

**DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y DESGASTE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN PARA SU IMPLEMENTACIÓN COMO
MATERIAL GRANULAR EN GEODRENES CON TUBERÍA COLECTORA**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**ANDRÉS FELIPE GUERRERO RANGEL
MÓNICA DURLEY FORERO ESTUPIÑAN**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2019

**DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y DESGASTE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN PARA SU IMPLEMENTACIÓN COMO
MATERIAL GRANULAR EN GEODRENES CON TUBERÍA COLECTORA**

**ANDRÉS FELIPE GUERRERO RANGEL
MÓNICA DURLEY FORERO ESTUPIÑAN**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

**Director
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. noviembre 16 de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme salud y vida para alcanzar este logro. A mi madre, abuelita y demás familiares, por enseñarme con su ejemplo, a ser una persona de bien, por haberme apoyado a lo largo de todo mi proceso formativo y enseñarme que con esfuerzo y trabajo duro todo puede ser conseguido.

A todos los profesores, docentes y maestros que me han acompañado a lo largo de mi formación educativa, en especial el ingeniero Juan Carlos Ruge Cárdenas, por encaminarnos en el desarrollo de este proyecto, y apoyarnos con su gran conocimiento y experiencia.

Finalmente agradecer a todas y cada una de las personas que hacen parte de la Universidad Católica de Colombia, ya que, de una u otra manera, contribuyeron en gran medida a mi formación personal y profesional.

Andrés Felipe Guerrero Rangel

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza, luz y compañía en los momentos de debilidad, además de brindarme una vida llena de conocimientos nuevos, experiencias y mucha felicidad.

A mis padres, Gerardo y Socorro, por el ejemplo de constancia, dedicación y esfuerzo. Por darme la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Las ayudas y el apoyo recibido han formado bases fuertes y de gran importancia. A mi hermano Andrés Santiago, por ser un ejemplo de disciplina, bondad y ternura, y por siempre llenar mi vida de orgullo, alegrías y amor.

A todos y cada uno de los docentes que estuvieron en el desarrollo de mi carrera, especialmente al Ingeniero Juan Carlos Ruge, por los conocimientos compartidos y la oportunidad de desarrollar esta tesis profesional.

Finalmente, a todas aquellas personas, colegas y amigos que me brindaron su apoyo, tiempo, compañía e información a lo largo de la carrera para el logro de mis objetivos.

Mónica Durley Forero Estupiñan

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES	15
1.1. Línea de Investigación	15
1.2. Planteamiento del Problema	15
1.3. Antecedentes	18
1.4. Alcances y Limitaciones	20
1.4.1. Alcances	20
1.4.2. Limitaciones.....	20
1.5. JUSTIFICACIÓN	21
1.6. OBJETIVOS	23
1.6.1. Objetivo general	23
1.6.2. Objetivos específicos.....	23
2. MARCOS DE REFERENCIA	24
2.1. Marco Conceptual	24
2.2. Estado del Arte	30
2.2.1. Estudios e investigaciones en el área de los geodrenes.....	30
2.2.2. Aplicación de materiales RCD a nivel mundial.....	31
2.2.2.1. Estados Unidos (Robinson, Menzie, & Hyun, 2004)	31
2.2.2.2. Unión Europea (Lauritzen, 2004); (Winter & Henderson, 2003)	31
2.2.2.3. Hong Kong (Fong, Yeung, & Poon, 2004)	32
2.2.2.4. Taiwán (Huang, Lin, Chang, & Lin, 2002).....	32
2.2.2.5. Latinoamérica y Colombia (Sora, 2016).....	32
2.2.3. Estudios realizados sobre las propiedades de los materiales RCD.....	33
2.3. Marco Teórico	35
2.3.1. Problemática de los sistemas de drenaje	35
2.3.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	36
2.3.3. Geodren filtrante	36
2.3.4. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	38
2.3.4.1. Composición de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	38
2.4. Marco Legal	40
3. METODOLOGÍA	42
3.1. Recopilación de información	42
3.2. Selección del material de estudio	42

3.3.	Caracterización de los materiales RCD	43
3.4.	Ensayo de desgaste y durabilidad en el material RCD.....	44
3.5.	Ensayo de cantidad de partículas livianas.....	47
3.6.	Ensayo de permeabilidad (cabeza constante) y lavado.....	52
4.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	56
4.1.	Resultados	56
4.1.1.	Resultados de la caracterización granulométrica del material RCD.....	56
4.1.2.	Resultados de desgaste y durabilidad en el material RCD.....	56
4.1.3.	Resultados de cantidad de Partículas Livianas.....	58
4.1.4.	Resultados de ensayo de Permeabilidad (Cabeza constante)	61
4.1.5.	Resultados de ensayo de Turbiedad (Lavado del material).....	63
4.2.	Análisis de Resultados	64
4.2.1.	Desgaste	64
4.2.2.	Gravedad Especifica y Absorción	65
4.2.3.	Porcentaje de Partículas Livianas.....	66
4.2.4.	Coefficiente de Permeabilidad.....	67
4.2.5.	Lavado	67
4.3.	Beneficios Operacionales y Constructivos.....	68
4.4.	Transferencia de Resultados.....	68
4.5.	Conclusiones.....	70
4.6.	Recomendaciones.....	72
5.	REFERENCIAS	744

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Composición típica de los residuos de construcción y demolición. Fuente: (Sánchez, 2016)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2. Mapa conceptual del proyecto. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3. Escorrentías e Infiltración en suelo natural y urbano. Fuente: (Padial, 2017)</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4. Esquema de un sistema de drenaje de tipo Geodren filtrante. Fuente: (Geomatrix, 2017)</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5. Composición general de los RCD. Fuente: Elaboración propia - Basado en: (Cointreau, 1982)</i>	<i>39</i>
<i>Figura 6. Cuarteo del material RCD. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 7. Material lavado RCD mixto y de concretos, respectivamente. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8. Contaminantes extraídos del material RCD. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 9. Proceso de tamizado del material RCD concreto. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 10. Incorporación del material RCD concretos junto a las cargas abrasivas en la máquina de Los Ángeles. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 11. Material RCD concretos después del ensayo en la máquina de Los Ángeles. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 12. Material RCD mixto en inmersión. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13. Material RCD mixto en condición SSS. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14. Material RCD mixto, toma de masa sumergida. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 15. Material RCD concretos y mixto, respectivamente en condición SSS. Fuente: Documentación propia.</i>	<i>51</i>

<i>Figura 16. Reactivo para preparar el líquido pesado, Cloruro de Zinc.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	51
<i>Figura 17. Material RCD concretos y mixto, respectivamente, inmersos en el líquido pesado.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	51
<i>Figura 18. Partículas flotantes de los materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	52
<i>Figura 19. Material RCD concretos en inmersión.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	54
<i>Figura 20. Montaje del material RCD concreto en el permeámetro.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	54
<i>Figura 21. Agua drenada del permeámetro de materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	54
<i>Figura 22. Agua drenada de los materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente, en las celdas para medición de la turbiedad.</i>	
<i>Fuente: Documentación propia.</i>	55

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación y Tipologías de los SUDS según su función.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	36
<i>Tabla 2. Granulometrías de las muestras de ensayo.</i> <i>Fuente: INVIAS, 2013</i>	45
<i>Tabla 3. Cantidades mínimas para el ensayo de Densidad.</i> <i>Fuente: INVIAS, 2013</i>	47
<i>Tabla 4. Caracterización Granulométrica – Material RCD Concretos.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	56
<i>Tabla 5. Caracterización Granulométrica – Material RCD Mixto.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	56
<i>Tabla 6. Parámetros para el Ensayo de Resistencia al desgaste en Maquina de los Ángeles – Material RCD Concretos.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	57
<i>Tabla 7. Parámetros para el Ensayo de Resistencia al desgaste en Maquina de los Ángeles – Material RCD Mixto.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	57
<i>Tabla 8. Granulometría necesaria para los ensayos de Gravedad Especifica, Absorción y Partículas Livianas – Material RCD Concretos.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	58
<i>Tabla 9. Granulometría necesaria para los ensayos de Gravedad Especifica, Absorción y Partículas Livianas – Material RCD Mixto.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	60
<i>Tabla 10. Dimensiones del Permeámetro.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	61
<i>Tabla 11. Granulometría del material utilizado en el ensayo de Permeabilidad – Material RCD Concretos.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	61
<i>Tabla 12. Granulometría del material utilizado en el ensayo de Permeabilidad – Material RCD Mixto.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	6161
<i>Tabla 13. Calculo del coeficiente de permeabilidad – Material RCD Concretos.</i> <i>Fuente: Elaboración Propia</i>	62

<i>Tabla 14. Calculo del coeficiente de permeabilidad – Material RCD Mixto.</i>	
<i>Fuente: Elaboración Propia</i>	<i>622</i>
<i>Tabla 15. Valores de viscosidad dinámica para la corrección de la permeabilidad.</i>	
<i>Fuente: Elaboración Propia</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 16. Resumen de resultados obtenidos.</i>	
<i>Fuente: Elaboración Propia</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 17. Valores típicos de Gravedad Especifica para diferentes tipos de material granular.</i>	
<i>Fuente: Elaboración Propia</i>	<i>655</i>
<i>Tabla 18. Valores orientativos del coeficiente de permeabilidad.</i>	
<i>Fuente: (Documento Básico Se-C (Seguridad estructural Cimientos), 2008)</i>	<i>67</i>

RESUMEN

Los residuos de construcción y demolición (mejor conocidos por sus siglas RCD) son uno de los tipos de desechos sólidos que más se generan a nivel mundial y, desafortunadamente, son pocos los usos actuales que se le brindan a este recurso por considerarlo solo un desperdicio. A pesar de esto, en algunos países se han desarrollado propuestas de gran valor que permiten clasificar este material y, posteriormente, brindarle un segundo uso, permitiendo su reutilización y reduciendo el impacto ambiental causado por los mismos.

Existen diversos tipos de materiales RCD, dependiendo de su composición y tamaño, por lo que varían significativamente las aplicaciones de cada uno de ellos. Teniendo en cuenta esto, se han desarrollado estudios acerca de su aplicación como agregado en concretos, así como su utilización para el desarrollo de pavimentos flexibles, pero pocos han sido los estudios centrados específicamente en su comportamiento como material granular en filtros, drenajes y subdrenajes.

En esta investigación el estudio se enfocó en dos tipos de materiales RCD: materiales provenientes de concretos y, por otra parte, materiales mixtos. De ellos se estudiaron propiedades como la permeabilidad, el desgaste y el comportamiento en interacción con el agua de estos materiales, entre otros, buscando analizar la factibilidad de aplicarlos en sistemas de subdrenaje de tipo geodren, teniendo en cuenta los requerimientos de diseño que dichos sistemas tienen para los agregados granulares.

A partir de eso, fue posible hallar que los materiales RCD analizados, independientemente de su tipo, cuenta con una gran permeabilidad, permitiendo la rápida evacuación de agua en sistemas de drenaje, mientras que, en cuanto a el desgaste, el material RCD compuesto de concretos presento un menor porcentaje de desgaste frente al material mixto, lo cual sería un factor a tener en cuenta de acuerdo al tipo de proyecto en el que se desee utilizar dicho material. En cuanto a las partículas livianas y el lavado se obtuvieron valores que no afectarían el uso de estos materiales en el tipo de sistema de drenaje planteado.

En general, y según los resultados finales de permeabilidad, desgaste, partículas livianas y lavado de cada uno de los materiales, fue posible determinar que estos tipos de material RCD, con ciertos procesos de limpieza y preparación, previos a su utilización, cumplen con los parámetros mínimos necesarios para su utilización como agregado de relleno en sistemas que requieren de materiales con una excelente capacidad de filtración y una buena resistencia mecánica, pudiendo ser una alternativa adecuada para los sistemas de subdrenaje de tipo geodren, debido a que presentan propiedades favorables para su uso.

Palabras Clave: Permeabilidad, Desgaste, RCD, Geodren.

ABSTRACT

Construction and demolition wastes (better known by its acronym CDW) are one of the types of solid waste that is most generated worldwide and, unfortunately, there are few current uses that are given to this resource because it's considered only a waste. In spite of this, in some countries, proposals of great value have been developed that allow classify this material and, subsequently, provide it with a second use, allowing its reuse and reducing the environmental impact caused by them.

There are various types of RCD materials, depending on their composition and size, for that reason, the applications of each of them varies significantly. Taking this into account, studies have been carried out on its application as aggregate in concrete, as well as its use for the development of flexible pavements, but few studies have been specifically focused on its behavior as granular material in filters, drains and sub-drains.

In this investigation, the study focused on two types of CDW materials: materials from concrete and, on the other hand, mixed materials. Of these materials, were studied properties such as permeability, wear and behavior in interaction with the water of these materials, among others, seeking to analyze the feasibility of applying them in geo drain sub-drainage systems, taking into account the design requirements that such systems have for granular aggregates.

From that, it was possible to find that the CDW materials analyzed, regardless of its type, have a great permeability, allowing the rapid evacuation of water in drainage systems, while in terms of wear, the CDW material composed of concrete presented a lower percentage of wear compared to mixed material, which would be a factor to be taken into account according to the type of project in which it's desired to use that material. Regarding light particles and washing, values were obtained that would not affect the use of these materials in the type of drainage system proposed.

In general, and according to the final results of permeability, wear, light particles and washing of each of the materials, it was possible to determine that these types of CDW materials, with certain cleaning and preparation processes, prior to their use, satisfy with the minimum parameters necessary for its use as filler aggregate in systems that require materials with excellent filtering capacity and good mechanical strength, and may be an adequate alternative for geo-drainage and sub-drainage systems, because they have favorable properties for their use.

Keywords: Permeability, Wear, CDW (Construction and Demolition Waste), Geo drain.

INTRODUCCIÓN

El cuidado y preservación del medio ambiente y sus recursos naturales ha sido, desde hace muchos años, un tópico de interés global desde todas las ramas de la ciencia. Desde cada una de ellas se han analizado diversas estrategias que permitan reducir los impactos causados por el hombre debido a las actividades que este desarrolla y los recursos que son extraídos para las mismas.

En Colombia, debido a el amplio desarrollo de nuevas obras de infraestructura y a el proceso de inversión que ha venido adelantando el país para mejorar sus estándares internacionales (Clavijo, Vera, & Vera, 2013), se ha presentado un gran incremento en los residuos provenientes de las diferentes actividades de construcción y demolición adelantadas en el territorio nacional (Ramírez & Pineda, 2017). Dichos residuos, a pesar de ser en su mayoría de tipo inerte, al no ser aprovechados o dispuestos de forma adecuada pueden llegar a representar graves afectaciones al medio ambiente, debido a la contaminación del aire y el agua (Aldana & Serpell, 2012), sumado a la afectación causada por el aumento en la extracción de agregados vírgenes (Castaño, Misle Rodríguez, Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2015).

Por otra parte, se tiene que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible surgieron debido al aumento en la necesidad de evacuar las aguas pluviales de las zonas urbanas, combinando aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales (Sara Perales Momparler, 2002). Dentro de dichos sistemas se encuentra una amplia variedad de tipologías que cumplen con la función anteriormente mencionada; para efectos de esta investigación se tomará como sistema de análisis los geodrenes filtrantes, los cuales funcionan a modo de zanjas poco profundas rellenas de material granular filtrante, sumado a un conducto inferior de transporte recubierto con un geotextil no tejido (Castro-Fresno, Rodríguez-Bayón, Rodríguez-Hernández, & Ballester-Muñoz, 2005).

Dentro del ámbito de la ingeniería civil, la reutilización de los residuos sólidos ha sido un tema de enorme debate, tanto en el control de su producción como en el análisis posterior de su posible disposición y uso (Mejía, Giraldo, & Martínez, 2013), desde este punto de vista, el analizar alternativas de uso para los residuos de construcción y demolición se convierte en una propuesta sumamente valiosa.

Debido a todo lo anteriormente mencionado, el presente trabajo tiene como propósito el analizar diversas características y propiedades de los residuos de construcción y demolición, en pro de definir si dichos materiales pueden ser implementados a modo de material granular filtrante en geodrenes.

1. GENERALIDADES

1.1. Línea de Investigación

La línea de investigación seguida por este trabajo de grado está enfocada en la línea de investigación de materiales, en el área de investigación de gestión y tecnología al servicio de las comunidades, la cual se encauza en el desarrollo de objetivos que permitan lograr beneficios para el país.

