificaciones suministradas por la firma CONCREINSA S.A., en las que se determinan las cantidades de cemento, arena de Puerto Tejada y agua, se elaboraron las mezclas, tanto con arena gruesa y fina, de la cual resultó la mezcla seca, que fue llevada al recipiente de acero, al cual se le aplicó la carga de presión necesaria para su compactación.

Respecto del material grueso y de material fino a utilizar, es de precisar que, si este es proveniente de canteras o extraído de ríos, se generan dos impactos ambientales negativos, por una parte, la generación de excavaciones o extracciones que terminan alterando los cauces de los ríos, y por otra, el uso de transporte del material, que genera contaminación por uso de combustibles o ruido de los vehículos tipo volqueta utilizados para ello.

Es de significar que, en este ejercicio de ensayos, se requiere de disponer de algunos equipos que requieren de energía eléctrica o de combustión de gasolina o diésel, tales como, trituradora, gasolina y diésel, así como la prensa hidráulica que se alimenta de carga eléctrica.

Para efectuar la prueba de absorción, se requirió la inmersión del material en agua, para luego proceder al secado y posteriormente pasar a las pruebas de resistencia, en donde se producen residuos menores de material, no obstante, al resultar el deterioro de adoquines, estos irán directamente al sitio de disposición final o a la trituración para ser reutilizados nuevamente en el proceso.

## 3. Uso y tratamiento final

Una vez fabricados los adoquines, y si bien, la producción en masa de estos materiales, no fue objeto de desarrollo en la investigación, una vez consultadas las firmas fabricantes que suministran estos elementos a las obras de construcción en la región, se logró analizar que, este tipo de materiales, es utilizado como superficie de rodamiento de vehículos, así como de ornato de andenes, pasillos, patios o barandales en algunas obras, siendo en la primera utilidad, donde más afectación pueden sufrir los adoquines, por cuanto la carga a las que son sometidas de manera permanente, hace que se deterioren más rápidamente.

No obstante, los adoquines defectuosos, pueden ser nuevamente depositados en la Escombrera, pero con la posibilidad de volverse a utilizar en la fabricación de nuevos especímenes, dándole un tratamiento final de reutilización, disminuyendo los impactos ambientales que este tipo de residuos puedan generar.

#### 4. Vida útil de los adoquines

La vida útil de los adoquines depende en gran medida del diseño y del tipo de materiales que se utilicen para su elaboración, los cuales en promedio pueden durar entre 20 y 25 años, tiempo que depende de las sustancias a las que puedan ser expuestas en el sitio donde se instalaron, al tipo de cargas (tráfico) a las que estén sometidos e incluso, la forma de instalación.

#### 5. Disposición final de sobrantes o residuo de los adoquines

De presentarse sobrantes o residuos como se expresó anteriormente, estos pueden ser dispuestos en la Escombrera, lugar de donde pueden ser reutilizados nuevamente, generando menos deterioro ambiental por contaminación visual, ocupación de espacio público y como generadores de vectores contaminantes.

### **COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS MATERIALES DE CONEXPE, ARENA DE PUERTO TEJADA Y MATERIAL DE TRITURACIÓN RCD DURANTE EL CICLO DE VIDA.**

*Tabla 22. Comparativo de los impactos ambientales de entrada*

	<b>IMPACTOS AMBIENTALES DE ENTRADA DURANTE EL CICLO DE VIDA EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES.</b>	<b>Arena de trituración de CONEXPE</b>	<b>Arena de rio de PUERTO TEJADA</b>	<b>Arena de trituración residuos de construcción y demolición</b>
--	---	--	--------------------------------------	---

				<b>RCD</b>
<b>1</b>	Generación de excavaciones o extracciones que terminan alterando los cauces de los ríos o canteras naturales.	SI	SI	NO
<b>2</b>	Transporte del material, que genera contaminación por uso de combustibles, los vehículos tipo volqueta utilizados para ello.	SI	SI	NO
<b>3</b>	Transporte del material, que genera contaminación de ruido de los vehículos tipo volqueta utilizados para ello.	SI	SI	NO
<b>4</b>	Trituración de material que genera contaminación por el uso de combustibles energía eléctrica o de combustión de gasolina o diésel.	SI	NO	SI
<b>5</b>	Prensa hidráulica, genera contaminación por el uso de combustibles energía eléctrica o de combustión de gasolina o diésel en la compactación de la elaboración del adoquín.	SI	SI	SI