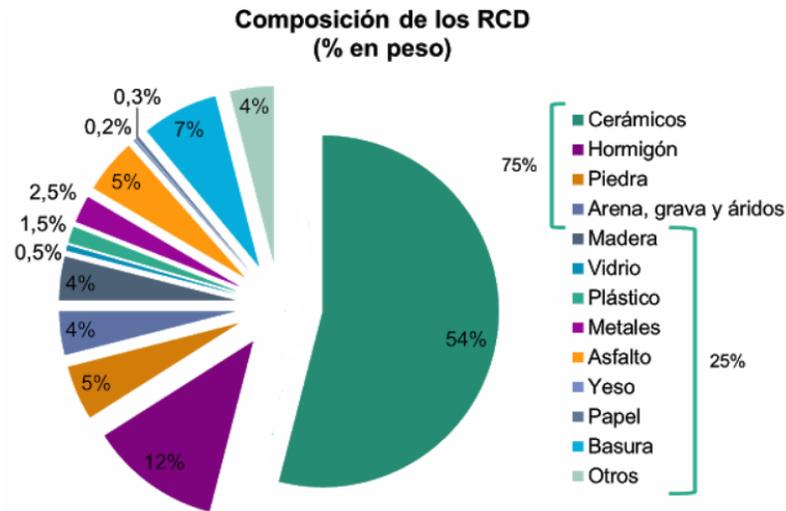
1.2. Planteamiento del Problema

El sector de la construcción en Colombia ha crecido de forma constante en los últimos años, centralizando hasta el 30% del Producto Interno Bruto de la construcción en el país (Castaño et al., 2015), incrementando así la producción de residuos sólidos generados por las actividades desarrolladas dentro del sector.

Dentro de los residuos generados por el sector de la construcción se encuentran los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) los cuales proceden de las diversas actividades durante la construcción y demolición de edificios, obras públicas y de urbanización. Dichos residuos se pueden clasificar según la actividad de donde provengan, donde se incluyen los provenientes de construcción o demolición de estructuras, bien sean residenciales o no y los proyectos de repavimentación, reparación de puentes y limpieza asociada con desastres hechos por el hombre o la naturaleza en el caso de huracanes, terremotos tornados e inundaciones (Mejía et al., 2013).

Entre los principales componentes que se encuentran dentro de los residuos de construcción y demolición se encuentran los cerámicos y el hormigón, seguidos por distintos tipos de materiales granulares, en la Figura 1 se puede observar la distribución porcentual típica de los RCD.

Figura 1. Composición típica de los residuos de construcción y demolición.



Fuente: (Sánchez, 2016)

Actualmente, y debido al mal manejo y la poca reutilización de los residuos provenientes de la construcción, se tiene que “una enorme proporción de todos los materiales utilizados para la construcción de las obras se está convirtiendo en un enorme depósito y, a su vez, en un enorme problema de difícil eliminación para las generaciones futuras causando un alto impacto sobre el medio ambiente” (Aldana & Serpell, 2012). A pesar de que existen leyes y normas que regulan el uso y disposición de los residuos de construcción y demolición, así como lugares destinados a su almacenamiento y correcta separación, son escasos y de baja difusión las aplicaciones que se le brindan a este tipo de material, afectando de gran manera el medio ambiente tanto por la contaminación como por el aumento en la demanda de recursos.

Dentro de la gestión de los residuos provenientes del sector de la construcción es fundamental analizar que, en el caso particular de Colombia, se torna preocupante su producción y aprovechamiento, ya que esto ayudaría a evitar la sobreexplotación de los recursos disponibles, además de convertir a la construcción en una actividad sostenible. Dicho aprovechamiento resulta de vital importancia ya que, al observar el panorama internacional, se tiene que países como Dinamarca, Finlandia o Alemania presentan en promedio un 50% de reutilización de RCD (Castaño et al., 2015).

En Colombia la entidad encargada de realizar la reglamentación acerca del uso y disposición de los RCD es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible quien, a partir de la Resolución 472 de 2017, da las pautas para las empresas o actores generadores de RCD, donde se reglamentan los procesos que deben ser llevados a cabo para la correcta disposición y de dichos residuos. Sin embargo, en Colombia aún no se ha explorado de forma amplia el aprovechamiento total de dichos

residuos, buscando que los mismos dejen de ser vistos como desechos y, por el contrario, sean aprovechados a modo de materia prima.

Por otro lado, los sistemas de subdrenajes que están conformados por tuberías perforadas y material granular requieren de un amplio control y unas especificaciones bien estipuladas para su correcto funcionamiento (Niño, 1991), debido a esto el material granular necesario para su construcción puede llegar a ser el componente de mayor valor económico dentro de este tipo de obras civiles.

A pesar los requerimientos de dichos materiales, son pocas las investigaciones enfocadas en analizar la utilización de materiales alternativos en este tipo de obras civiles, y más escasas aun las que busquen estudiar la aplicabilidad de los residuos provenientes de actividades del sector de la construcción en dicho campo.

Todo lo anteriormente mencionado contribuye a la acumulación de los residuos de construcción y demolición en las plantas de almacenamiento dispuestas para dicho fin, ya que no se le brinda un uso posterior a dicho material. La situación anteriormente planteada únicamente puede representar un mayor impacto ambiental y económico a largo plazo, pudiendo afectar gravemente el sector de la construcción.

A partir de ello se decide formular y estudiar los materiales provenientes de las plantas de almacenamiento de RCD para responder a la siguiente pregunta: ***¿Qué efectos tendrá, en términos de filtración y drenaje, el uso de diferentes tipos de material RCD en reemplazo de los agregados comúnmente utilizados en geodrenes?***

1.3. Antecedentes

El reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) como agregados es una práctica, relativamente difundida en los países desarrollados, para prevenir la contaminación ambiental y disminuir el impacto de la extracción de agregados vírgenes. En Colombia, es un objetivo novedoso que se han venido trazando las entidades públicas encargadas de gestionar la construcción y el medio ambiente. (Castaño et al., 2015).

Es importante resaltar que los materiales RCD, al ser considerados desechos contaminantes, han sido ampliamente estudiados y analizados con el fin de encontrar nuevos usos que le puedan ser brindados a este tipo de recursos. Como se verá más adelante, los estudios e investigaciones desarrolladas sobre este material son mayormente desarrollados en ámbitos internacionales y menores a nivel local, por lo que esta investigación, ayuda a fortalecer el panorama investigativo en esta área.

En los últimos años se han adelantado estudios acerca de las diferentes aplicaciones que pueden tener los residuos de construcción y demolición. En el año 2015, desde la Escuela de Ingeniería de Antioquia se realizó la caracterización química y mineralógicamente de materiales tipo RCD, generados en la capital del departamento para posteriormente usarlos en la biorremediación de suelos degradados por acción de la minería, por medio de técnicas de difracción de rayos X y microscopia óptica de luz plana polarizada aplicada a los residuos en los cuales se encontraron minerales (cuarzo, calcita, wollastonita, albita, anatasa, actinolita) que, al aplicarse a los suelos degradados, son capaces de mejorar propiedades como infiltración y aireación, además de aportar nutrientes especiales que benefician a las plantas. Los resultados de este estudio sugieren que los residuos de demolición y construcción tienen la capacidad de bioremediar los terrenos que han sido afectados por acción de la minería (Eia, 2016).

Varios investigadores confeccionaron un concreto usando agregados reciclados obtenidos de los escombros de concreto y mampostería, a estos se les efectuaron ensayos de resistencia a la compresión, porosidad, velocidad de pulso ultrasónico y carbonatación, además de aspectos como el costo económico; en comparación al concreto convencional muestran que los resultados obtenidos respecto a la resistencia al esfuerzo de compresión y las medidas de velocidad de pulso ultrasónico, en algunas de las mezclas fueron del orden de 98% de la mezcla de referencia, al igual que la mezcla confeccionadas con 100% de agregados reciclados, mostró una diferencia en cuanto a la profundidad de carbonatación de solo 0.7 mm, en comparación a la mezcla de referencia. Los resultados obtenidos con sustituciones de agregados naturales por agregados reciclados gruesos y finos en porcentajes de 25%, 50% y 100%, y el avance de los lineamientos político – administrativos del municipio, permiten deducir la posibilidad de confeccionar

concretos estructurales y no estructurales para uso masivo en la construcción (Rahman, Imteaz, Arulrajah, Piratheepan, & Disfani, 2015).

Con base en estudios realizado por investigadores, el tipo de reutilización de RCD más común es el reciclaje de residuos de mampostería como sustituto de los agregados para la fabricación de concretos y morteros, no obstante, cualquier variación, por mínima que sea en el porcentaje de reemplazo implica la disminución en las propiedades físicas y mecánicas de los productos finales; Es por esta razón que los residuos de construcción y demolición se pueden utilizar en la producción de ladrillos, bloques y adoquines, ya que estos elementos requieren menos exigencias técnicas como en el caso de la resistencia (7mPa para tránsito peatonal y bloques de mampostería); Un limitante para la aplicación de residuos de mampostería en prefabricados es la tasa de absorción del agua, que según las normativas no debe ese exceder el 6% para su adecuado funcionamiento (Ng & Engelsen, 2018).

Por otro lado, investigadores de la Universidad Tecnológica de Swinburne en Melbourne, Australia, realizaron estudios acerca de las características geotécnica e hidráulicas de los residuos de construcción y demolición para ser usados en sistemas de pavimentos permeables en combinación con geotextil no tejido y evaluar su eficacia como materiales filtrantes, al material se le realizaron análisis granulométricos de acuerdo con las especificaciones ASTM 2007 que reglamenta el material de gradación para base y sub base, adicional a esto, se midieron parámetros tales como gravedad específica, absorción de agua en agregados gruesos y agregados finos, pH, pérdida de ignición (determinación de contenido orgánico), desnudas seca máxima u contenido de humedad; el método de cabeza constante y cabeza descendente se utilizó para determinar la permeabilidad en muestras de grano grueso y fino respectivamente. Los resultados muestran que los residuos de construcción y demolición tienen un pH ligeramente alcalino, pero aun así se encuentran dentro de los límites permisibles; El contenido de materia orgánica es ligeramente nulo, los demás parámetros como conductividad hidráulica, gravedad específica, densidad y contenido de humedad tuvieron valores ligeramente por debajo de los que tienen los agregados naturales (agregados vírgenes). No obstante, se concluye que los RCD son una alternativa adecuada a materiales filtrantes en los sistemas de pavimento permeable (Rahman et al., 2015).

1.4. Alcances y Limitaciones

1.4.1. Alcances

Según el calendario académico dispuesto por la Universidad Católica de Colombia para el año 2019, se cuenta con un periodo académico de 16 semanas para el desarrollo del trabajo de grado y el cumplimiento de las metas y objetivos planteados. Lo que se espera desarrollar en este lapso de tiempo, se basa principalmente en el estudio y determinación de las propiedades de permeabilidad, desgaste y durabilidad de material RCD, buscando analizar su posible implementación como material granular en geodrenes con tubería colectora, todo esto mediante ensayos de laboratorio sumado a un trabajo de análisis y revisión de literatura. Se busca también que, a partir de este estudio, se logre fortalecer la idea de la reutilización y aprovechamiento de los materiales RCD, siendo esto beneficioso para el ámbito de la ingeniería y para el medio ambiente.

Específicamente, el proyecto abarca desde la búsqueda, recolección y preparación de cada uno de los tipos de material RCD a analizar, pasando por la exploración de los mismos en condiciones controladas de laboratorio, estudiando sus propiedades de permeabilidad, desgaste, partículas livianas y lavado, para finalmente, concluir con el estudio de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros.

Dependiendo de los avances logrados en cuanto a tiempos y evolución de la propuesta, se abre la posibilidad de expandir el presente estudio a demás sistemas que se encuentren catalogados dentro de los SUDS para evaluar su aplicabilidad.

1.4.2. Limitaciones

Dentro de las principales limitaciones se tiene que, a pesar de existir estudios que analicen las propiedades de los materiales RCD, son limitados aquellos que se enfocan en su aplicabilidad a sistemas de drenaje y subdrenaje, lo cual implica una extensa búsqueda bibliográfica para tener información de referencia que sustente la investigación.

Por otra parte, se pueden presentar situaciones desfavorables en cuanto a la obtención de los materiales específicos de RCD necesarios para este caso de estudio, ya que deben ser de un tipo y granulometría específicos. Además de esto y, teniendo en cuenta el uso de material RCD, se pueden presentar limitaciones a la hora de implementar los ensayos especificados dentro de las normas INVIAS 2013, por lo que es necesario realizar el análisis minucioso de los procedimientos pertinentes para el desarrollo de los mismos.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Un adecuado manejo de aguas mediante geodrenes con tubería colectora está enfocada a la correcta captación, conducción y evacuación de aguas de manera que no se afecten las zonas aledañas a estos sistemas.

Debido a los inconvenientes que suelen aparecer frente a los sistemas de drenajes urbanos, emerge la idea de implementar Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles (SUDS), los cuales traen beneficios a corto y largo plazo, por ejemplo, evitan inundaciones, permite la recarga controlada de acuíferos, además ayudan a aliviar la carga que puedan llegar a tener algunos sistemas de alcantarillado.

Una correcta disposición de los residuos generados durante las actividades de construcción es necesaria para evitar contaminación del medio ambiente (degradación de la calidad del paisaje, alteración de drenajes naturales, pérdida del suelo productivo, contaminación por polución, entre otros) o afectación en la salud de las personas, ya que los escombros pueden contener sustancias corrosivas, tóxicas, inflamables o cancerígenas, en el caso del asbesto.

Actualmente, la resolución 472 de 2017 reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD, consiste en la reducción de su tamaño, mediante trituración y molienda, separación magnética de fracción metálica, clasificación por tamaño (cribado), limpieza del material (clasificación manual y separación), manipulación, transporte y almacenamiento de materiales; Al igual que expresa las prohibiciones que tiene el manejo de estos residuos (Ramírez & Pineda, 2017).

A causa de esto, se optan por diferentes metodologías para reutilizar dichos residuos, en el caso del uso de material granular (gravas y arenas) en la mezcla de concreto para una nueva edificación, los materiales reciclados no cumplen con las especificaciones que se registran en la Norma Técnica Colombiana (NTC), ya que por no ser material virgen (de origen natural), disminuyen propiedades asociadas a la resistencia esperada debido a la caracterización que tiene el material granulado proveniente de los RCD; Desde otra perspectiva, este material puede ser utilizado para la fabricación de elementos de mampostería ya que sus requerimientos estructurales son más flexibles.

Por esta razón, realizar estudios para determinar la viabilidad en la implementación de material granular a partir de residuos de construcción y demolición a geodrenes con tubería colectora, es una opción de aprovechamiento de este material permitiendo así, reducir la huella ambiental que se genera en el sector de la construcción, además de minimizar el impacto ambiental generado por la explotación de canteras para la obtención de material granular.

Finalmente, el estudio tendrá el enfoque que permite determinar si características como permeabilidad y desgaste son óptimas para la aplicabilidad de los residuos de construcción y demolición en geodrenes con tubería colectora, por medio de ensayos de laboratorio, además de ser factible el material granular, se generarían beneficios a nivel ambiental, ya que es posible continuar con estudios que permitan su uso en otras áreas de la ingeniería, además de los anteriormente descritos.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Evaluar las capacidades filtrantes, en cuanto a permeabilidad y lavado, de diferentes tipos de materiales RCD, para determinar su posible uso como agregado granular en geodrenes.

1.6.2. Objetivos específicos

- I. Proponer y realizar un protocolo de obtención de muestras representativas de diferentes tipos de material RCD, además de la caracterización física de los mismos.
- II. Evaluar mediante ensayo mecánico la resistencia al desgaste de las muestras de material RCD con el fin de determinar su resistencia.
- III. Evaluar la durabilidad de las muestras de material RCD mediante ensayos mecánicos de desleimiento.
- IV. Evaluar la cantidad de partículas livianas presentes en las muestras de material RCD en pro de analizar su factibilidad como agregado para sistemas de drenaje.
- V. Evaluar la permeabilidad y el lavado del material RCD, realizando una modificación en el ensayo básico de permeabilidad para materiales granulares.
- VI. Analizar los beneficios operacionales y constructivos entre un sistema de subdrenaje convencional y uno que implemente material tipo RCD.

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1. Marco Conceptual

Ciclo hidrológico: En cuanto a este concepto, hace referencia a la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra hacia la atmósfera y regresar a la tierra, de manera que hay evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua, y, por último, re vaporación.

El ciclo natural involucra procesos de transporte re circulatorio e indefinido o permanente, el movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas, en un principio, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación), seguido a esto, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda nuevamente a la superficie (precipitación y escurrimiento) (Geogr, 2011).

Sistema hídrico: El sistema hídrico y orográfico son los principales elementos de la estructura regional, que se entiende como el conjunto de áreas que se seleccionan y delimitan para su protección y apropiación sostenible, debido a que contienen los principales elementos naturales y construidos que determinan la oferta ambiental del territorio, es por esto que debe conformarse como un elemento estructural, a partir del cual, se deben organizar los sistemas urbanos y rurales regionales (Bogotá, 2014).

Dren: Excavación en forma de zanja, rellena con materiales permeables, cuya función es la captación de aguas freáticas o de infiltración (Bogotá, 2014).

Sistemas de drenaje: Son sistemas de remediación o prevención de desplazamientos muy eficientes; Su utilización es muy frecuente y existen métodos de análisis y diseño que se basan en el flujo de agua tanto superficial como subterráneo.

En ocasiones, la implementación de un sistema de drenaje o subdrenaje, se requiere el mantenimiento y la adecuación de los elementos de drenaje existentes, tales como: la entrega de agua a las edificaciones, limpieza y reparación de canales, cuentas y Box Culverts, garantizar la impermeabilidad para evitar las infiltraciones en los canales de cuerpo de agua (Suarez, 2008).

Sistemas de drenaje natural: Corresponde al conjunto de elementos naturales o artificiales que recogen, almacenan, infiltran y transportan los caudales de agua lluvia o escorrentía a lo largo de su trayecto de manera superficial, este incluye los corredores ecológicos de ronda, ríos, quebradas, humedales (declarados y no

declarados), canales naturales o re naturalizados y los nacimientos de agua (Bogotá, 2014).

Sistema de drenaje construido: Corresponde al conjunto de elementos construidos que dentro del perímetro urbano recogen, almacenan y transportan el agua lluvia o escorrentía superficial, estos sistemas incluyen, entre otros, elementos como canales, cunetas, canaletas, sumideros, tuberías de alcantarillado pluvial y combinado, Box - Coulverts, aliviaderos, desarenadores, estaciones de bombeo, estructuras de entrega y presas artificiales, y otras estructuras asociadas a la regulación, control, recolección y manejo del agua lluvia (Bogotá, 2014).

Sistema tradicional de drenaje: Este sistema consiste en la combinación de agregados pétreos como gravas y bolos de diferentes tamaños, con un geotextil no tejido punzonado por agujas y una tubería de drenaje, el geotextil actúa como un elemento filtrante permitiendo el paso de agua y reteniendo los finos, mientras que el material granular y la tubería se encargan del abatimiento y evacuación del agua (Geosistemas PAVCO, 2014).

Escorrentía superficial: Corresponde a la parte del agua lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada y que fluye libremente sobre las laderas; En realidad la escorrentía superficial, la infiltración y la humedad del suelo interactúan entre sí, por tal motivo se debe tener cuidado en seleccionar el modelo adecuado para cada situación (Ordoñez & Kraft, 2011).

Escorrentía sub superficial: Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por tanto, debe ser considerada como parte de la escorrentía (Ordoñez & Kraft, 2011).

Acuíferos: Las aguas subterráneas en Colombia constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, pues son reconocidas tanto por ser fuentes principales, complementarias o alternas de aprovechamiento en cuenca con acceso limitado de aguas superficiales y por su influencia en obras civiles, tunces y carreteras, además de proyectos de minería, entre otros.

Este elemento representa la mayor parte de los recursos hídricos utilizables en el planeta, y Colombia presenta similares condiciones con un gran potencial de aguas subterráneas; En el diagnóstico realizado para la formulación de la Política Nacional de Gestión Integral de Recurso Hídrico, se pudo establecer que existe un conocimiento parcial de aguas subterráneas en 27 de los 32 departamentos del país, debido a que varios departamentos del oriente del país no contaban con información hidrogeológica (Ministerio de Ambiente, 2017).

SUDS: Los sistemas urbanos de drenaje sostenible son los conjuntos de soluciones que se adoptan con el objeto de retener el mayor tiempo posible las aguas lluvias en su punto de origen, sin generar problemas de inundación, minimizando los

impactos del sistema urbanístico en cuando a la cantidad y calidad de la escorrentía y evitando así sobredimensionamientos o aplicaciones innecesarias en el sistema.

El principio de los SUDS es reproducir, de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación urbana (Bogotá, 2014).

Sostenibilidad: El desarrollo sostenible permite obtener una mejor calidad de vida para una comunidad, así mismo trata de lograr objetivos como la protección efectiva del medio ambiente, uso racional de los recursos naturales. Como parte del compromiso de gobierno con el desarrollo sostenible, las prioridades para la gestión sostenible del agua en el futuro incluyen el uso prudente de los recursos hídricos y mantener el uso del agua dentro de los límites, para que de esta manera se pueda combatir la contaminación del agua, al igual que se minimizan los riesgos de inundación gestionando eficazmente los sistemas de drenajes (Kellagher et al., 2015).

Geodren: Dispositivo de drenaje sub superficial, consistente en una geo red planar, encapsulada dentro de un geotextil no tejido, el cual se conecta con elementos que permiten el alejamiento del agua de la estructura del pavimento (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Envolturas de dren: Corresponde al material poroso colocado alrededor de un dren subterráneo el cual funciona como protección ante la sedimentación, mejora su comportamiento hidráulico, ya que mejora la permeabilidad alrededor de la tubería y actúa como obstáculo permeable que impide la entrada de cantidades perjudiciales de partículas y agregados de suelo en tuberías de drenaje (FAO, 2009).

Envolturas minerales granulares: Las envolturas minerales consisten principalmente de arena gruesa, grava fina y material triturado, que se colocan por debajo y alrededor de la tubería de drenaje durante su instalación. Si estos materiales están bien diseñados e instalados dan buenos resultados, ya que son voluminosos y pueden retener relativamente grandes cantidades de material de suelo sin que su funcionamiento se vea afectado (FAO, 2009).

Superficie permeable: Son superficies que permiten el paso de agua. Estos sistemas están constituidos por un volumen de material permeable situado bajo una superficie que permite el paso del agua como el césped, el césped reforzado, la grava, los pavimentos segmentados como los adoquines drenantes (a través de recortes o juntas anchas) y los adoquines o piezas prefabricadas en material poroso (a través de su masa), o los pavimentos continuos de cualquier tipo de mezcla porosa (asfalto, hormigón, resinas, etc.) (Bogota, 2011).

Geotextil: Material textil (sintético o natural), polimérico, permeable y liso, que puede ser tejido, no tejido o tricotado, usado en ingeniería civil para aplicaciones geotécnicas, en contacto con suelos o con otro tipo de materiales.

Los geotextiles tejidos se fabrican entrelazando, por lo general en ángulos rectos, dos o más juegos de hilos, fibras, filamentos, cintas u otros elementos. Los geotextiles no tejidos son laminas sencillas o múltiples, hechos de fibras, filamentos u otros elementos orientados e una dirección o aleatoriamente, los geotextiles tricotados se fabrican intercalando uno o más hilos, fibras, filamentos u otros elementos.

Las fibras comúnmente usadas para producir geotextiles son poliamida (PA), poliéster polietileno y polipropileno (FAO, 2009).

Geotextil no tejido: Geotextil en forma de lámina plana, con fibras, filamentos u otros elementos orientados regular o aleatoriamente, unidos químicamente, mecánicamente, por medio de calor o por la combinación de métodos. Pueden ser de fibra cortada o de filamento continuo (Escobar Velásquez, Díaz González, & Olivo Martínez, 2009).

Material granular: Fragmento de roca producidos por acciones erosivas. Su tamaño y forma depende de la calidad de la roca madre de donde se originaron, del grado de meteorización y del desgaste que haya sufrido durante el transporte. Se ubican en sitios variados de la superficie de la tierra, por ejemplo, en los depósitos glaciares, fondo de los valles, acumulaciones volcánicas, brechas de falla, lechos de ríos, lagos o mares. Debido a su distribución se usa como material para cimentación o agregados en los concretos de infraestructura civil (Oldecop, 2001).

RCD: anteriormente llamados escombros, son los residuos sólidos generados a partir de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones, mejoras locativas de obras civiles o de actividades relacionadas, entre los cuales se pueden encontrar varios tipos que son susceptibles de aprovechamiento, no obstante, existen residuos que por su composición o descendencia no pueden ser aprovechados.

En el caso de los residuos aprovechables se encuentran los productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terrenos, productos de cimentaciones y pilotajes como arcillas y bentonitas, agregados pétreos como arenas, gravas, gravillas, cantos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, agregados no pétreos, por ejemplo, vidrio, metales tales como acero, hierro, cobre, aluminio con o sin recubrimiento de zinc o estaño, plásticos como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y poliuretano, gomas, cauchos compuestos de madera o cartón – yeso (drywall).

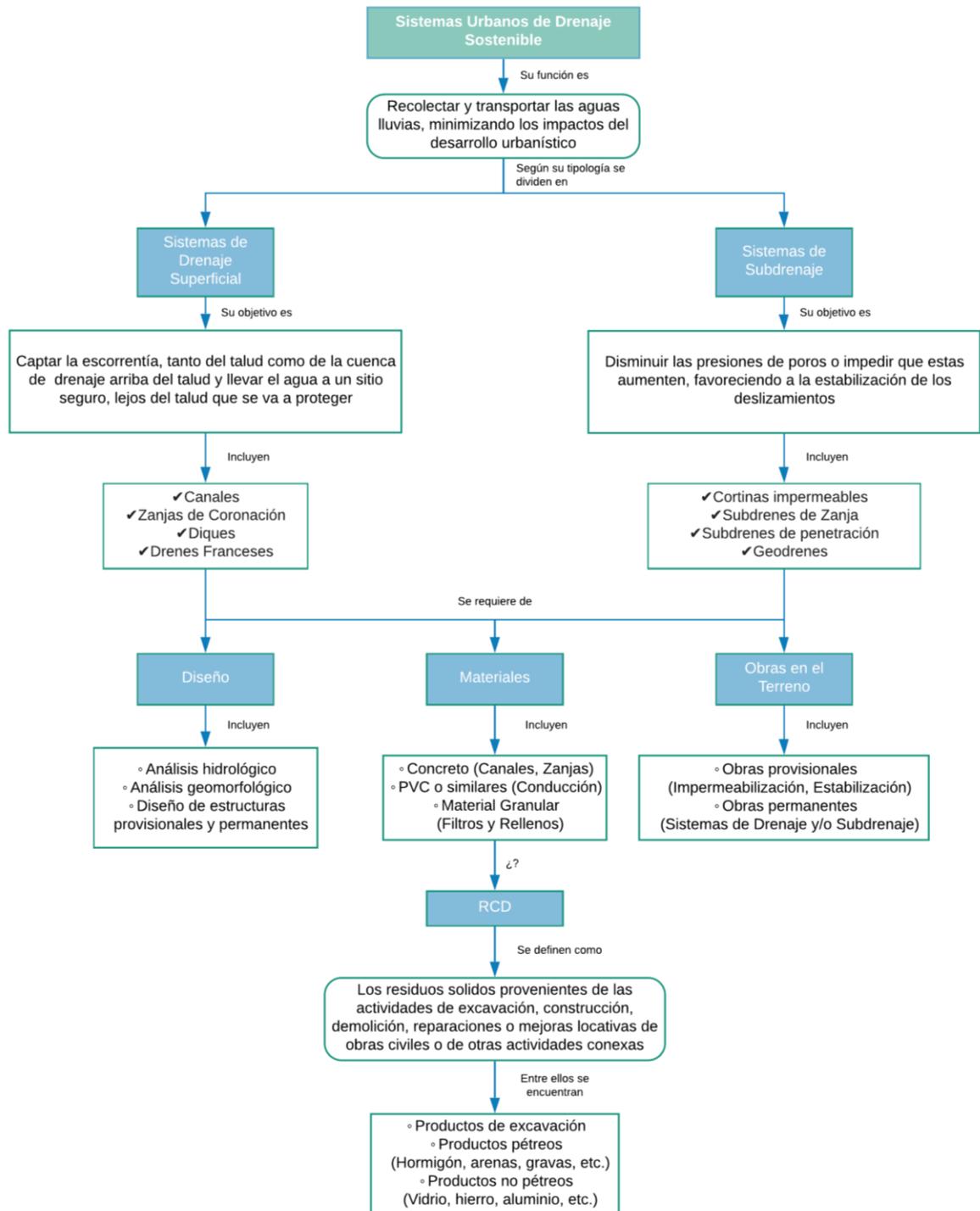
Los residuos que no son susceptibles de aprovechamiento por lo general, es a causa de que se encuentran contaminados con residuos peligrosos, por su estado se dificulta el tratamiento para ser aprovechados o algunos que tengan características de peligrosidad, que se rigen según las normas ambientales vigentes (Ramirez & Pineda, 2017).

Generador de RCD: Están conformados por las personas naturales o jurídicas que ocasionalmente debido a la realización de actividades de construcción, demolición, reparación o mejoras locativas, genera RCD.

De estos generadores de RCD existen dos clases, en primera instancia los grandes generadores de RCD son aquellos que requieren la expedición de una licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades o licencia de intervención y ocupación del espacio público, también aquellos que por la magnitud de sus proyectos requieren de una licencia ambiental o que la obra tenga un área construida igual o mayor a 2000 m²; En contraste con lo anterior se encuentran los pequeños generadores, los cuales cumplen con alguna de las siguientes condiciones: no requiere de la expedición de una licencia de construcción en cualquiera de sus modalidades o que la obra tenga un área construida inferior a 2000 m² (Ramirez & Pineda, 2017).

Plantas de aprovechamiento: Es el lugar destinado para realizar el proceso de reciclaje, que se realiza a partir de materiales procedentes de los residuos que se generan en la construcción y demolición, se obtiene un producto que puede clasificarse como apto para su reutilización como materia prima. Los materiales de origen pétreo pueden reincorporarse a su ciclo productivo mediante un proceso de trituración y cribado. Además de esto, en sus instalaciones también se realizan actividades de almacenamiento del material reciclado; Dependiendo de su infraestructura, las plantas de aprovechamiento pueden ser fijas o móviles (Guarin, 2017).

Figura 2. Mapa conceptual del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Estado del Arte

2.2.1. Estudios e investigaciones en el área de los geodrenes:

En la actualidad se continúan desarrollando sustanciosas investigaciones en el área de los SUDS, especialmente en aquellos que, además de cumplir con la función de recolectar y transportar el agua, también sean sostenibles ambientalmente y presenten facilidades constructivas considerables. Enseguida se presentarán algunas investigaciones destacadas en donde se realiza un análisis exhaustivo de los sistemas de drenaje, y específicamente los de tipo geodren.

En el trabajo de investigación desarrollado por Gonzáles J, Velásquez O y Martínez E, titulado “Aplicación de los geosintéticos en la estructura de los pavimentos y en obras de drenaje para carreteras” se destaca la investigación realizada en cuanto a la caracterización y descripción de los materiales geosintéticos utilizados en diferentes obras para pavimentos y carreteras. Sumado a lo anterior, se describe las generalidades y metodologías de diseño para sistemas de geodrenes en vías, en donde también se destacan los parámetros que deben ser analizados en laboratorio para el diseño de este tipo de sistemas (Escobar Velásquez et al., 2009).

Por otra parte, el Docente Ennio Palmeira en su presentación llamada “Aplicaciones de los Geosintéticos en Obras Geotécnicas y Geoambientales” realiza una exposición detallada del funcionamiento de los geosintéticos en sistemas de drenaje aplicados en carreteras, además de algunas otras obras de ingeniería necesarias para su adecuado funcionamiento (Palmeira, 2018).

Además de lo anterior, una de las empresas con mayor conocimiento en Geosistemas y Geodrenajes en Colombia, PAVCO, tiene dentro de sus catálogos de productos, guías y procedimientos constructivos, las especificaciones básicas para el diseño y construcción de diversos tipos de sistemas de drenaje, dentro de los cuales destacan los de tipo planar y los geo drenajes, resaltando la importancia de analizar opciones en cuanto a los materiales que se utilizan adyacentes a las obras de drenaje, y recomendando, según las investigaciones desarrolladas por la empresa, que sean materiales con una muy buena resistencia y una alta permeabilidad. (Departamento de Ingeniería de Geosistemas PAVCO, 2013)

Finalmente, y debido a que la aplicación de los geodrenes depende en gran medida de su ubicación y las condiciones propias de la zona de diseño, existen una serie de estudios que deben ser realizados con el fin de analizar la factibilidad de un sistema de drenaje de tipo geodren, lo cual se observa en la investigación realizada por Mateus, Jiménez & Moreno, en donde se toma el estudio de caso en el barrio Ciudad Alsacia, en la ciudad de Bogotá, allí se analizan aspectos hidrológicos y geomorfológicos de la zona para poder definir si se podía aplicar este sistema dentro de esta área de interés (Mateus, Jiménez, & Moreno, 2014).

2.2.2. Aplicación de materiales RCD a nivel mundial:

Dentro de las investigaciones realizadas en los últimos años sobre los residuos de construcción y demolición (RCD), se ha visto un aumento en la búsqueda de soluciones en cuanto a los usos y aplicaciones que puedan brindarse para los materiales de tipo RCD que también se nombran comúnmente como Agregados Reciclados (AR).

A continuación, se examinarán brevemente algunos trabajos de investigación que han abordado el uso de agregados de tipo RCD en varios lugares del mundo.

2.2.2.1. Estados Unidos (*Robinson, Menzie, & Hyun, 2004*)

Debido a su gran extensión geográfica y a su gran capacidad económica, es de esperarse que un país como Estados Unidos sea un gran consumidor y productor de agregados tanto naturales como reciclados.

Con respecto a esto y a partir de la información desarrollada por Robinson, Menzie & Hyun, en donde se desarrolla el tema del reciclaje de los residuos de construcción y su utilización como agregados, se presentan unas estadísticas de gran interés en donde se destaca que “los Agregados reciclados en Estados Unidos son producidos por productores de agregado natural, contratistas y centros de reciclaje, con una proporción de 50,36 y 14% respectivamente”.

Además de lo anterior, se destaca que se dan incentivos para el transporte de residuos de la construcción, buscando promover su reutilización, en gran parte como relleno o como base para construcción.