Fuente: Grupo Investigador. 2023

*Tabla 23. Comparativo de los impactos ambientales de salida*

	<b>IMPACTOS AMBIENTALES DE SALIDA DURANTE EL CICLO DE VIDA EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES.</b>	<b>Arena de trituración de CONEXPE</b>	<b>Arena de río de PUERTO TEJADA</b>	<b>Arena de trituración residuos de construcción y demolición RCD</b>
<b>1</b>	Escombros de adoquines durante las pruebas de resistencia (adoquines defectuosos).	SI	SI	NO
<b>2</b>	Escombros después de la vida útil de los adoquines.	SI	SI	NO

Fuente: Grupo Investigador. 2023

#### 6.4.2. Normatividad referente sobre gestión ambiental de RCD

##### a) Constitución Política de Colombia, que en su Artículo 66, determina

ARTÍCULO 66.- Competencia de Grandes Centros Urbanos. Los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón (1'000.000) de habitantes ejercerán dentro del perímetro urbano las mismas funciones atribuidas a las corporaciones autónomas regionales, en lo que fuere aplicable al medio ambiente urbano. Además de las licencias ambientales, concesiones, permisos y autorizaciones que les corresponda otorgar para el ejercicio de actividades o la ejecución de obras dentro del territorio de su jurisdicción, las autoridades municipales, distritales o metropolitanas tendrán la responsabilidad de efectuar el control de vertimientos y emisiones contaminantes, disposición de desechos sólidos y de residuos tóxicos y peligrosos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y adelantar proyectos de saneamiento y descontaminación. (Artículo 66. Constitución Política de Colombia, s.f.)

Así mismo, el Artículo 80, establece:

ARTÍCULO 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas (Artículo 80. Constitución Política, s.f.)

b) Decreto 1077 de 2015

Esta norma determina el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, el cual, establece en el Artículo 2.2.2.1.2.1.2, que dentro de la Etapa de Diagnóstico de los Planes de Ordenamiento Territorial se debe establecer la localización y capacidad de sitios de disposición final de residuos de construcción y demolición, así como, en el Artículo 2.3.2.2.1.14. determina los costos asociados al servicio público de aseo, los cuales, en el caso de los residuos de construcción y demolición, el usuario que solicite este servicio será quién asuma los costos asociados con el mismo.

Por su parte, en el Artículo 2.3.2.2.3.44, se determina que la recolección de estos RCD será responsabilidad del generador por el manejo y disposición. En tanto que, los municipios deberán coordinar con las prestadoras del servicio público de aseo o con terceros la ejecución de estas actividades y pactar libremente su remuneración para garantizar la recolección, transporte y disposición final adecuados.

Igualmente, la entidad territorial deberá tomar acciones para la eliminación de los sitios de arrojamiento clandestinos de residuos de construcción y demolición en vías, andenes, separadores y áreas públicas según sus características.

c) Resolución 1257 de 2021.

Por medio de la cual, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones.

En este acto administrativo, se determinan las definiciones, tales como, almacenamiento que tiene que ver con la ubicación temporal y/o depósitos para su recolección y transporte; gran generador de RCD, es decir, quien produce estos residuos, quien requiere de una licencia de construcción y ambiental; simbiosis industrial, determinada como una estrategia colaborativa para el intercambio de flujo de materiales, agua y energía y la forma de compartir servicios entre los actores, que contribuyan con el uso eficiente de recursos y la reducción del impacto ambiental; finalmente se refiere al receptor, definido como la persona natural o jurídica que utilice los RCD para aprovechamiento como materia prima. Determina igualmente esta resolución, lo referente a aprovechamiento en zonas fijas o móviles, las cuales deben cumplir con unas normas mínimas como: recepción y pesaje, separación y almacenamiento de RCD aprovechables, aprovechamiento y almacenamiento de procesados. De igual manera, plantea las medidas mínimas de manejo ambiental de los sitios de disposición final de RCD, debiéndose establecer un plan de manejo ambiental, así como las obligaciones de los generadores, de los gestores, de los departamentos y municipios y de la autoridad ambiental competente.

d) Resolución 0472 de 2017

Mediante esta norma, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD. En esta resolución, se establece el objeto y ámbito de aplicación, tanto para las personas naturales, como para las jurídicas que, generen, recolecten, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan RCD en obras civiles o conexas en Colombia.

Establece igualmente, un marco conceptual, al igual que, los procedimientos para la gestión integral de RCD, considerando la jerarquía en la gestión de RCD, las actividades de gestión, de prevención y reducción, así como almacenamiento, puntos limpios y aprovechamiento, al igual que, las medidas mínimas de manejo ambiental de los puntos limpios en las plantas de aprovechamiento. Por otra parte, refiere la obligatoriedad de establecer por parte de los municipios de sitios de disposición final considerando las características en el manejo que no

afecten el medio ambiente, determinando para ello, el plan de manejo ambiental, así como la atención a las prohibiciones establecidas.

#### 6.4.3. Pruebas de resistencia para verificar el ciclo de vida de los adoquines

Buscando la reducción de los impactos ambientales negativos tanto en la disposición final de los RCD, utilizándolos como materia prima, así como, durante la elaboración de adoquines, los investigadores determinaron las siguientes pruebas que permitan verificar el ciclo de vida de estos materiales y con ello, determinar si con el uso de esta materia prima, se puede contribuir a minimizar los afectos contaminantes de estos residuos en el entorno natural, tanto de la ciudad como del sitio de disposición final. En virtud de esto, a continuación, se presenta las tablas y cálculos efectuados a una muestra de 25 adoquines fabricados con material de RCD, para al final, establecer si este material captado, cumple o no, con las condiciones requeridas en la calidad de los adoquines fabricados.

##### 1. Resistencia a la flexotracción [Módulo de Rotura – (Mr)]:

Los adoquines de concreto deben cumplir los requisitos de resistencia a la flexotracción o módulo de rotura (Mr) establecidos en la siguiente tabla:

*Tabla 24. Mediciones ideales de resistencia a la flexotracción en 5 especímenes*

Módulo de rotura a los 28 días (Mpa)		Longitud de la huella (Lh), Máximo, en mm
Promedio de 5 especímenes	Individual	Promedio de 5 especímenes
5,00	4,20	-
4,20	3,80	23

Fuente: Norma NTC 2017

No obstante, en el trabajo de investigación, se desarrolló esta medición en 25 especímenes, tal como se referencia en (véase anexo 2).

##### 2. Absorción de agua:

El resultado se puede verificar en la Tabla 40 y subsiguientes para cada una de las mezclas preparadas.

*Tabla 25. % Absorción Promedio VS Requisito NTC 2017*

Mezcla	% Absorción Promedio	Requisito NTC 2017	Cumple
<b>Mezcla patrón</b>	6,40%	7%	SI
<b>100% agregado grueso de RCD</b>	13,40%		NO
<b>78% agregado grueso de RCD y 22% arena de puerto tejada</b>	13,70%		NO
<b>60% agregado grueso de RCD y 40% arena de puerto tejada</b>	12,90%		NO
<b>50% agregado grueso de RCD y 50% arena de puerto tejada</b>	12,4		NO

Fuente: Grupo Investigador. 2023

Estos resultados de absorción en las mezclas propuestas donde se busca utilizar el máximo de agregado grueso proveniente de RCD nos indican la gran cantidad de vacíos presentes en el adoquín; la mezcla patrón utilizada ofrece un porcentaje de vacíos que cumple con el requisito de la norma, pero en la medida que incrementamos el % de material grueso proveniente RCD mayor es el porcentaje de vacíos, circunstancia demasiado importante, ya que esta puede propiciar que los resultados esperados para resistencia a la flexotracción no se cumplan.

### 3. Resistencia a la flexotracción [Modulo de Rotura – (Mr)]:

El resultado se puede verificar en (véase anexo 2) para cada una de las mezclas preparadas:

*Tabla 26. Determinación de cumplimiento del requisito del módulo de rotura en adoquines, según NTC 2017*

Mezcla	Módulo de Rotura (Mpa)	Requisito Ntc 2017 (Mpa)	Cumple
<b>Mezcla patrón</b>	5,10	5,00	SI
<b>100% agregado grueso de RCD</b>	1,70		NO
<b>78% agregado grueso de RCD y 22% arena de puerto tejada</b>	3,80		NO
<b>60% agregado grueso de RCD y 40% arena de puerto tejada</b>	1,80		NO
<b>50% agregado grueso de RCD y 50% arena de puerto tejada</b>	1,90		NO

Fuente: Grupo Investigador. 2023

Se puede observar que a medida que se incrementó el agregado grueso proveniente de RCD el módulo de rotura disminuyó considerablemente, lo que implica que posiblemente para obtener unos adoquines que cumplan con la norma NTC 2017, debemos usar un porcentaje más bajo de

agregado proveniente de RCD, eliminar todos los finos provenientes de la trituración del RCD, y mejorar algunos aspectos relacionados con la obtención de la granulometría, pues se pudo observar que esta labor puede variar de una persona a otra; pues cada individuo le da el manejo que considere a la hora de abrir o cerrar la quijada de la máquina, al igual que el número de veces que considere pasar el material por la trituradora para la obtención de la granulometría.