2.2.2.2. Unión Europea (*Lauritzen, 2004*); (*Winter & Henderson, 2003*)

En la Unión Europea (UE), según las investigaciones desarrolladas por autores como Lauritzen o Winter & Henderson, se puede observar un panorama muy alentador en cuanto al reciclaje de residuos de construcción y, en general, de materiales que ya cumplieron un primer ciclo de uso dentro de los países europeos.

Según las investigaciones desarrolladas por los autores anteriormente mencionados, se puede estimar que a finales de 1990 se reciclaba aproximadamente el 28% de todos los residuos de construcción y demolición dentro de los países de la UE. Sumado a lo anterior, se tiene que la mayoría de los países de la UE han establecido objetivos de reciclaje que rondan entre el 50 y el 90% de la producción de residuos de construcción y demolición, buscando reducir el consumo de recursos naturales como maderas, acero y materiales de cantera.

Finalmente, los autores destacan que, debido al contexto, la cultura y la normatividad existente en países como Alemania, Holanda y Dinamarca, es más costoso disponer y almacenar los materiales provenientes de residuos de la construcción, que reciclarlos y brindarles un uso posterior dentro de la industria.

2.2.2.3. Hong Kong (Fong, Yeung, & Poon, 2004)

En la investigación desarrollada por Fong, Yeung & Poon es posible evidenciar como, mediante la investigación y reglamentación de los agregados reciclados, es posible reducir el impacto ambiental que estos mismos causan y, a su vez, implementar dichos materiales en nuevos proyectos y obras de construcción.

En la región de Hong Kong, ubicada al sur oriente de China se desarrolló un plan piloto hacia el año 2002, en donde se realizó la instalación de una planta de reciclaje de materiales de construcción y demolición. Dicha planta fue diseñada con una capacidad de 2400 toneladas por día y estaba destinada a producir materiales y agregados granulares reciclados, como gravas gruesas, material fino y mixtos.

El material extraído de la planta ha sido implementado en proyectos de construcción liderados por el gobierno local, en donde se ha demostrado que los agregados reciclados que han sido utilizados en nuevas obras cuentan con alta calidad para su reutilización.

2.2.2.4. Taiwán (Huang, Lin, Chang, & Lin, 2002)

En la isla de Taiwán, tal y como lo describen los autores Huang, Lin, Chang & Lin, surgió un plan de manejo y gestión de los residuos de construcción y demolición a partir de 1999, debido a la catástrofe generada por el terremoto que afectó a esta región y que causo graves daños estructurales a cerca de 100000 viviendas.

Debido a lo anterior, se esperaba que cerca de 30 millones de toneladas de residuos de construcción serian generadas debido a la rehabilitación necesaria para reparar las estructuras dañadas.

Para llevar a cabo el reciclaje y reutilización de todos estos residuos se desarrollaron plantas piloto que, en la actualidad, aún siguen procesando este tipo de material el cual se utiliza como relleno y como base para la construcción de carreteras.

2.2.2.5. Latinoamérica y Colombia (Sora, 2016)

La situación en Latinoamérica, a pesar de estar relativamente menos avanzada que en algunos de los países anteriormente mencionados, no deja de ser un tema en el que actualmente se están desarrollando bastantes investigaciones en pro de mejorar el tratamiento y disposición que se le brinda a este tipo de residuos.

Como bien se plantea en la “Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina”, desarrollada por Jofra Sora, es común observar que en las ciudades Latinoamericanas existan recuperadores o recicladores tradicionales que seleccionan material de las demoliciones de construcciones o diversos tipos de estructuras para posteriormente revenderlos.

Como también se resalta en la publicación anteriormente mencionada, algunas de las ciudades más grandes en cuanto a población de Latinoamérica, como Sao Paulo y Bogotá, entre otras, ya han tomado medidas para el manejo y disposición de material tipo RCD, en donde se ha priorizado el brindar una correcta separación de dichos residuos para facilitar el proceso de reutilizarlos dentro de diversas actividades constructivas.

En Colombia, por ejemplo, las investigaciones desarrolladas se han enfocado principalmente en los procesos logísticos a los cuales debe ser sometido el material tipo RCD para su correcta caracterización y disposición final, esto se ve ampliamente desarrollado en un estudio de caso desarrollado para la ciudad de Bogotá D.C. en donde se estudiaron un conjunto de 5 localidades (Tunjuelito, Ciudad Bolívar, Bosa, Kennedy y Usme), y a partir de los datos recolectados sobre los materiales RCD generados en estas zonas por los Molineros Artesanales de la zona, se planteó y diseñó todo el proceso logístico para la creación de una planta de disposición de material RCD, teniendo en cuenta factores cualitativos (Ubicación, características físicas, composición de materiales, etc.) y cuantitativos (Capacidad, rendimientos, costos, eficiencia, etc.).(Porras, 2013).

2.2.3. Estudios realizados sobre las propiedades de los materiales RCD:

Independientemente del tipo de uso o aplicación que se piense dar a los residuos de construcción y demolición, existen una serie de ensayos y caracterizaciones que se le realizan a este tipo de materiales, buscando definir sus propiedades y corroborar si estas cumplen con los rangos necesarios para cada una de sus aplicaciones.

En la investigación desarrollada por Rao, Jha & Misra, acerca del uso de agregados reciclados de construcción y demolición en concreto, se definen algunas de las propiedades y características a tener en cuenta cuando se estudian agregados obtenidos a partir de material RCD, allí se resalta que el material debe encontrarse limpio para posteriormente analizar su composición, es decir, los materiales que contenga la muestra de RCD en estudio.

Prosiguiendo con el análisis del material el autor propone que se debe realizar el análisis de los tamaños de partículas que contenga la muestra, en donde se destaca que este tipo de material pasa por procesos de trituración, donde se puede controlar los tamaños de partículas según los requerimientos o especificaciones necesarias.

Sumado a lo anterior, también la investigación destaca el análisis de propiedades como la absorción y la resistencia a la abrasión, debido a que estas propiedades son fundamentales para conocer la aplicabilidad del material en nuevos concretos o cementos (Rao, Jha, & Misra, 2007).

De manera semejante, existen otras investigaciones como la de Mohammad Saberian & Li, en la cual se abarca directamente la caracterización de un tipo de material de construcción y demolición. En dicha investigación el autor realizaba una mezcla entre agregados reciclados y polvo de caucho, analizando las propiedades mecánicas y la composición química de ambos componentes. Dentro de las propiedades mecánicas analizadas en dicho estudio cabe resaltar la distribución de finos, arenas y gravas, así como la densidad del material, los coeficientes de uniformidad y curvatura, el límite líquido y el índice de plasticidad, entre otros. A su vez, dentro de la composición química, se obtuvieron los componentes principales de los agregados reciclados, teniendo en cuenta su composición y distribución de materiales (Saberian & Li, 2018).

Finalmente, otra de las propiedades de gran interés en el ámbito de los agregados reciclados es la permeabilidad de los materiales tipo RCD, ya que dicha propiedad puede ser útil para determinar la factibilidad en cuanto a la aplicación de dichos materiales en obras de ingeniería como lo son los pavimentos o concretos, esta propiedad se analizó en el estudio realizado por Özalp, Yilmaz, Kara, Kaya & Şahin, donde se querían evidenciar los efectos de los agregados de tipo RCD en pavimentos de tipo adoquín y en tuberías de concretos.

De dicha investigación, es posible resaltar que es de las pocas que presenta un enfoque principal acerca de las propiedades hidráulicas de este tipo de materiales reciclados, destacando principalmente el análisis de la permeabilidad a través de los ensayos realizados mediante su investigación, obteniendo que para todas las muestras de estudio, la permeabilidad de las mismas se clasificó en los rangos de medio a alto (Özalp, Yilmaz, Kara, Kaya, & Şahin, 2016).

2.3. Marco Teórico

Para el presente proyecto es fundamental conocer los aspectos más relevantes relacionados a Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y a Residuos de Construcción y Demolición (RCD), ya que estos dos son los ejes temáticos que sustentan la investigación.

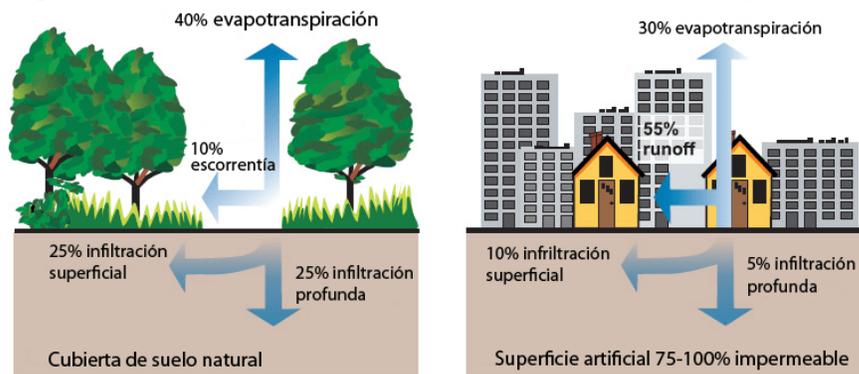
Dicho lo anterior y continuando con el razonamiento previamente planteado, el marco teórico se enfocará en apoyar la presente propuesta de trabajo de grado y definir los conceptos necesarios para su correcto desarrollo.

2.3.1. Problemática de los sistemas de drenaje:

Dentro de todos los problemas actuales que presentan las grandes ciudades o los territorios que pasan a ser urbanizados se encuentra que, debido a dicha urbanización, se pierde gran parte de la capacidad de infiltración natural que poseía dicho entorno, por lo que es necesario que el agua que antes se infiltraba y ahora discurre por la superficie sea recogida, transportada y vertida al entorno natural en puntos concretos (Candelo, 2013).

Con el fenómeno anteriormente mencionado también se genera la aceleración del ciclo del agua, lo que produce unos mayores volúmenes de escorrentía y caudales punta, desembocando en que la mayoría de las veces, los sistemas de drenaje convencionales no cumplan con la capacidad necesaria para evacuar las aguas lluvias (Bogota, 2011), en la Figura 2 se observan los cambios presentados en la dinámica del agua, cuando una zona se encuentra en su estado natural y cuando esta es urbanizada.

Figura 3. Escorrientías e Infiltración en suelo natural y urbano.



Fuente: (Padial, 2017)

2.3.2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS):

Debido a la problemática anteriormente mencionada, y en pro de brindarle una solución, surgieron los SUDS o Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible los cuales se definen íntegramente como un “conjunto de soluciones que se adoptan con el objeto de retener el mayor tiempo posible las aguas lluvias en su punto de origen, sin generar problemas de inundación, minimizando los impactos del sistema urbanístico en cuanto a la cantidad y calidad de la escorrentía y evitando así sobre dimensionamientos o ampliaciones innecesarias en el sistema” (Bogotá, 2014).

Los SUDS basan su funcionamiento en imitar de la mejor forma posible el drenaje natural que existió previo a la urbanización de la zona en cuestión, buscando de igual forma, regular y controlar parámetros como la calidad y la cantidad de agua transportada (Sara Perales Momparler, 2002).

En la Tabla 1, se pueden observar, a grandes rasgos, los sistemas tanto de drenaje como de subdrenaje más utilizados, y que se encuentran enmarcados dentro de los SUDS. Partiendo de dicha clasificación se profundizará en el Geodren filtrante, ya que este es el sistema que es objeto de estudio.

Tabla 1. Clasificación y Tipologías de los SUDS según su función.

Clasificación y tipología de SUDS según su función	
Función	Tipos de SUDS
Minimización de la escorrentía	Pavimento permeable, zonas verdes (separadores de calzadas), cunetas verdes
Captación de las aguas lluvias	Techos verdes, estanques, almacenamiento subsuperficial
Paisajismo	Jardines de lluvia, materas, bioretención
Infiltración	Drenes o Geodrenes filtrantes, zonas de bioretención, sumideros
Conducción	Franjas o zonas de conducción

Fuente: Elaboración Propia

2.3.3. Geodren filtrante:

Dentro de los SUDS se encuentra el Geodren filtrante, el cual tiene la finalidad de captar las aguas de escorrentía e infiltración y conducir las mediante una tubería perforada hasta un punto donde se pueda realizar su correcto almacenamiento o disposición (Miguel, Munguía, & Moreno, 2015).

Dichos sistemas de drenaje están compuestos por tres elementos principales, un geotextil no tejido, el cual cumple la función de permitir el paso del agua e impedir la entrada de partículas de material fino que puedan llegar a afectar la capacidad de

funcionamiento del sistema, el segundo componente consiste en una tubería perforada que permite la recolección y conducción del agua, y finalmente el sistema se completa con material granular que servirá a modo de relleno, dicho material debe poseer unas características muy específicas en cuanto a su granulometría y permeabilidad, ya que debe permitir el paso del agua sin afectar el funcionamiento del sistema (Escobar Velásquez et al., 2009).

Figura 4. Esquema de un sistema de drenaje de tipo Geodren filtrante.



Fuente: (Geomatrix, 2017)

Como se puede observar en la Figura 4, los geodrenes tienen la función de interceptar el agua de escorrentía superficial o agua de exceso que se encuentra libre en el suelo, la cual pasa a través del material granular que cubre el sistema, se cruza con el geotextil no tejido y la tubería colectora, para posteriormente ser conducida y evacuada hasta lugares que se hayan dispuesto para dicho fin.

Sumado a lo anterior, también se destacan otras funciones de este tipo de sistemas, ya que no solo drenan el agua de escorrentía, sino también sirven para interceptar el nivel freático y disminuirlo hasta la cota donde se encuentre la tubería colectora, permitiendo así lograr la protección de obras complejas, que requieren de excavaciones y rellenos, en donde muchas veces se ven afectaciones debido a las variaciones del nivel freático.

En Colombia, por ejemplo, existen empresas como PAVCO, las cuales se han enfocado en los últimos años en estudiar e invertir en el desarrollo, estudio y aplicación de este tipo de Geo sistemas, encontrando que cuando son implementados correctamente presentan menores tiempos de ejecución, menor impacto ambiental, y un ahorro económico, originado por la disminución en el movimiento y excavación de tierra, así como la facilidad constructiva que presenta a la hora de su uso.

Incluso con el sistema de uso convencional, se ha demostrado que el geodren como solución vial de drenajes, presenta hasta un 50 % menos de impacto ambiental

frente a las alternativas convencionales, tales como los drenes franceses u otros tipos de sistemas de drenaje.

De igual forma se destaca su aplicación no solo en proyectos viales, sino en campos deportivos, muros de contención, terraplenes, muros de sótanos, cimentaciones y rellenos sanitarios. Todo las aplicaciones anteriores han surgido debido a los beneficios a corto y largo plazo que tiene la implementación de este tipo de sistemas, ya que, desde su concepción, están ideados como sistemas de protección y preservación de la estructura en donde se deseen implementar (Departamento de Ingeniería de Geosistemas PAVCO, 2013).

2.3.4. Residuos de Construcción y Demolición (RCD):

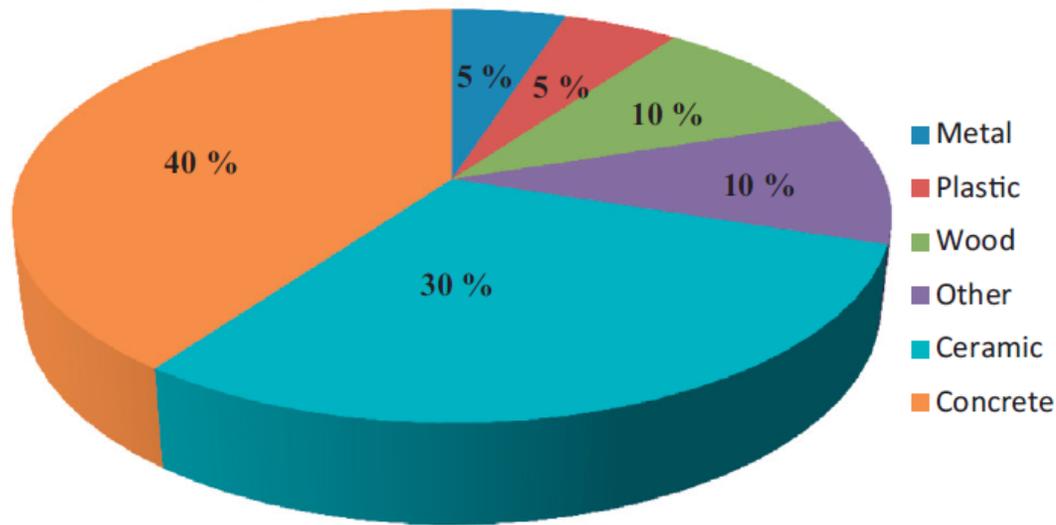
En cualquier tipo de obra de construcción se generan ciertos residuos cuando en ella se llevan a cabo trabajos de rehabilitación, mantenimiento o demolición, causando que se generen grandes volúmenes de material sobrante proveniente de residuos de concreto, mortero, ladrillos, gravas, arenas, etc. Dicho conjunto de materiales son los que se conocen como Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Lage, Herrero, Fonteboa, & Abella, 2010).