#### 4. Requisitos físicos

Una vez fabricados los adoquines con agregados RCD provenientes de concreto de losas de pavimento hidráulico; se verificó el cumplimiento de la norma NTC 2017 de acuerdo con los requisitos físicos ya mencionados. Relación entre las dimensiones: En la Tabla (véase anexo 2)

#### 5. Apariencia

## VII. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales capítulo VI., a continuación, se presenta el respectivo análisis:

### 1. Ensayo 2: Análisis granulométrico NTC 77 o INV E -213 y 214 -2013

Teniendo como guía las recomendaciones del Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) y con la granulometría obtenida del material RCD (*Tabla 5*), se puede observar (*Grafico 1*) que es un material más grueso, que al mezclarlo con una arena fina se ajustaría mejor a la curva ideal recomendada por el ICPC, con el ánimo de garantizar un mínimo de vacíos.

*Tabla 27. Porcentaje pasa ICPC - % Pasa material RCD*

Tamiz (mm)	Tamiz (Pulgadas)	% Pasa	Material RCD % Pasa
25.00	1"	100	100
19.00	3/4"	100	100
12.50	1/2"	100	100
9.50	3/8"	100	100
4.76	No. 4	85	79,6
2.38	No. 8	65	56
1.19	No. 16	50	38,3
0.60	No. 30	35	23,5
0.30	No. 50	15	11,4
0.15	No. 100	5	3,6
0.07	No. 200	3	1,1

**Fuente:** Ensayo realizado en el laboratorio de Suelos, Materiales, Concretos y Pavimentos GEOFISICA SAS.

En virtud de lo anterior, se infiere que, haciendo una combinación de material reciclado con material de arena fina se podrá obtener una granulometría muy cercana a la ideal. De este concepto de mezcla de porcentajes (%), se parte con algunos posibles valores para iniciar el proceso experimental del diseño y elaboración de adoquines que cumplan con la NTC 2017.

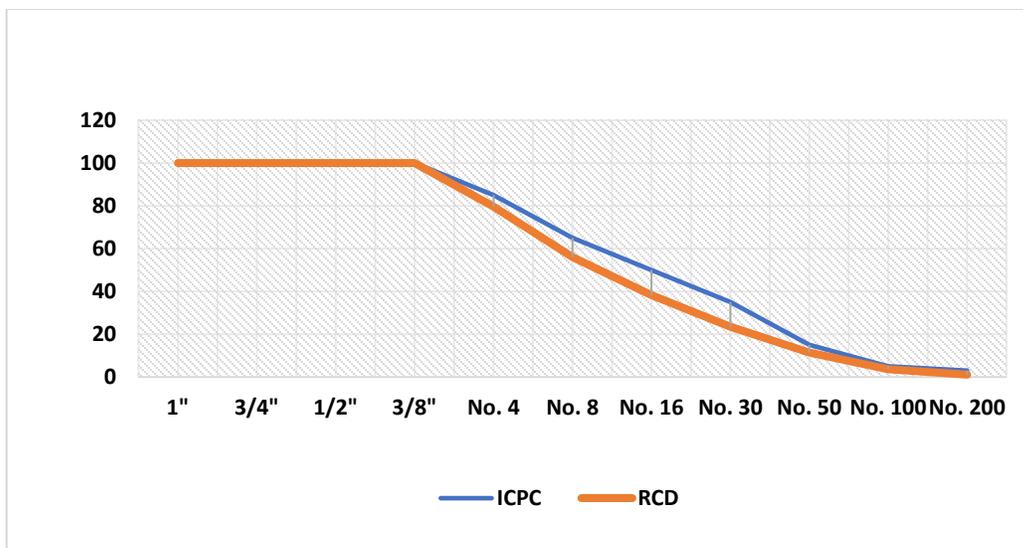


Gráfico 1. Granulometría RCD e ICPC

Fuente: Grupo Investigador. 2023

## 2. Ensayo 3: Densidad relativa (gravedad específica) y absorción NTC 237 o INV E - 222 - 13

De acuerdo con los datos del ensayo de laboratorio establecidos en la *Tabla 6*, se obtuvo una absorción de 8,76%, en la cual, el requisito máximo es del 4%, lo que implica que, el material RCD estudiado en esta investigación, contiene un % alto de vacíos, valor que se debe tener en cuenta en el diseño de la mezcla, por cuanto, el agregado, requerirá agua para llenar los poros permeables.

Tabla 28. Requisitos de agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico

Ensayo		Norma de Ensayo INV E	Requisito
<b>Durabilidad</b>			
Pérdidas en ensayo de solidez, en sulfatos, % máximo	Sulfato de sodio	E - 220	10
	Sulfato de Magnesio	E - 220	15
<b>Limpieza</b>			
Índice de plasticidad, % máximo		E - 126	NO PLÁSTICO
Equivalente de arena, % mínimo		E - 133	60
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		E - 211	3
Partículas livianas, % máximo		E - 221	0,5
Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), % máximo		E - 214	3
<b>Contenido de materia orgánica</b>			
Color más oscuro permisible		E - 212	Igual a muestra patrón
<b>Características químicas</b>			
Contenido de sulfatos, expresado como SO <sub>4</sub> , % máximo		E - 233	1,2

Ensayo	Norma de Ensayo INV E	Requisito
<b>Absorción</b>		
Absorción de agua, % máximo	E - 222	4

Fuente: Tabla 500.4. Artículo 500 INV

### 3. Ensayo 4: Resistencia al desgaste NTC 98 o INV E - 218 Y 219 - 13

*Tabla 29. Requisitos de agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico*

Ensayo	Norma de Ensayo	Requisito
Dureza	- pág. 57	
<b>Desgaste Los Angeles</b>	En seco, 500 revoluciones, % máximo	40
	En seco, 100 revoluciones, % máximo	8
	Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máximo (1)	60
	Relación húmeda/seco. 500 revoluciones, % máximo	2

Fuente: Tabla 500.6- Artículo 500 INV

Según los requisitos de calidad de los agregados para la fabricación de adoquines, es fundamental su resistencia al desgaste, considerando que, este material representa alrededor de un 95% del adoquín. Como resultado se obtuvo el 40% de pérdida de masa, que según la Tabla 500.6 del Artículo 510 tomada como referencia, sería el requisito máximo, de lo cual, se puede inferir que, el material RCD no tiene una buena resistencia al desgaste, por lo tanto, su durabilidad será afectada.

### 4. Ensayo 4: Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales NTC 589 o INV E - 211 - 13

*Tabla 30. Requisitos de agregado fino (arcilla y partículas deleznales) para pavimentos de concreto hidráulico*

Ensayo	Norma de Ensayo INV E	Requisito
<b>Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo</b>	E - 211	3

Fuente: Tabla 500.4. Artículo 500 INV

Se obtuvo del ensayo de laboratorio un porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales de 0,65%, que, considerando lo establecido en Tabla 500.4 del artículo 500 -07 tomada como

referencia, el requisito máximo es del 3%, lo que implica que, el material de RCD aquí estudiado, no contiene partículas que pueden quebrarse o destrozarse con facilidad, así como que, tengan poca vida útil o que no cuenten con buena resistencia.

**5. Ensayo 6: Equivalente de arena de suelos y agregados finos NTC 6179 o INV E - 133 - 13**

Del ensayo de laboratorio realizado, se obtuvo un equivalente de arena de 86 que, de acuerdo con la Tabla 500.4) del Artículo 500 -07 tomada como referencia, determina que, el requisito mínimo es de un 60%, lo que implica que, el agregado de RCD, no contiene material fino nocivo que pueda afectar su resistencia.

*Tabla 31. Requisitos de agregado fino (arena) para pavimentos de concreto hidráulico*

Ensayo	Norma de Ensayo INV E	Requisito
Equivalente de arena, % mínimo	E - 133	60

Fuente: Tabla 500.4. Artículo 500 INV

**6. Ensayo 7: Impurezas orgánicas NTC 127 o INV E - 212 - 13**

*Tabla 32. Requisitos de agregado fino, respecto de impurezas orgánicas*

Ensayo	Norma de Ensayo INV E	Requisito
<b>Contenido de materia orgánica</b>		
Color más oscuro permisible	E – 212	Igual a muestra patrón

Fuente: Tabla 500.4 Artículo 500 INV

Del ensayo de laboratorio realizado en este aspecto, se obtuvo como resultado de impurezas orgánicas en los agregados, un color menor al color de referencia, lo que demuestra que el material estudiado en esta investigación de RCD, no contiene materia orgánica.

## Discusión

En virtud de lo planteado por tratadistas referidos en el Marco Teórico y sus afirmaciones respecto del uso de los RCD como agregado en la fabricación de adoquines de concreto y su beneficio al medio ambiente y una vez, realizadas las pruebas de este material como agregado, es pertinente abrir los siguientes aspectos de discusión.

Según Rincón (2018), el impacto negativo que sobre la contaminación ambiental se ejerce por el hombre con la ejecución de construcciones civiles, en las que se evidencia el consumo de grandes cantidades de energía, agua, materia prima a base de recursos naturales no renovables, se confirma en la presente investigación, por cuanto, el material del RCD generado en la ciudad, en gran porcentaje es depositado en la “Escombrera” de la ciudad, en tanto que, un porcentaje menor, es expuesto al aire libre en zonas donde se contamina el suelo, el agua y el paisaje.