2.3.4.1. Composición de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD):

Los Residuos producidos en actividades de construcción y demolición de diversos tipos de estructuras pueden clasificarse según el tipo de material del cual están compuestos y, a su vez, también se almacenan dependiendo de dicha clasificación. Basados en la literatura actual se pueden dividir los RCD en residuos provenientes de concretos y morteros, residuos asfálticos, seguidos por metales, madera y plásticos y finalmente residuos mixtos en donde se pueden encontrar elementos como cerámicas, bloques o ladrillos, etc. (Mália, De Brito, Pinheiro, & Bravo, 2013).

Es importante destacar que la composición de los residuos de construcción y demolición puede variar dependiendo del sistema constructivo utilizado en la zona donde estos se generen (Guarin, 2017), aunque a nivel global se puede generalizar su composición como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Composición general de los RCD.



Fuente: Elaboración propia – Basado en (Özalp et al., 2016)

Como se dijo anteriormente, la composición mostrada en la Figura 5 de los residuos RCD, es la distribución típica de materiales que se encuentran dentro de los RCD de mayor uso y recolección típica, pero dichos porcentajes pueden variar significativamente dependiendo de donde sean obtenidos y su procesamiento luego de su recolección.

En cuanto a las propiedades generales de los RCD, no se encuentra establecido un estándar en cuanto a su resistencia, desgaste, o propiedades hidráulicas, debido a las condiciones tan diversas, en cuanto a composición, en las que pueden ser encontrados, utilizados y aplicados dentro del ámbito de la ingeniería. Es por esto que cada estudio en el que van a ser utilizados requiere de una serie de ensayos de laboratorio específicos, que permitan conocer las propiedades particulares de la muestra de material RCD que se está analizando.

Finalmente, es importante resaltar la importancia de realizar un cuidadoso análisis del material RCD, debido a que, si este no se encuentra correctamente clasificado, puede llegar a contener mayoritariamente partículas que no puedan ser consideradas agregados pétreos o derivados, y esto podría afectar su implementación en cualquier tipo de obra de ingeniería.

2.4. Marco Legal

En el territorio nacional existen diversas leyes y resoluciones que buscan regular el manejo y disposición de los residuos provenientes de las actividades del sector de la construcción, buscando de esta manera proteger el medio ambiente y evitar que se generen problemas de contaminación. A continuación, se resaltarán los aspectos más importantes que han permitido que dichos residuos sean actualmente objeto de estudio para su reutilización.

Dentro de las primeras regulaciones realizadas en el aspecto de los residuos sólidos se encuentra la Ley 23 de 1973, la cual fundamenta las bases de lo que se desea lograr en la actualidad con el manejo de los residuos provenientes de la construcción, en ella se plasma que “El medio ambiente es patrimonio común y de utilidad pública, por lo que es función del gobierno nacional velar por su protección y conservación” (Sarmiento, 2012).

A partir de la implementación de la Ley 23 de 1973, se comenzó a dar una mayor prioridad a los temas medioambientales, surgiendo así el Decreto 2811 de 1974, en el cual se profundizaba un poco más sobre las normas y disposiciones generales para el manejo de los factores que deterioran el medio ambiente, en donde se destaca especialmente “la acumulación o disposición inadecuada de residuos, basuras, desechos y desperdicios” (Republica de Colombia, 1974).

Luego surgió la Resolución 2309 de 1986, la cual fue expedida a cargo del Ministerio de Salud, el cual, en búsqueda de mantener unas condiciones adecuadas de salud pública “contempla las disposiciones generales de orden sanitario para el manejo, uso, disposición y transporte de los Residuos Sólidos” (Ministerio de Salud, 1986), desde dicha época, ya se vislumbraba la importancia de realizar un correcto manejo de los residuos producidos por diferentes actividades humanas, entre ellas la construcción. No obstante, y con la llegada de la nueva constitución en el año 1991, se comenzó a gestar un cambio en la gestión del medio ambiente, y a partir de allí surgieron las bases que permitieron crear la Ley 99 de 1993 la cual incluyó la creación del Ministerio del Medio Ambiente (CAR, 2018).

A partir de allí el Ministerio de Medio Ambiente ha sido la entidad encargada de controlar y reglamentar la disposición y el manejo de los residuos de construcción y demolición, llegando hasta la formulación de la Resolución 472 de 2017, en la cual se recopilan todos los conceptos básicos sobre los RCD y se deja claro que “los empresarios del sector de la construcción deben observar la reglamentación, e implementar los cambios necesarios dentro de sus actividades ya que la misma se encuentra vigente desde el 01 de enero de 2018” (Maat, 2017).

Por otra parte, en el caso de los sistemas de drenaje y subdrenaje, su normatividad parte de la Ley 142 de 1994 la cual abarca y establece el régimen de los servicios

públicos domiciliarios, en ella se habla sobre “la recolección municipal de residuos, principalmente líquidos, por medio de tuberías y conductos” (Congreso de la República de Colombia, 1994).

Posterior a esto se dio un cambio sumamente importante para el sector del saneamiento y del agua potable con el surgimiento en el año 2000 del Reglamento Técnico del sector del agua Potable y el Saneamiento Básico el cual se implementó con el fin de recopilar y reglamentar los sistemas de alcantarillado y el sector del agua potable (González, 2010).

A partir de allí han surgido leyes y decretos que buscan regular la implementación y definir los conceptos y criterios para el diseño de sistemas de drenaje y subdrenaje como lo son la Ley 388 de 1997 en la que “se vincula a los drenajes urbanos en los componentes urbano y rural de los Planes de Ordenamiento Territorial como parte de la infraestructura para el sistema vial, y como parte de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales y paisajísticos” (Congreso de la República de Colombia, 1997).

También es fundamental destacar que, a partir de la formulación y puesta en marcha de las leyes anteriormente mencionadas, los sistemas urbanos de drenaje han tenido una gran importancia dentro de los Planes Nacionales de Desarrollo ya que “fortalecen la gestión del riesgo en zonas urbanas y promueven la renovación urbana del territorio nacional” (Bayona, 2011). Sin embargo, a pesar de que la regulación de los RCD y la aplicación de los sistemas urbanos de drenaje se encuentran debidamente reglamentados, no ha implicado que su gestión sea del todo correcta, ya que la aplicación de dichos residuos en nuevas obras de ingeniería no ha sido ampliamente difundida en Colombia, así como los sistemas de drenaje que requieren de un gran control y seguimiento por parte de las entidades correspondientes, para lograr que cumplan con su función, es decir, con “brindar soluciones que permitan afrontar el planeamiento, diseño y gestión de las aguas pluviales” (Perales-Momparler, Andrés-Doménech, & Escalante, 2008).

3. METODOLOGÍA

Para la ejecución del proyecto de investigación denominado “Determinación de la permeabilidad y desgaste de residuos de construcción y demolición para su implementación como material granular en geodrenes con tubería colectora”, se llevó a cabo la selección del material, además de ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar la permeabilidad, lavado, resistencia al desgaste y cantidad de partículas livianas de dos tipologías de material RCD. De esta manera se precisa si el material es garante de las condiciones de calidad que se estipula en la normativa vigente para este tipo de geodrenes.

3.1. Recopilación de información

Se realizó una exhaustiva investigación acerca de los Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles (SUDS) empelados en la actualidad, de esta manera se visualizó que de los principales componentes en los geodrenes con tubería hacen parte los agregados pétreos de trituración, los cuales se obtienen a partir de la trituración de rocas de canteras.

A su vez, la investigación abarcó la aplicabilidad que ha tenido el material RCD a nivel mundial y nacional, en donde se enfatiza la importancia de la reutilización de este material debido a que, en los últimos años, el sector de la construcción ha crecido significativamente, al igual que los residuos generados por estas prácticas. Debido a la cantidad y disposición inadecuada, se han tomado medidas para la adecuada gestión integral de los residuos generados en obra.

3.2. Selección del material de estudio

El material RCD empleado en los ensayos fue material residual de construcción y demolición comercial de dos tipos, el primero se obtuvo a partir de residuos de arenas, gravas y concretos, el segundo, a partir de residuos mixtos (mampostería, tejas, baldosas, porcelana sanitaria). La cantidad de material residual utilizado en total fue de 30 kg para cada tipo, debido a que los ensayos de laboratorio no requerían gradación especial, la granulometría de los dos materiales osciló entre el pasa tamiz 1” y retenido en el tamiz N°8, de la normativa ASTM, con respecto a los sobre tamaños, únicamente se presentaron en el material RCD mixto.

Estos materiales se obtuvieron de la planta de tratamiento SECAM JR, ubicada en la localidad quinta de Usme, barrio El Uval, ya que dicho gestor RCD cuenta con las licencias requeridas y se encuentra registrado ante la Secretaria Distrital de Ambiente, hay que mencionar, además que esta planta de tratamiento cumple con todos los lineamientos necesarios para realizar actividades de acopio temporal y tratamiento del material.

3.3. Caracterización de los materiales RCD

Para la caracterización de las dos tipologías de material se realizaron ensayos de resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles, cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo, permeabilidad de suelos granulares por el método de cabeza constante, además de la implementación de un método para la determinación del porcentaje de lavado del material.

De acuerdo con las Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras, realizadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se tiene que para un agregado de tamaño máximo nominal de 19.0 mm, con pérdidas por abrasión máxima de 50%, existe un coeficiente de variación, en cuanto a el resultado final de los ensayos para materiales granulares, de 3.4%.

Lo anterior representa que, los resultados de dos ensayos adecuadamente realizados sobre muestras del mismo agregado, por el mismo operario y empleando el mismo equipo, no deberían diferir en más de 9.6%. Sin embargo, para efectos de esta investigación, se decidió realizar un solo ensayo para cada parámetro a determinar, siguiendo estrictamente el procedimiento indicado en la normativa.

Previamente a los ensayos, se realizó el cuarteo de las dos muestras, tal como lo contempla la norma INV E - 202 – 13 "Reducción de muestras de agregados por cuarteo", en donde, se hizo uso de una pala de borde recto, una pala común, un palustre, una pieza de lona y cepillos. Para cada uno de los materiales se realizó el siguiente procedimiento, lo primero fue colocar la muestra original sobre la lona, evitando la pérdida de material ni la adición de otros materiales, con ayuda de las palas de borde recto se volteó todo el material tres veces, durante la última vuelta se formó una pila cónica, la cual fue aplanada cuidadosamente, posteriormente, se dividió la muestra en cuatro cuartos iguales, de los cuales se tomaron dos cuartos opuestos, incluido todo el material fino, tal y como se observa en la Figura 6.

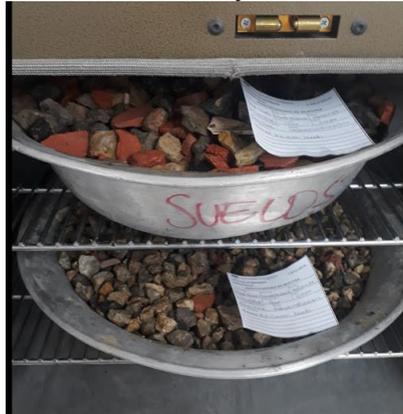
Figura 6. Cuarteo de material RCD



Fuente: Documentación propia.

Hecho lo anterior, todos los ensayos que se realizaron requerían tener una limpieza previa, por lo que, el material tomado del cuarteo, se lavó, procurando no alterar las condiciones de granulometría de la muestra, y luego fue introducido al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta que su masa fuese constante. Este proceso se observa en la Figura 7.

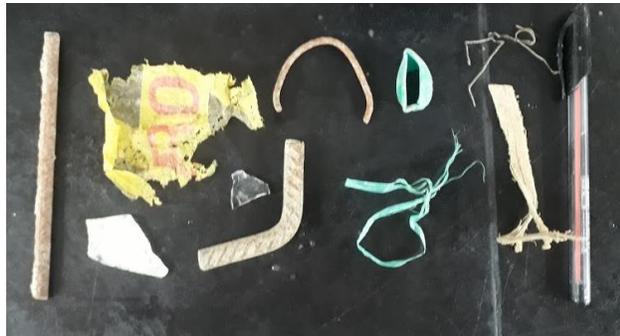
Figura 7. Material lavado RCD mixto y de concretos, respectivamente.



Fuente: Documentación propia.

Durante el lavado de la muestra fueron retirados contaminantes, los cuales evidenciaron que efectivamente el material es proveniente de los residuos generados por construcción y demolición, tales como trozos de varillas, cintas preventivas, alambres, vidrio, trozos de poli sombra y madera, esto se evidencia en la Figura 8.

Figura 8. Contaminantes extraídos del material RCD.



Fuente: Documentación propia.

3.4. Ensayo de desgaste y durabilidad en el material RCD

Para realizar este ensayo se hizo uso de la norma INV E - 219 – 13 “Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ”) por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles”, en primera instancia, según la Tabla 2, se eligió la granulometría que más se adaptó al tamizado del material que

fue seleccionado anteriormente por cuarteo, en donde para el material RCD concretos se hizo uso de la gradación tipo B y para el material RCD concretos, gradación tipo A, esto debido a que cada uno de los materiales tenía una granulometría ligeramente diferente, en donde la granulometría del RCD proveniente de concretos y el RCD mixto se ajustaban más a la tipología del ensayo tipo B y A, respectivamente. Los requerimientos, en cuanto a granulometría para cada tipo de ensayo son los que se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Granulometrías de las muestras de ensayo.

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
mm	(alt.)	mm	(alt.)	A	B	C	D
37.5	(1 1/2")	25.0	(1)	1250 ± 25	-	-	-
25.0	(1)	19.0	(3/4")	1250 ± 25	-	-	-
19.0	(3/4")	12.5	(1/2")	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.5	(1/2")	9.5	(3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
9.5	(3/8")	6.3	(1/4")	-	-	2500 ± 10	-
6.3	(1/4")	4.75	(No 4)	-	-	2500 ± 10	-
4.75	(No 4)	2.36	(No 8)	-	-	-	5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: INVIAS, 2013.

Luego de tener claro el tipo de gradación a utilizar, se realizó el proceso de tamizado para cada uno de los materiales, adicional a esto, se comprobó la limpieza del tambor de la máquina y la carga abrasiva correspondiente, luego, se introdujo el material junto a las cargas en el tambor y se hizo girar a 33 rpm, hasta que se completaron 1000 revoluciones.

En las Figuras 9, 10 y 11, se refleja el procedimiento anteriormente descrito para el material RCD concretos. Pasado este tiempo, se descargó el material en una superficie plana y se realizó una separación preliminar de la muestra por medio del tamiz No. 12, el material retenido fue lavado y secado al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta que su masa fuese constante.

Este procedimiento se realizó para las dos tipologías del material, teniendo en cuenta la variación de las cargas abrasivas.

Figura 9. Proceso de tamizado del material RCD concreto.



Fuente: Documentación propia.

Figura 10. Incorporación del material RCD concretos junto a las cargas abrasivas en la máquina de Los Ángeles.



Fuente: Documentación propia.

Figura 11. Material RCD concretos después del ensayo en la máquina de Los Ángeles



Fuente: Documentación propia.

La norma INV E - 219 – 13 “Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”) por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles” establece la siguiente expresión para el cálculo del porcentaje de pérdida a causa de la abrasión.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad [1]$$

En donde:

- P_1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo (g)
- P_2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz No. 12 (g).

3.5. Ensayo de cantidad de partículas livianas

Para realizar este ensayo se hizo uso de la norma INV E - 221 – 13 “Cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo”. Adicional a esto, se realizó el ensayo basado en la norma INV E – 223 – 13 “Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso”, ya que permite caracterizar el material, además de determinar propiedades adicionales de interés entorno a la investigación. Las normas fueron emitidas por el instituto INVIAS en el año 2013.

Para la preparación de la muestra para realizar los ensayos, se determinó con base a la Tabla 3. En donde define la masa mínima de la muestra para el ensayo, cabe resaltar que la muestra para este ensayo se tomó del tamizado del material que en un principio fue pasado por el proceso de cuarteo y posterior lavado.

Tabla 3. Cantidades mínimas para el ensayo de Densidad.

Tamaño máximo del agregado (tamices de abertura cuadrada)	Peso mínimo de la muestra (g)
4.75 mm	200
19.0. mm	3000
37.5 mm	5000
75.0 mm	10000

Fuente: INVIAS, 2013.

El primer paso para realizar el ensayo de “Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso”, luego de tener las cantidades mínimas para el ensayo, fue sumergir en agua, a temperatura ambiente, el material por un periodo de 28 horas. Luego del periodo de inmersión, las partículas fueron sacadas del agua, para secarlas con ayuda de un paño absorbente, teniendo en cuenta que las partículas de gran tamaño fueron secadas de manera individual, hasta que el agua superficialmente visible fue eliminada. Como paso a seguir, se determinó la masa de la muestra en condición saturada con superficie seca (SSS).

Después de la determinación de la masa en el aire, se colocó la muestra en el interior de la canastilla metálica, de esta manera se determinó la masa sumergida en el agua, en donde la temperatura fue de $23 \pm 2^\circ \text{C}$, para evitar la inclusión de aire en la muestra antes de determinar la masa, se agitó la canastilla mientras estuvo sumergida. Es importante resaltar que, para evitar errores en la toma de los datos, fue necesario que la canastilla y la muestra estuvieran totalmente sumergidas y que el hilo de suspensión fuera lo más corto posible, para minimizarlos efectos de una profundidad de inmersión variable.