Se coincide en esta investigación, con lo planteado por Jurado y Ortiz (2021), respecto del hecho que, las constructoras de infraestructura modernas, buscando mitigar el impacto medioambiental, reutilización de agregados en obras ingenieriles, disminuyendo la extracción de recursos naturales como agua, hormigón, arcilla, cal, aprovechamiento y reciclaje de los residuos de construcción y demolición RCD para la obtención de agregados de construcción como insumo en la fabricación de adoquines a partir de los residuos generados en la demolición de pavimentos de concreto hidráulico que se están sustituyendo en las calles de la ciudad de Popayán.

Si bien la Norma NTC 2017 establece los requisitos y características de los adoquines en concreto y sus piezas complementarias, en la presente investigación, se pretendió aplicar un agregado grueso provenientes de RCD, al cual, previamente a su uso, se le realizaron ensayos con el fin de caracterizar el material y evaluar la posibilidad de utilizarlo en la mezcla para la elaboración de adoquines; agregado que entraría a sustituir del agregado grueso proveniente de la trituración de material de cantera y que además, sirviera al propósito de disminuir en el sitio final de disposición de estos residuos de la cantidad de RCD, mejorando el entorno ambiental, se logró establecer que estos materiales no cumplieron con las características y requisitos

establecidos, lo cual, no es coincidente con lo planteado por tratadistas que en otras investigaciones, lo determinan como un agregado ideal.

Lo anterior, puede considerarse a partir de dos aspectos: en primera instancia el material de RCD triturado y tamizado, presenta falencias respecto a durabilidad y absorción; en segunda instancia, al fabricar los adoquines con este agregado, se hizo necesario agregar a la mezcla, mayores cantidades de cemento, agregado fino o sellantes, para reducir las pérdidas al aplicarles las pruebas de flexotracción, de absorción y geométricos, y que este material sea útil en las obras civiles. Con estas mayores adiciones de otros materiales a la mezcla se determinó que los costos de producción de adoquines, lo cual, incide en la rentabilidad del fabricante.

## Recomendaciones

Realizadas las pruebas para verificar la viabilidad de fabricar adoquines con material de RCD, se puede recomendar que:

- En materia ambiental, es preciso aplicar los parámetros normativos establecidos en la Resolución 427 de 2017, respecto de la gestión integral de estos residuos, así como, el aprovechamiento de gran parte de ellos, en la transformación en otros productos requeridos por las obras de infraestructura en la ciudad, siempre y cuando, las características físicas y mecánicas, cumplan las normas técnicas nacionales establecidas.
- Para la fabricación de adoquines con materiales de la zona agregando material RCD, se hace necesario la mezcla de tres componentes con las siguientes recomendaciones:
  1. Mezcla de agregado de trituración (conexpe), arena fina (puerto tejada) y arena de trituración de residuos de construcción RCD.
  2. Se recomienda ajustar la granulometría de la mezcla de los tres materiales a la que opera la empresa CONCREINSA, quien hace unos arreglos respecto de la recomendada por el INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO ICPC.
  3. El porcentaje de material RCD que se puede adicionar a la mezcla está alrededor del 5%.

Para la elaboración de los adoquines es indispensable la caracterización de los materiales que componen la mezcla, así como un control en la producción de estos.

Realizar los ajustes granulométricos, el diseño de mezcla (ver anexo 3), y los ensayos según la norma NTC 2017, donde se cumple con los requisitos y se deja como base para futuros diseños de mezcla (ver anexo 4).

- De querer utilizar este material (RCD) en fabricación de adoquines para tráfico vial, es pertinente, realizar pruebas específicas de las características físicas y mecánicas, que garanticen la calidad del agregado en la preparación de la mezcla y finalmente en los adoquines.
- En atención a la caracterización efectuada al material de RCD generado en la ciudad de Popayán y depositado en la “Escombrera” y, considerando que, los adoquines elaborados

con este agregado donde se reemplazó la arena gruesa de CONEXPE en diferentes porcentajes no cumplieron a cabalidad en las pruebas de flexotracción y absorción exigidas en la Norma NTC 2017, es conveniente manejar diferentes relaciones agua cemento para analizar su comportamiento y posible desempeño aunque esto conlleve a utilizar mayor cemento o algún tipo de aditivo.

- Es preciso, disponer y ejecutar un riguroso control de calidad durante todo el proceso de caracterización y utilización del agregado, si se desea lograr resultados confiables; teniendo la certeza de contar y utilizar materiales adecuados para la dosificación y mezclado de los insumos, siendo preciso entonces, aplicar los procedimientos y ensayos respectivos de elaboración, curado y pruebas de resistencia, para determinar la calidad del producto a ofertar al mercado.

## Conclusiones:

- El material de RCD genera un gran impacto ambiental, que de no ser bien gestionado afecta el medio ambiente en sus componentes de suelo, agua, paisaje, comprometiéndose a disponerlos adecuadamente en los sitios determinados de acuerdo con las normas y regulaciones establecidas por el gobierno nacional y local; sitios en los cuales, es preciso realizar el apropiado manejo para reducir incluso en estos lugares, la generación de impactos negativos.
- Este material una vez se evalúen sus características y propiedades físicas y mecánicas y que estas cumplan con los requerimientos establecidos en las normas técnicas, pueden servir como agregado en la mezcla para la fabricación de adoquines que pueden utilizarse como superficie de rodamiento para el tráfico vehicular, peatonal o para obras de ornato en las construcciones civiles, una vez, se efectúen las pruebas de resistencia a la flexotracción, absorción y de características geométricas, determinándose la calidad de estos materiales.
- Al poderse utilizar el material de RCD como agregado, una vez cumplan con las características y requisitos, se contribuye considerablemente a la reducción de los impactos ambientales, por cuanto, los fabricantes pueden acceder fácilmente a este material residual
- La muestra compuesta por 78% de material RCD y 22% de arena de Puerto Tejada nos indica que al mezclarlas se obtiene una granulometría muy similar a la recomendada por el Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC; finalmente no cumplió con el módulo de rotura para uso vehicular estipulado por la norma NTC 2017; posiblemente por el porcentaje de vacíos presente en el adoquín; los cuales, pueden generar los siguientes problemas:
  - a) Más propensos a la fractura, el agrietamiento y el desgaste prematuro.
  - b) Debilitan la estructura del adoquín y reducen su capacidad para soportar cargas pesadas provenientes del tráfico vehicular.

- c) Las cargas se distribuirán de manera desigual en el material, lo que puede provocar la fractura del adoquín.
  - d) Los vacíos pueden permitir que el agua y otros líquidos penetren en los adoquines, lo que puede provocar la erosión y la desintegración de estos con el tiempo.
  - e) Afectan la apariencia estética del producto final.
- Se considera que, posiblemente algunas de las causas que afectan el resultado de la resistencia a la flexión para adoquines vehiculares, tiene que ver directamente con los siguientes aspectos:
    - a) Los agregados no se mezclan adecuadamente.
    - b) El agregado de RCD proveniente del concreto triturado genera gran incertidumbre, en cuanto a las características mecánicas que ellos tienen; a pesar de que se realizaron ensayos para la caracterización de estos, sería más conveniente conocer a detalle sus características y comportamiento, para poder aprovechar todo su potencial.
    - c) En la fabricación de los adoquines se dejó una constante relación agua-cemento (A/C), garantizando la utilización mínima de cemento para obtener adoquines que cumplan la norma y que brinden una fácil comercialización del producto con bajos costos de inversión para altos porcentajes de agregado RCD.  
Como consecuencia de esta decisión se pudo ver afectada la resistencia a la flexión. La mezcla patrón cumple con la resistencia, pero al realizar las combinaciones con agregado RCD, la pasta de cemento del RCD pudo haber incrementado la cantidad de finos, razón por la que, se deberían utilizar técnicas de separación física y química para eliminar la pasta de cemento y obtener un material RCD adecuado para la fabricación de adoquines, sin embargo, esto generaría sobre costos.
    - d) En el proceso de preparación de la mezcla, se observó que, tan pronto se adicionaba el agua de mezclado, los agregados inmediatamente la absorbían; generando grumos alrededor del agregado, esto como consecuencia de su alto % de absorción; este fenómeno indicó que, es posible que el cemento no logre hidratarse en un 100%; a pesar de que, teóricamente se calculó un volumen de

agua para hidratación del cemento y otro volumen para saturación del agregado (dependiendo de la humedad del agregado). Finalmente, la mezcla presentó un estado muy seco y poco manejable. Situación que se evidenciaba a medida que se incrementa el porcentaje de RCD en la mezcla.

Algunos autores describen en investigaciones relacionadas con el uso de agregados provenientes de RCD, que estos tienen una mayor absorción que agregados naturales, además el contenido de pasta de cemento adherido se encuentra entre un 30% y 36% de la masa total del agregado. Si se supone que una partícula de agregado natural tiene una resistencia inicial, ésta la conservará al 100% hasta la fabricación del concreto, mientras que, al utilizar agregado proveniente de RCD, éste ya tiene una pasta inicial que cubre el agregado natural, por tal motivo, su resistencia ya no será del 100%, disminuyéndose en un 36% la cual pertenece a la cantidad de pasta adherida en el agregado.