Así pues, se secó la muestra en horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta que su masa fuese contante, se permitió dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente durante 6 horas hasta que el agregado permitió ser manipulable, y en seguida, se determinó su masa.

El anterior procedimiento se realizó para las dos tipologías del material. A continuación, de la Figura 12 a la 14 se observa la realización del ensayo al material RCD mixto.

Figura 12. Material RCD mixto en inmersión.



Fuente: Documentación propia.

Figura 13. Material RCD mixto en condición SSS.



Fuente: Documentación propia.

Figura 14. Material RCD mixto, toma de masa sumergida.



Fuente: Documentación propia.

En el ítem 8 de la norma denominada “Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso”, se definen las ecuaciones para realizar los cálculos correspondientes, como se muestra a continuación:

Densidad relativa (Gravedad específica) seca al horno (SH): se calcula sobre la base del agregado secado al horno, de la siguiente forma:

$$\text{Densidad relativa (Gravedad específica) } SH = \frac{A}{(B-C)} \quad [2]$$

En donde:

- A: Masa al aire de la muestra seca al horno (g).
- B: Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca (g).
- C: Masa aparente de la muestra saturada en agua (g).

Densidad relativa (Gravedad específica) en condición saturada y superficialmente seca (SSS): Se calcula sobre la base del agregado en condición saturada y superficialmente seca, de la siguiente forma:

$$\text{Densidad relativa (Gravedad específica) } SSS = \frac{B}{(B-C)} \quad [3]$$

Densidad relativa aparente (Gravedad específica aparente): se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Densidad relativa aparente (Gravedad específica aparente)} = \frac{A}{(A-C)} \quad [4]$$

Densidad en condición seca al horno (SH): se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Densidad (SH), kg/m}^3 = \frac{997.5 \times A}{(B-C)} \quad [5]$$

Densidad en condición saturada y superficialmente seca (SSS): se calcula sobre la base del agregado en condición saturada y superficialmente seca, de la siguiente forma:

$$Densidad (SSS) = \frac{997.5 \times B}{(B-C)} \quad [6]$$

Densidad aparente: se calcula se la siguiente forma:

$$Densidad aparente = \frac{997.5 \times A}{(A-C)} \quad [7]$$

Absorción: se calcula, en porcentaje, según la expresión:

$$Absorción (\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad [8]$$

El ensayo de cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo, consistió en emplear un líquido pesado, en este caso una solución de cloruro de Zinc en agua, con una gravedad específica de 2.0, el cual, separó del agregado pétreo las partículas livianas que este contenía.

El primer paso que se llevó a cabo, después de tener el agregado en la condición de saturado con superficie seca (SSS), como se muestra en la Figura 15, fue sumergirlo en el recipiente con la solución de cloruro de zinc, la cual fue preparada en el laboratorio, el volumen de este líquido fue 3 veces mayor al volumen absoluto del agregado, para hacer más eficiente el retiro de las partículas que subieron a la superficie, se dividió todo el agregado junto al líquido pesado en varios vaso de precipitado y para cada uno de ellos se retiraron dichas partículas, con ayuda de un colador y se colocaron en otro recipiente, cada uno de los vasos fue agitado repetidamente hasta que ninguna partícula subió a la superficie. La solución de cloruro de zinc utilizada, así como el material sumergido y las partículas obtenidas se observan en las Figuras 16, 17 y 18.

Las partículas retiradas se lavaron con el solvente adecuado, en este caso, se lavaron con agua hasta que se removió la totalidad del líquido pesado en las partículas, con la finalidad de obtener una determinación más precisa, las partículas decantadas fueron llevadas al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta que su masa fuese constante y así, se determinó el valor de M1.

El anterior procedimiento se realizó para las dos tipologías del material. A continuación, se despliega el registro fotográfico de la realización del ensayo.

Figura 15. Material RCD concretos y mixto, respectivamente en condición SSS.



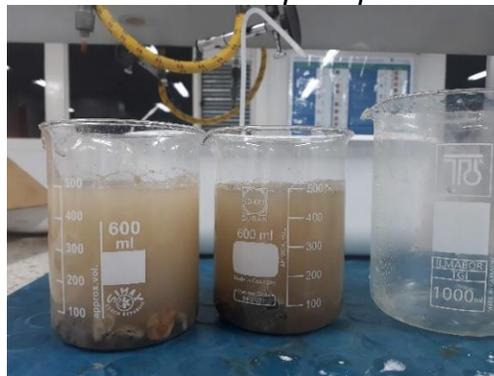
Fuente: Documentación propia.

Figura 16. Reactivo para preparar el líquido pesado, Cloruro de Zinc.



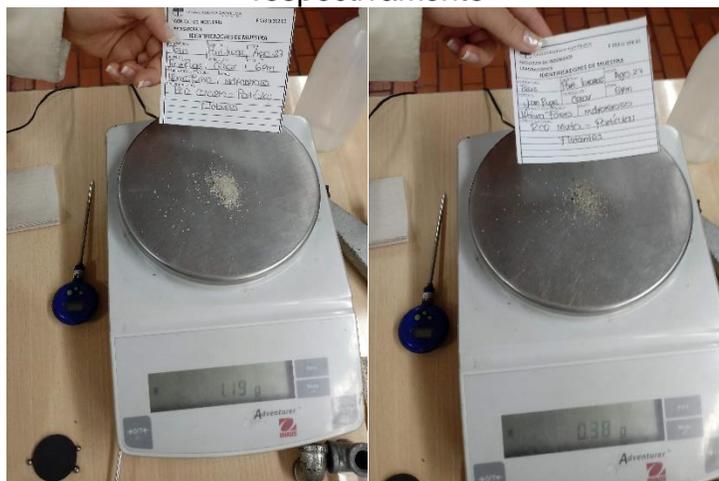
Fuente: Documentación propia.

Figura 17. Material RCD concretos y mixto, respectivamente, inmersos en el líquido pesado.



Fuente: Documentación propia.

Figura 18. Partículas flotantes de los materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente



Fuente: Documentación propia.

El porcentaje de partículas livianas en los agregados se calcula mediante la siguiente fórmula:

Agregado grueso:

$$L = \frac{M_1}{M_3} \times 100 \quad [9]$$

En donde:

- L: Porcentaje en masa de partículas livianas.
- M1: Masa seca de las partículas retenidas en el colador (g).
- M3: Masa seca de la porción de la muestra retenida en el tamiz No.4 (g).

3.6. Ensayo de permeabilidad (cabeza constante) y lavado

Para la realización de este ensayo se hizo uso de la norma INV E – 130 - 13 “Permeabilidad de suelos granulares (Cabeza constante)” emitida por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, en el año 2013.

Para que el ensayo se desarrollara en óptimas condiciones fue necesario asegurar algunos parámetros, los cuales incluían tener continuidad sin cambios en el volumen del suelo durante el ensayo, flujo con los vacíos del suelo saturados con agua y sin burbujas de aire dentro de los mismos, flujo uniforme sin cambios en el gradiente hidráulico, y proporcionalidad directa de la velocidad de flujo con gradientes hidráulicos por debajo de ciertos valores críticos, en los cuales se inicia el flujo turbulento.

El material utilizado para este ensayo se tomó del inicialmente lavado, donde nuevamente se realizó un proceso de tamizado, en el cual se retiraron los sobre tamaños. Se debe tener en cuenta la granulometría que requiere la norma, además de garantizar que el material haya sido previamente pasado por un proceso de cuarteo para garantizar que sea una muestra homogénea y representativa que pueda llenar el permeámetro de la forma más óptima posible. Adicional a esto, se toma una cantidad aproximadamente igual a dos veces la requerida para llenar el cilindro del permeámetro, después se puso en inmersión el material por un periodo de 24 horas.

Antes de iniciar el ensayo, se tomaron las medidas correspondientes al diámetro interior del permeámetro, las longitudes entre las salidas de los piezómetros, la profundidad medida en cuatro puntos simétricamente espaciados desde la superficie superior de la placa tope del cilindro de permeabilidad, hasta la parte superior de la piedra porosa superior.

Luego del tiempo de inmersión del material, este fue colocado en capas delgadas uniformes aproximadamente iguales en espesor, que no debe ser menor a 15mm, luego, se niveló la superficie superior del suelo colocando la placa porosa o la malla superior en posición y rotándose suavemente a derecha e izquierda. Con el empaque en su sitio, se presionó hacia abajo la placa superior contra el resorte y se fijó seguramente en la parte superior del cilindro del permeámetro, de esta manera, se produjo un sello a prueba de aire, tal y como se observa en las Figuras 19 y 20. Las condiciones anteriores satisfacen la premisa de mantener el peso unitario inicial, sin cambio significativo de volumen durante el ensayo.

Con estas condiciones, se abrió ligeramente la válvula de admisión del tanque filtrante hasta que se cumplieron las condiciones descritas anteriormente, no se tomaron medidas de gasto y de cabeza hasta que se alcanzó una condición de cabeza estable. Luego de esto, se midió y anotó el tiempo, la diferencia de nivel en los piezómetros, el gasto en el caudal y la temperatura del agua, de este procedimiento se realizaron 5 tomas de datos.

Cuando se concluyó el ensayo de permeabilidad, se drenó y se examinó la muestra para establecer si era esencialmente homogénea. Para la implementación del ensayo de lavado se tomaron aproximadamente 500 ml de la muestra, como se observa en la Figura 21, la cual fue llevada al Laboratorio de Aguas de la Universidad Católica de Colombia y en el turbidímetro se midió la turbiedad para cada una de las muestras, lo cual se observa en la Figura 22.

El anterior procedimiento se realizó para las dos tipologías del material.

Figura 19. Material RCD concretos en inmersión.



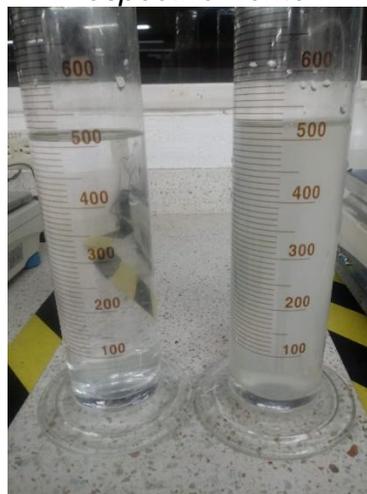
Fuente: Documentación propia.

Figura 20. Montaje del material RCD concreto en el permeámetro.



Fuente: Documentación propia.

Figura 21. Agua drenada del permeámetro de materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente



Fuente: Documentación propia.

Figura 22. Agua drenada de los materiales RCD concretos y mixtos, respectivamente, en las celdas para medición de la turbiedad.



Fuente: Documentación propia.

Se calcula el coeficiente de permeabilidad, k , de la siguiente manera:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h} \quad [10]$$

Donde:

- k = coeficiente de permeabilidad
- Q = gasto, es decir cantidad de agua descargada
- L = distancia entre piezómetros
- A = área de la sección transversal del espécimen
- t = tiempo total de desagüe
- h = diferencia de cabeza (altura) sobre los piezómetros.

Adicional a esto, se corrige la permeabilidad [para la que corresponde a 20° C (68° F)], multiplicando k por la relación de la viscosidad de agua a la temperatura del ensayo con respecto a la viscosidad del agua a 20° C (68° F).

$$\text{Correc. de la permeabilidad} = k * \frac{\mu_{20.5^{\circ}\text{C}}}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}} \quad [11]$$

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Resultados

A continuación, se registran según la metodología anteriormente descrita, los valores obtenidos en cada uno de los ensayos de laboratorio realizados, indicando las unidades de medición, así como las características fundamentales que fueron medidas para la realización de cada ensayo.

4.1.1. Resultados de la caracterización granulométrica del material RCD

En las tablas 4 y 5, se realiza una recopilación del peso del material retenido en cada uno de los diferentes tamaños de tamices que se requerían para la correcta realización de los ensayos de laboratorio planteados.

Tabla 4. Caracterización Granulométrica – Material RCD Concretos.

Tamaño de tamiz	Peso retenido (g)
3/4"	1177.6
1/2"	7001.8
3/8"	1192.9
No 4	1250.9
No 8	164.4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Caracterización Granulométrica – Material RCD Mixto.

Tamaño de tamiz	Peso retenido (g)
Sobre tamaños	8394.4
3/4"	4945.9
1/2"	9051.8
No 4	326.7
No 8	122.9

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Resultados de desgaste y durabilidad en el material RCD:

En cuanto al desgaste mecánico, se realizó primeramente el análisis del desgaste a partir del ensayo definido como desgaste en máquina de los ángulos (Norma INV 218-13), obteniendo de esta manera los siguientes resultados:

Tabla 6. Parámetros para el Ensayo de Resistencia al desgaste en Máquina de los Ángeles – Material RCD Concretos

Método	Tipo B	
Condición de la muestra	Limpia, seca al horno	
Gradación y masa usada (g)	1/2 "	2500
	3/8 "	2500
Número de vueltas	500	
Numero de esferas	11	

Fuente: Elaboración Propia

Datos:

- Masa de la muestra seca al horno antes del ensayo (P_1) = 5000 g
- Masa de la muestra seca al horno después del ensayo (P_2) = 3183 g

Utilizando la Ecuación 1, se obtiene:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{5000 \text{ g} - 3183 \text{ g}}{5000 \text{ g}} \times 100 = 36.34 \%$$

Tabla 7. Parámetros para el Ensayo de Resistencia al desgaste en Máquina de los Ángeles – Material RCD Mixto

Método	Tipo A	
Condición de la muestra	Limpia, seca al horno	
Gradación y masa usada (g)	1 "	1250
	3/4 "	1250
	1/2 "	1250
	3/8 "	1250
Número de vueltas	500	
Numero de esferas	12	

Fuente: Elaboración Propia

Datos:

- Masa de la muestra seca al horno antes del ensayo (P_1) = 5000 g
- Masa de la muestra seca al horno después del ensayo (P_2) = 2651.5 g

Utilizando la Ecuación 1, se obtiene:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{5000 \text{ g} - 2651.5 \text{ g}}{5000 \text{ g}} \times 100 = 46.97 \%$$

Nota: Debido a los porcentajes de desgaste obtenidos en el ensayo de laboratorio de desgaste en máquina de los ángeles, se optó por omitir la realización del ensayo de desleimiento – durabilidad, debido a que, teniendo en cuenta los resultados de desgaste obtenidos en el ensayo de máquina de los ángeles, no aportaría información significativa o relevante (En cuanto a las propiedades de durabilidad y desintegración, medidas en este ensayo). Por su parte, y buscando cumplir y analizar todos los aspectos planteados, se realizan una serie de recomendaciones que se encuentran desarrolladas en detalle más adelante en este documento (Ver capítulo Recomendaciones).

4.1.3. Resultados de cantidad de Partículas Livianas:

Para el correcto desarrollo y cálculo de la cantidad de Partículas livianas de cada uno de los materiales RCD, se optó por realizar, de forma adicional, el análisis de la Gravedad específica y absorción (Norma INV 223-13), debido a que, mediante los valores medidos por dicho ensayo, es posible caracterizar y determinar algunas propiedades adicionales de interés. Los resultados de ambos ensayos se resumen a continuación.

Gravedad Específica y Absorción:

Tabla 8. Granulometría necesaria para los ensayos de Gravedad Específica, Absorción y Partículas Livianas – Material RCD Concretos

Tamaño del tamiz	Masa (g)
3/8 "	1500
1/2 " a 3/4 "	3000
No 4 o menor	200
Muestra tomada para el ensayo	3000

Fuente: Elaboración Propia

Datos:

- Masa al aire de la muestra seca al horno (A) = 3000 g
- Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca (B) = 3080.4 g
- Masa aparente de la muestra saturada en agua (C) = 1732 g

A partir de la Ecuación 2, Se obtiene la Gravedad Específica seca al horno (SH):

$$\text{Gravedad Específica (SH)} = \frac{3000 \text{ g}}{(3080.4 \text{ g} - 1732 \text{ g})} = 2.22$$

Luego se determina, mediante la Ecuación 3, la Densidad Relativa (Gravedad Específica) en condición saturada y superficialmente seca (SSS):

$$\text{Gravedad Específica (SSS)} = \frac{3080.4 \text{ g}}{(3080.4 \text{ g} - 1732 \text{ g})} = 2.28$$

Mediante la Ecuación 4, se obtiene la Densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica Aparente):

$$\text{Gravedad Específica Aparente} = \frac{3000 \text{ g}}{(3000 \text{ g} - 1732 \text{ g})} = 2.37$$

La Densidad en condición seca al horno (SH), se calcula a partir de la Ecuación 5:

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 \times 3000 \text{ g}}{(3080.4 \text{ g} - 1732 \text{ g})} = 2219.30 \text{ kg/m}^3$$

Posteriormente se determina, mediante la Ecuación 6, la Densidad en condición saturada y superficialmente seca (SSS):

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 \times 3080.4 \text{ g}}{(3080.4 \text{ g} - 1732 \text{ g})} = 2278.77 \text{ kg/m}^3$$

Luego, la Densidad aparente obtenida, mediante la Ecuación 7 es:

$$Densidad\ Aparente = \frac{997.5 \times 3000\ g}{(3000\ g - 1732\ g)} = 2360.02\ kg/m^3$$

Finalmente, la Absorción obtenida, mediante la Ecuación 8 es:

$$Absorción\ (\%) = \frac{3080.4\ g - 3000\ g}{3000\ g} \times 100 = 2.68\ \%$$

Cantidad de Partículas Livianas:

Datos:

- Peso seco de las partículas retenidas en el colador (M_1) = 35.7 g
- Peso de la muestra seca retenida en el tamiz No. 4 (M_3) = 3000 g

A partir de la Ecuación 9, se obtiene que:

$$Porcentaje\ de\ particulas\ livinas\ (L) = \frac{35.7\ g}{3000\ g} \times 100 = 1.19\ \%$$

Posteriormente, se realizan los mismos procedimientos anteriormente realizados, para el material RCD Mixto, con los datos iniciales mostrados en la Tabla 9. Los resultados finales obtenidos para esta muestra se ven representados a modo de recopilación en la Tabla 16.