- Con la investigación se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del material RCD, concluyendo que el material tiene un 40% de pérdida de masa (desgaste los ángeles) lo cual no tendrá una buena resistencia al desgaste y su durabilidad será menor, así como la determinación que este material, presentan altos % de absorción, alrededor de un 39% respecto a la arena de trituración de CONEXPE, por lo que en la caracterización del agregado, se observó que el material reciclado presenta una menor masa que el material natural, debido a los tipos de materiales que lo componen.
- La investigación arroja que es posible la utilización de material de residuos de construcción RCD, para la fabricación de adoquines que cumplan con la norma NTC 2017. Inicialmente la propuesta estaba dirigida a reemplazar el material de CONEXPE por altos porcentajes de material RCD para generar un alto impacto ambiental, pero en el proceso de fabricación y ensayo de los adoquines, se pudo constatar que estas mezclas no cumplen con los requisitos de la norma. Se hizo necesario mezclar el material de RCD con los dos agregados CONEXPE y ARENA DE PUERTO TEJADA, y ajustar la granulometría a la adoptada por CONCREINSA, dándonos como resultado mezclar los tres materiales en porcentajes de CONEXPE 80%, ARENA DE PUERTO 15% y RCD 5%, esta composición cumple con los parámetros exigidos por la NTC 2017.

- cuadro de costos de adoquines con y sin RDC que permita visualizar el costo - beneficio.

## Bibliografía

- Alcaldía de Bogotá. (2006). Guía ambiental para el manejo de escombros de la ciudad de Bogotá. D.C. Secretaría de Ambiente. Bogotá.
- Acevedo, C. (2015). Evaluación de la factibilidad de obtención de argamasa a partir del aprovechamiento de ladrillo y mortero contenidos en escombros (tesis de maestría). Cali, Colombia: Universidad de la República.
- Bustos, C (2009). La problemática de los desechos sólidos. Economía; (27). Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela. 121-144 Pg. [Fecha de Consulta 19 de Agosto de 2021]. ISSN: 1315-2467. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195614958006>
- Ceballos, S., Gonzáles, C y Sánchez, J. (2019). Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) Generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la Fabricación de Adoquines. Revista Ion. 2021;34(1):27-35. doi:10.18273/revista ION. Volumen 34. N° 1-2021.003
- Concrelab. (s.f). Ficha técnica concretos y prefabricados. Recuperado de: <https://www.concrelab.com/wp-content/uploads/2020/01/NTC-5147-min.pdf>
- Constitución Política de Colombia. (2023). Última actualización 20 de mayo de 2023. Diario Oficial N° 52.379 de Abril de 2023. Recuperado de: <http://www.secretariasenado.gov.co/constitucion-politica>
- Guzmán, A., Celis, L & Bolívar, W. (2016). Análisis de la degradación de los agregados pétreos a causa de la compactación por impactos Canteras Mitricol y doble A Ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá.

- Hernández-Sampieri, R., Collado, C & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. Sexta Edición. McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. Ciudad de México.
- Jurado, J & Ortiz, P. (2021). Análisis de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Colombia según las propiedades y clasificación propuestas en la Guía Española de Áridos Reciclados. Universidad Católica de Colombia. Bogotá.
- Jaramillo, J. (2003). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; Efectos de la inadecuada gestión de residuos sólidos; Universidad de Antioquía, Medellín.
- López, M., Pérez, A & Garnica, P. (2014). Estado del arte sobre el uso de residuos y sub-productos industriales en la construcción de carreteras. Publicación Técnica 394. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Sanfandila Queretaro. México.
- Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0472 de 2017. Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD y se dictan otras disposiciones. Recuperado de: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/normativa/resoluciones>.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), (2007). “Guía para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos Urbanos.” En: [http://193.138.105.50/filestorage/download/?file\\_id=72852](http://193.138.105.50/filestorage/download/?file_id=72852), 2008.
- Paz, D. (2008). Diagnóstico para el establecimiento de la escombrera en el municipio de Santander de Quilichao Cauca. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali.

Rincón, C. (2018). Revisión del estado del arte, normativo, tecnológico e investigativo en la gestión de los residuos de construcción y demolición. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga.

Salazar R, et al. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. Revista Tecnura;19(44):157-170.

Secretaria de Ambiente de Bogotá (2014, Enero 01) "Guía ambiental para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición - RCD en la obra", [En línea]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co>