Tabla 9. Granulometría necesaria para los ensayos de Gravedad Especifica, Absorción y Partículas Livianas – Material RCD Mixto

Tamaño del tamiz	Masa (g)
1 " a 1/2 "	5000
1/2 " a 3/4 "	3000
Muestra tomada para el ensayo	4000

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4. Resultados de ensayo de Permeabilidad (Cabeza constante):

En el ensayo de permeabilidad es necesario reportar, además de los resultados obtenidos, las dimensiones y características del instrumento utilizado (Permeámetro), las cuales se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensiones del Permeámetro

Dimensiones	Medida (cm)
Altura [cm]	40.00
Diámetro [cm]	16.50
Distancia Manómetro superior e inferior [cm]	7.50
Distancia entre piezómetros [cm]	5.00
Área transversal [cm ²]	213.82

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11. Granulometría del material utilizado en el ensayo de Permeabilidad – Material RCD Concretos

Tamaño del tamiz	Masa (g)
3/4 "	2233.60
3/8 "	2149.90
No 4	1250.90
No 8	164.39
1/2 "	8001.78

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12. Granulometría del material utilizado en el ensayo de Permeabilidad – Material RCD Mixto

Tamaño del tamiz	Masa (g)
No 4	326.72
No 8	122.98
1/2 "	11051.80
3/4 "	4945.90
Sobre tamaños	8394.40

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, la granulometría utilizada para cada uno de los ensayos, se observa en las Tablas 11 y 12.

Para obtener un valor representativo de permeabilidad para toda la muestra, y siguiendo el procedimiento establecido en la Norma INV 130 – 13, se realizaron cinco ensayos para cada tipo de material, cuyos resultados se registran en las Tablas 13 y 14. El valor del coeficiente de permeabilidad (k) se obtiene mediante la Ecuación 10.

Tabla 13. Cálculo del coeficiente de permeabilidad – Material RCD Concretos

No. de Ensayo	Medida Piezómetros	Cabeza H [cm]	Q [cm ³]	t [s]	Temperatura [°C]	k [cm/s]
	h [cm]					
1	55	105	425	30	20.5	2.40 E-02
2			410		20.4	2.31 E-02
3			420		20.6	2.37 E-02
4			420		20.5	2.37 E-02
5			430		20.4	2.43 E-02
Valores promedio			421	-	20.5	2.38 E-02

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14. Cálculo del coeficiente de permeabilidad – Material RCD Mixto

No. de Ensayo	Medida Piezómetros	Cabeza H [cm]	Q [cm ³]	t [s]	Temperatura [°C]	k [cm/s]
	h [cm]					
1	54	105	430	30	20.4	2.43 E-02
2			410		20.5	2.31 E-02
3			420		20.5	2.37 E-02
4			415		20.5	2.34 E-02
5			420		20.6	2.37 E-02
Valores promedio			419	-	20.5	2.36 E-02

Fuente: Elaboración Propia

Luego de calcular el coeficiente de permeabilidad para cada uno de los tipos de material RCD se debe realizar una corrección de acuerdo a la temperatura y la viscosidad dinámica respectiva a la que se realizó el ensayo, según lo indicado en la Ecuación 11. Los valores necesarios para realizar dicha corrección se indican en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de viscosidad dinámica para la corrección de la permeabilidad

Temperatura [°C]	Viscosidad Dinámica [kg/m*s]
20	0.001003
20.5	0.000991
21	0.000979

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Correc. de la permeabilidad (RCD - Concretos)} = 2.38 \times 10^{-2} * \frac{0.000991 \text{ kg/m*s}}{0.001003 \text{ kg/m*s}}$$

$$\text{Correc. de la permeabilidad (RCD - Concretos)} = 2.35 \times 10^{-2}$$

$$\text{Correc. de la permeabilidad (RCD - Mixto)} = 2.36 \times 10^{-2} * \frac{0.000991 \text{ kg/m*s}}{0.001003 \text{ kg/m*s}}$$

$$\text{Correc. de la permeabilidad (RCD - Mixto)} = 2.33 \times 10^{-2}$$

4.1.5. Resultados de ensayo de Turbiedad (Lavado del material):

Para analizar el lavado del material RCD, es decir la cantidad de partículas desprendidas a causa de un flujo de agua constante, se decidió tomar muestras de agua resultantes del ensayo de permeabilidad, las cuales fueron tomadas luego de aproximadamente 10 minutos de flujo constante a través de la muestra. Los resultados se registran a continuación:

$$\text{Turbiedad (RCD - Concretos)} = 77.9 \text{ NTU}$$

$$\text{Turbiedad (RCD - Mixto)} = 113 \text{ NTU}$$

4.2. Análisis de Resultados

En primer lugar, y con la finalidad de comprender y generalizar los resultados obtenidos, se registran en la Tabla 16 los valores finales obtenidos para cada uno de los parámetros que fue analizado.

Tabla 16. Resumen de resultados obtenidos

Resumen de Resultados Obtenidos		
Variable medida	Resultado - RCD Concretos	Resultado - RCD Mixto
Desgaste [%]	36.34	46.97
Densidad Relativa (Gravedad Específica) [SH]	2.22	1.52
Densidad Relativa (Gravedad Específica) en condición saturada y superficialmente seca [SSS]	2.28	1.89
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica Aparente)	2.37	2.44
Densidad en condición seca al horno [SH] [kg/m ³]	2219.30	1511.54
Densidad en condición saturada y superficialmente seca [SSS] [kg/m ³]	2278.77	1890.25
Densidad Aparente [kg/m ³]	2360.02	2436.64
Absorción [%]	2.68	25.06
Porcentaje de Partículas Livianas (L) [%]	1.19	0.38
Coefficiente de Permeabilidad (k) [cm/s]	0.0235	0.0233

Fuente: *Elaboración Propia*

Teniendo presentes los valores obtenidos, es necesario realizar un análisis comparativo según diferentes autores que han realizado estudios de propiedades similares en materiales granulares, debido a que de allí se podrá determinar si los valores obtenidos favorecen a el uso de este tipo de materiales (RCD proveniente de concretos y mixto) en sistemas de subdrenaje de tipo Geodren.

A continuación, se realiza el análisis para cada propiedad de acuerdo a la investigación realizada.

4.2.1. Desgaste:

En el caso del desgaste del material RCD, para ambos casos y de forma general, se obtuvieron valores que rondan entre el 35 y el 45 %, lo cual es óptimo, teniendo

en cuenta que diferentes autores e investigaciones señalan que no se debe superar el 50 % de desgaste para el caso de agregados gruesos (Rocha, 2013), incluso, agregados con estos valores porcentuales de desgaste, han sido recomendados para diseños de mezclas en concreto, definiendo que podrían ser utilizados en la fabricación de losas, pisos y demás estructuras en concretos (De la Cruz, Culque, Yajahuanca, & Olortegui, 2015).

Teniendo en cuenta estos referentes, es posible definir que el material puede ser apto para su aplicación en sistemas de geodrenes, siempre y cuando se tenga en cuenta que, al ser un ensayo de laboratorio en condiciones controladas, estas propiedades pueden presentar variaciones en campo, por lo que se recomienda utilizar la granulometría utilizada en este ensayo, la cual varía de 3/8" a 1", e incluso, intentar analizar el comportamiento de material granular de tamaños superiores, lo cual sería objeto de una investigación derivada, debido a que tamaños inferiores podrían afectar el funcionamiento del sistema, como se describirá más adelante.

4.2.2. Gravedad Específica y Absorción:

Por otra parte, analizando los valores obtenidos de Gravedad específica para cada una de las condiciones de ensayo (Estado seco al horno, Saturado y superficialmente seco, y aparente) se tiene que estos valores concuerdan con los rangos típicos de Gravedad específica que se han recopilado a lo largo de diversas investigaciones (Aguilar, Chuquillanqui, Lopez, Pariona, & Tello, 2014), los cuales se registran en la Tabla 17.

Tabla 17. Valores típicos de Gravedad Específica para diferentes tipos de material granular

Tipo de suelo		Gravedad específica
Inorgánico	Grava	2.65
	Arena gruesa a media	2.65
	Arena fina (limosa)	2.65
	Polvo de piedra y limo arenoso	2.67
	Arena	2.65
	Limo arenoso	2.66
	Limo	2.67 – 2.70
	Arena arcillosa	2.67
	Limo arcillo arenoso	2.67
	Arena arenosa	2.70
	Arcilla limosa	2.75
	Arcilla	2.72 – 2.80
	Orgánico	Limos con trazos de materia orgánica
Lodos aluviales orgánicos		2.13 – 2.60
Turba		1.50 – 2.15

Fuente: Propia – Basado en: (Aguilar et al., 2014)

En cuanto a la absorción, se obtuvieron resultados que variaron ampliamente en cuando a el tipo de material RCD analizado, teniendo que, para el material RCD compuesto de residuos de concretos, morteros y gravas se obtuvo un resultado de 2.68 %, lo cual concuerda con el tipo de material analizado, y algunos ensayos desarrollados en investigaciones con materiales de granulometría y propiedades similares (Clímaco, 2014).

Por otra parte, para el material RCD compuesto de materiales mixtos (Gravas, ladrillo, cerámicos, etc.) se obtuvo un valor porcentual significativamente mayor respecto a el de concretos, lo cual puede ser ocasionado por la mezcla de materiales como los residuos de ladrillo que, comúnmente, y según investigaciones realizadas, tienen valores de absorción cercanas al 20% (Aliaga et al., 2015), lo cual explicaría la diferencia en cuanto a el material que contiene solo concretos.

En este caso se debe considerar el diseño final del sistema de drenaje, ya que, si el sistema es diseñado para una evacuación con bajos valores de caudal, sería más óptimo utilizar un material que no absorbiera gran cantidad del flujo, sino que, a su vez, dejara que el agua se infiltrara hasta la tubería conductora y siguiera su camino hasta el colector principal.

Por otra parte, en el caso de que el sistema tenga unos grandes volúmenes y caudales de diseño, puede aprovecharse la absorción del material granular para disminuir la tasa de flujo dentro de la tubería conductora, y así evitar que el sistema se colmate.

4.2.3. Porcentaje de Partículas Livianas:

En el caso de los valores obtenidos en el ensayo de Partículas Livianas, se obtuvo que ninguna de las dos muestras de material RCD superaron el 1.5% respecto a su peso total.

Estos valores facilitan la aplicación de este tipo de material granular en sistemas como el de los geodrenes, donde se requiere un bajo número de partículas finas y livianas que puedan ser arrastradas por el agua y, paulatinamente, se acumulen en los orificios de entrada de la tubería del sistema, hasta colmatarlo, lo que disminuiría críticamente su eficiencia de funcionamiento.

Es importante aclarar que para lograr esto es necesario que el material se encuentre debidamente tamizado y lavado, buscando evitar el ingreso de material fino en el sistema, lo cual aumenta el tiempo de funcionamiento del geodren y, a su vez disminuye los costos de mantenimiento.

4.2.4. Coeficiente de Permeabilidad:

En cuanto a el coeficiente de permeabilidad, se obtuvieron valores sumamente cercanos, teniendo para ambos casos un valor inferior a 0.025 cm/s lo que nos indica claramente que el suelo posee una alta tasa de permeabilidad, situación que es favorable para el uso que se ha planteado en esta investigación, en la Tabla 18 se observa una clasificación entre varios tipos de suelos y/o materiales granulares con sus respectivos valores típicos de permeabilidad.

Tabla 18. Valores orientativos del coeficiente de permeabilidad

Tipo de suelo	Kz (m/s)
Grava limpia	> 10 E-2
Arena limpia y mezcla de grava y arena limpia	10 E-2 - 10 E-5
Arena fina, limo, mezclas de arenas, limos y arcillas	10 E-5 - 10 E-9
Arcilla	< 10 E-9

Fuente: (Documento Básico Se-C (Seguridad estructural Cimientos), 2008)

4.2.5. Lavado:

Según los valores de turbiedad obtenidos sobre ambas muestras sometidas a flujo constante de agua, es posible concluir que la muestra de material RCD compuesto de residuos de concretos presenta un menor lavado de sus partículas, teniendo que la diferencia hallada en cuanto turbiedad es significativa respecto al material RCD mixto (aproximadamente un 50%).

Según todos los parámetros anteriormente analizados, es posible analizar que la variación en cuanto a la turbiedad medida puede depender en gran medida por la composición y tipología de los materiales que componen cada una de las muestras, por lo que es un factor a tener en cuenta dentro de la aplicación de este material en un sistema de drenaje.

Con estos valores de turbiedad también es posible tener una idea de la durabilidad que cada uno de los materiales RCD podría desarrollar dentro de un sistema de drenaje, ya que, como se ha mencionado anteriormente, es necesario reducir al mínimo las partículas finas de los materiales granulares dentro de sistemas de drenaje, evitando así la reducción de su capacidad y la necesidad de costosos mantenimientos y revisiones periódicas.

Por otro lado, con respecto al tema de filtrado en relación con el material RCD estudiado, se tiene para un geodren con tubería colectora el lecho filtrante puede conformarse de un solo material homogéneo, monocapa, o puede estar formado por varias capas de material homogéneo en cada capa. Incluso, puede ser una mezcla de materiales heterogéneos, para el caso del material RCD mixtos. Las propiedades de filtración se basan en la granulometría predominante del material a utilizar en el sistema.

4.3. Beneficios Operacionales y Constructivos

Los geodrenes con tubería colectora, al igual que los demás sistemas de drenaje sostenible, cuenta con una serie de actividades previas a su construcción y futura operación, estas actividades incluyen principalmente el diseño y caracterización del material a utilizar. Todo esto bajo la normativa vigente estipulada en el artículo 673 – 13 “Subdrenes con geotextil y material granular”, emitida por el Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013.

De acuerdo con lo anterior y con los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, se tiene que el material RCD en estudio cumple con las condiciones mínimas requeridas en dureza, durabilidad, limpieza y permeabilidad, razón por la cual, cuenta con las mismas condiciones frente al material granular convencional.

Los sistemas de geodrenes con tubería colectora poseen la desventaja de que pueden llegar a colmatarse con facilidad, esto en el caso que durante la etapa de diseño se hayan cometido errores al momento de definir las capas inferiores del drenaje. Este proceso se realiza con el fin de maximizar el tiempo de vida útil del sistema. (Departamento de Ingeniería de Geosistemas PAVCO, 2013)

Por otro lado, los geodrenes filtrantes se diseñan para vaciarse y re-airearse repetidamente de manera que el coeficiente de permeabilidad obtenido por el material RCD está en la capacidad de cumplir con esta condición de diseño.

Los geodrenes filtrantes son elementos que requieren de mantenimiento y que de colmatarse implican el retiro y recolocación del material de relleno, por lo que la implementación del material RCD en este tipo de sistema resulta beneficioso en la parte económica, ya que no implica grandes costos a la hora de reemplazarlo, en comparación con el material granular convencional.

Finalmente, es importante destacar la importancia de plantear varias alternativas en cuanto a el desarrollo de obras y estrategias de drenaje, analizando particularmente cada una de ellas y determinando si, para ese proyecto en específico, representa una gran ventaja operativa la utilización de materiales RCD en sistemas de tipo geodren.

4.4. Transferencia de Resultados

Para los resultados que se obtuvieron a partir del proceso de investigación desarrollado, en primera instancia, se llevara a cabo la publicación del presente trabajo de grado en el repositorio institucional de la Universidad Católica de Colombia, estando así, disponible para el fácil acceso de la comunidad educativa. Adicional a esto, se propone la participación como ponentes en el Congreso Internacional de Ingeniería Civil, que se llevará a cabo en el año 2020, con el fin de articular la investigación realizada con expertos en temas de construcción y materiales sostenibles.

Por otro lado, no se descarta la posibilidad de seguir presentando el proyecto y sus resultados en foros y congresos, los cuales permitan generar interés por futuros estudios de investigación en este campo.

Además de lo anterior, queda abierta la posibilidad de que, manteniendo el mismo enfoque de la presente investigación, se realicen otros trabajos y proyectos más a fondo o con otro tipo de parámetros, que permitan ampliar el conocimiento en el ámbito del uso y aplicación de materiales RCD.

4.5. Conclusiones

- Según los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, fue posible determinar que es factible la implementación de los tipos de material RCD analizados en sistemas tipo Geodren, siempre y cuando se tenga en cuenta:
 - La preparación y adecuación del material a utilizar, teniendo en cuenta una granulometría apropiada para el tipo de sistema, que, en este caso, se recomienda sea mayor a 3/8" y con bajo contenido de finos.
 - Un diseño previo del sistema, donde se especifiquen los requerimientos del mismo, en cuanto a caudal de transporte y velocidad de infiltración, ya que estos parámetros son fundamentales para la definición del material granular.
 - Un análisis local del proyecto, analizando la viabilidad y la relación costo-beneficio en cuanto al tipo de material granular a implementar en el sistema, buscando igualmente, causar el menor impacto ambiental posible.
- El material RCD compuesto por concretos, morteros y gravas presento una mejor resistencia frente al desgaste, mientras que el material RCD mixto (Gravas, ladrillo, cerámicos, etc.) presento mejores significativas en cuanto a características de absorción.

Todo lo anterior es debido a la composición y tipología de los materiales que componen cada tipo de material RCD, por lo que es muy importante realizar una caracterización adecuada del material si se desea implementar en cualquier tipo de obra, estructura o sistema.

- Para el caso de ambos materiales fue posible identificar que, luego de procesos adecuados de lavado y clasificación, es muy poco el contenido de partículas finas y livianas que puedan ocasionar problemas de colmatación u obstrucción de las tuberías de conducción de los sistemas de tipo Geodren, evidenciando que el material es óptimo para dicha utilización.
- Según las propiedades analizadas, es posible determinar que el material RCD tiene un gran potencial de aprovechamiento, abriendo la posibilidad de que sea ampliamente estudiado en otros campos y ámbitos, reduciendo así el impacto ambiental generado por la explotación de materiales pétreos.

También, es importante aclarar que se deben desarrollar sistemas más óptimos de recolección, tratamiento y clasificación de este tipo de materiales, debido a que esto mejorará el proceso de reutilización de los mismos a la vez que fomentará la búsqueda e investigación de más aplicaciones en el ámbito de la ingeniería.

- Debido a las características propias de un sistema de geo drenaje, se tiene que estos presentan menores tiempos de ejecución, un ahorro económico y tienen menor impacto ambiental. Es por esto que, implementado los materiales RCD, se logrará reducir aún más dicho impacto, y de esta forma convertir a este sistema, aún más, en una de las mejores alternativas en cuanto a sistemas de drenajes sostenible.

4.6. Recomendaciones

Debido a que las condiciones analizadas durante la investigación se desarrollaron con toda la rigurosidad y exigencia de ensayos de laboratorio en ambientes controlados, para la aplicación y posible utilización de cualquiera de los dos tipos de materiales RCD analizados en sistemas de drenaje tipo Geodren, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Para poder implementar cualquiera de los dos tipos de material RCD en sistemas de tipo geodren o similares a modo de material granular, se deben considerar anticipadamente algunos otros aspectos de diseño, tales como el caudal que transportara el geodren y el tiempo de infiltración que se desea tener para la evacuación de dicho caudal.

Lo anterior debido a de que, a pesar de que los materiales RCD presentaron buenas características en general que favorecen su aplicación en este tipo de sistemas, es necesario corroborar que cumplan a cabalidad los requerimientos de la obra en la que sean implementados.

- ✓ Para la correcta aplicación dentro de estos sistemas, y evitando las posibles afectaciones climáticas o antrópicas, es recomendable se recubra el material de relleno RCD con algún tipo de geotextil no tejido o similar, que brinde un mayor tiempo de servicio y evite que el material se deteriore a causa de afectaciones como la oxidación o la degradación del agregado, cabe resaltar que estas medidas también favorecen a la disminución del desgaste del material y favorecen su conservación.
- ✓ El material utilizado en sistemas de tipo Geodren debe ser capaz de resistir al desgaste y desleimiento de forma óptima, por lo que se deben analizar dichas propiedades, con la salvedad de que si el material presenta un tamaño granulométrico que no evidencie mayoritariamente un gran contenido de arenas o finos, es posible determinar su resistencia al desgaste a partir del ensayo de desgaste en máquina de los ángeles (Esto debido a que las variaciones en el ensayo de desleimiento se dan en gran manera por la pérdida de material fino que se encuentre en la muestra) , ya que será este el que determinara si es factible su aplicabilidad.
- ✓ Según los resultados obtenidos para la totalidad de los ensayos, se definió que la granulometría óptima para la correcta aplicación del material RCD debe ser mayor a 3/8", en donde se deben buscar retirar las partículas finas del material en la mayor cantidad posible, debido a que el tamaño de partículas está altamente relacionado con la velocidad de infiltración que puede desarrollar el material.

- ✓ Para obtener el mayor beneficio de cualquiera de los tipos de material RCD existentes, es necesario desarrollar procesos exhaustivos de selección, preparación y adecuación del mismo, buscando que este cumpla con la normatividad vigente de la obra en la cual desee ser implementado, en este caso, se hace énfasis en la selección del material, evitando que este contenga partículas orgánicas, en su lavado, buscando retirar impurezas y/o elementos no deseados, y finalmente su tamizado, en pro de obtener la granulometría deseada y retirar la mayor cantidad de partículas finas que no se requieren para este tipo de sistemas.
- ✓ Un factor a tener en cuenta en este tipo de sistemas es la relación de vacíos del material RCD, ya que a medida que aumenta el grado de compactación de un material, esto induce a una disminución en la relación de vacíos, lo que a su vez causa que la permeabilidad disminuya (Camargo, 2015).

Por lo anterior, es necesario comprobar que la compactación que se desarrolle en campo no afecte negativamente las propiedades del material granular, ya que esto puede afectar la efectividad del sistema de drenaje.

- ✓ Los materiales RCD, aplicados a sistemas de subdrenaje, pueden acarrear beneficios tanto operacionales como operativos, como bien se ha ido mencionando a lo largo de la investigación, ya que permiten utilizar un material con unas grandes cualidades y capacidades, sin necesidad de causar una gran afectación al medio ambiente. Es por esto que, para desarrollar un proyecto de diseño de sistemas de drenaje, se recomienda incluir el uso de este material dentro de alguna de las alternativas a evaluar, analizando sus costos, factibilidad, diseño y construcción, y verificando si, comparado con los sistemas de drenaje tradicionales, podría traer beneficios adicionales de implementarse.

5. REFERENCIAS

- Aguilar, M., Chuquillanqui, B., Lopez, J., Pariona, J., & Tello, J. (2014). Gravedad Específica de Sólidos. *UNCP*, 1, 12.
- Aldana, J., & Serpell, A. (2012). Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: Un metaanálisis. *Revista de La Construcción*, 11(2), 4–16.
- Aliaga, A., Antonio, M., Astopilco, A., Pierre, J., Vilca, P., Elizabeth, S., ... Oswaldo, M. (2015). *Informe de la sustentación de tesis de sobre el estudio de las propiedades de resistencia a la compresión, absorción, absorción máxima y succión de los ladrillos de arcilla artesanales de acuerdo a la altura de cocción en el horno de las ladrilleras del C. 32*.
- Bayona, A. (2011). Marco Normativo del Drenaje Urbano en Colombia. Retrieved from <https://es.slideshare.net/andesco/1-drenajes-marconormativodnp>
- Bogota. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible. *Secretaría Distrital de Bogotá*, 86. Retrieved from <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>
- Bogotá. (2014). *Decreto 528 2014 Sistema Drenaje sostenible-bogota* (p. 22). p. 22. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Camargo, D. C. (2015). *Diseño de un sistema para la obención de la permeabilidad de suelos con cámara horizontal, orientado a pruebas de laboratorio*. Universidad Católica de Colombia.
- Candelo, G. (2013). *Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible "SUDS" como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira*. 2(SGEM2016 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-16-2 / ISSN 1314-2704), 1–39.
- CAR. (2018). La creación de la CAR: Ley 3a. de 1961. Retrieved from <https://www.car.gov.co/vercontenido/2#>
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2015). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura*, 17(38), 121. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09>
- Castro-Fresno, D., Rodríguez-Bayón, J., Rodríguez-Hernández, J., & Ballester-Muñoz, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5), 255–260.
- Clavijo, S., Vera, A., & Vera, N. (2013). La inversión en infraestructura en Colombia 2012-2020. *Bancoldex*, 14. Retrieved from

[http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion en infraestructura Colombia 2013-2020.pdf](http://www.cvc.com.ve/docs/2016219124559Inversion%20en%20infraestructura%20Colombia%202013-2020.pdf)

- Clímaco, G. O. (2014). *Absorción de la grava* (p. 6). p. 6. México: Academia.edu.
- Congreso de la República de Colombia. *Ley 142 “Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.”*, (1994).
- Congreso de la República de Colombia. *Ley 388 “ Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones.”*, (1997).
- De la Cruz, E., Culque, R., Yajahuanca, A., & Olortegui, B. (2015). *Resistencia del agregado grueso al desgaste*. 1, 12.
- Departamento de Ingeniería de Geosistemas PAVCO. (2013). *Sistemas De Subdrenaje*. Retrieved from www.geosoftpavco.pe
- Documento Básico Se-C (Seguridad estructural Cimientos)*. (2008).
- Eia, R. (2016). *Resíduos De La Construcción : Construction Waste : an Option for Soil Recovery Resíduos De Construção : Uma Opção Para a Recuperação Dos Solos*. 55–60.
- Escobar Velásquez, O., Díaz González, J., & Olivo Martínez, E. (2009). *Aplicación de los geosintéticos en el drenaje para carreteras*. 459. Retrieved from http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2100/1/Aplicacion_de_los_geosinteticos_en_la_estructura_de_los_pavimentos_y_en_obras_de_drenaje_para_carreteras.pdf
- FAO. (2009). *Materiales para sistemas de drenaje subterráneo*. 189.
- Fong, W. F. K., Yeung, J. S. K., & Poon, C. S. (2004). Hong Kong experience of using recycled aggregates from construction and demolition materials in ready mix concrete. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 267–275.
- Geogr, S. (2011). *Ciclo hidrológico*.
- Geomatrix. (2017). Paso a paso: Construcción de Sistemas de Subdrenaje con Geodrenes Permadrain. Retrieved from Geomatrix website: <http://blog.geomatrix.co/paso-a-paso-construcción-de-sistemas-de-subdrenaje-con-geodrenes-permadrain>
- Geosistemas PAVCO. (2014). *Sistemas de Subdrenaje*. Bogotá.
- González, M. (2010). Contenido del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico. Retrieved from <https://es.slideshare.net/napoleon1/ras-2000-presentacion>
- Guarin, G. (2017). Guía Técnica Ambiental para la Formulación del Plan de Gestión de RCD en Obra.

- Huang, W. L., Lin, D. H., Chang, N. Bin, & Lin, K. S. (2002). Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources, Conservation and Recycling*, 37(1), 23–37. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00053-8)
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras* (J. Gálvez & A. Mora, Eds.).
- Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., Shaffer, P., Wallingford, H. R., ... Woods Ballard, B. (2015). The SUDS manual. In *Ciria C753*. <https://doi.org/London C697>
- Lage, I. M., Herrero, C. V., Fonteboa, B. G., & Abella, F. M. (2010). Generation of recycled aggregates and technical requirements for some applications | Generación de los áridos reciclados y requisitos técnicos para algunas aplicaciones. *DYNA (Colombia)*, 77(161).
- Lauritzen, E. K. (2004). Recycling concrete - An overview of development and challenges. *PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, (1), 9–11. Retrieved from http://congreso.cimne.com/rilem04/frontal/Papers.htm%5Cnhttp://mmsconfere ncing.com/nanoc/pdf/034-ID_193.pdf
- Maat. (2017). ¿Cómo cumplir con la Resolución 472 de 2017 en los proyectos de construcción en Colombia? Retrieved from <http://www.maat.com.co/cumplir-la-resolucion-472-2017-proyectos-construccion-colombia/>
- Mália, M., De Brito, J., Pinheiro, M. D., & Bravo, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. *Waste Management and Research*, 31(3), 241–255. <https://doi.org/10.1177/0734242X12471707>
- Mateus, G., Jiménez, N., & Moreno, M. (2014). *Análisis de factibilidad para la implementación de un Geodren en el Barrio Ciudad Alsacia*. 1, 50.
- Mejía, E., Giraldo, J., & Martínez, L. (2013). Residuos de Construcción y Demolición: Revisión Sobre su Composición, Impactos y Gestión. *Cintex*, 18, 105–130.
- Miguel, M., Munguía, C., & Moreno, S. C. (2015). *Normativa y especificación para proyectos con ingeniería de geo-soluciones y geosintéticos . Maestría : Proyectos y Edificación Sustentables* . 1–8.
- Ministerio de Ambiente. (2017). Acuíferos.
- Ministerio de Salud. *Resolución 2309 " Por la cual se dictan las normas para el cumplimiento del contenido del Título III de la Parte 4 del Libro 1 del Decreto - Ley número 2811 de 1974 y de los Títulos I, II y XI de la Ley 9 de 1979, en cuanto a Residuos Especiales*. , (1986).
- Ng, S., & Engelsen, C. J. (2018). 8 – Construction and demolition wastes. In *Waste*

and Supplementary Cementitious Materials in Concrete.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00008-0>

- Niño, A. O. (1991). *Drenaje Y Subdrenaje En Vias Terrestres*. (18), 151–154.
- Oldecop, A. (2001). *Comportamiento de Materiales Granulares a Bajas y Altas Tensiones*. 40.
- Ordoñez, J. J., & Kraft, K. (2011). Ciclo Hidrológico. In *Ciclo Hidrológico* (p. 44).
- Özalp, F., Yilmaz, H. D., Kara, M., Kaya, Ö., & Şahin, A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Padial, J. (2017). ¿Qué es la escorrentía urbana? Retrieved June 16, 2019, from Curiosoando website: <https://curiosoando.com/que-es-la-escorrentia-urbana>
- Palmeira, E. (2018). *Aplicaciones de los Geosintéticos en Obras Geotécnicas y Geoambientales Geosintéticos Geotextiles*. Retrieved from https://www.google.com.pe/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://civil.unian.edu.co/images/2017-18/ICYA-4516_Tecnolog%25C3%25ADa_de_los_Geosint%25C3%25A9ticos_2017-18.pdf&ved=0ahUKEwj818bMspTbAhUixVkkKHQF-AHsQFghiMA8&usq=AOvVaw3KSAN0pDtzZx9hIkFc-7tK
- Perales-Momparler, S., Andrés-Doménech, I., & Escalante, E. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la hidrogeología urbana. *Grupo TRAGSA Madrid. IX Simposio de Hidrogeología. AIH. Elche, Valencia.*, 1–12. Retrieved from <http://www.dina-mar.es/pdf/6-if-suds-2.pdf>
- Porras, Á. C. (2013). Determination of Physical-Chemical Properties of the Materials Added in Sample Debris in the City of Bogotá Dc. *Revista Ingenierías ...*, 12(22), 45–58. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242013000100005&script=sci_arttext&tlng=en
- Rahman, M. A., Imteaz, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., & Disfani, M. M. (2015). Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 90, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>
- Ramirez, C., & Pineda, M. (Ministerio D. A. Y. D. S. (2017). Resolución No. 0472. *Resolución No. 0472*, p. 11. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>
- Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled

- construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- Republica de Colombia. *Decreto 2811 "Por el cual se dicat el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente.* , (1974).
- Robinson, G. R., Menzie, W. D., & Hyun, H. (2004). Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 275–294. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.006>
- Rocha, S. (2013). Practica 12: Resistencia a la Abrasión o desgaste de los agregados. Retrieved from <http://www.construaprende.com/docs/lab/330-practica-resistencia-abrasion-agregados>
- Saberian, M., & Li, J. (2018). Investigation of the mechanical properties and carbonation of construction and demolition materials together with rubber. *Journal of Cleaner Production*, 202, 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.183>
- Sánchez, Á. (2016). RCD: Residuos de Construcción y Demolición. Retrieved June 16, 2019, from Ángel Sánchez Inocencio - Ingeniero de Edificación website: <https://angelsinocencio.com/rcd-residuos-de-construccion-y-demolicion/>
- Sara Perales Momparrer, I. A.-D. (2002). *Los sistemas urbanos de dreanje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia.* (54), 68–69. Retrieved from <http://ci.nii.ac.jp/naid/110004557765/>
- Sarmiento, L. (2012). *Marco Normativo General Internacional y Local para la Gestión de los Residuos de la Construcción, Demolición y Escombros.* 26. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Sora, M. (2016). Metodología para la gestión ambiental de RCD en ciudades de América Latina. In *Elaboración de un modelo metodológico de gestión de residuos de la construcción en América Latina. Prueba piloto en Bogotá* (p. 32). Bogotá: Fundación ENT.
- Suarez, J. (2008). Obras de drenaje y subdrenaje. *Deslizamientos Tecnicas de Remediación*, 2, 47–106.
- Winter, M. G., & Henderson, C. (2003). Estimates of the quantities of recycled aggregates in Scotland. *Engineering Geology*, 70(3–4), 205–215. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00090-5)