

ANÁLISIS TÉCNICO DE LA VIABILIDAD E IMPACTOS DE ZONAS DE BIORETENCIÓN  
CON GEOTEXTILES Y POLÍMEROS RECICLADOS PARA LA GESTIÓN DE AGUAS  
PLUVIALES EN EL TRAMO VIAL CHIMITA–LA CEMENTO.



WILMER BENAVIDES PARDO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

ANÁLISIS TÉCNICO DE LA VIABILIDAD E IMPACTOS DE ZONAS DE  
BIORETENCIÓN CON GEOTEXTILES Y POLÍMEROS RECICLADOS PARA LA  
GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL TRAMO VIAL CHIMITA–LA CEMENTO.

WILMER BENAVIDES PARDO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Mg. LIZETH LUCERO DÍAZ SUESCÚN

Especialista en Recursos Hídricos

Magíster MBA.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTES GALLEGU, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Mg. Luis Fernando DÍAZ CRUZ**

Decano de la Facultad de ingeniería civil

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, fuente inagotable de fortaleza y guía, por permitirme culminar este proceso académico y bendecir cada paso de este trayecto.

A mis padres, cuya entrega, sacrificio y amor incondicional han sido el pilar sobre el que se ha edificado esta meta. Gracias por enseñarme con su ejemplo la importancia del esfuerzo, la constancia y la fe en mis propias capacidades.

Una mención muy especial para mi querida nona, quien, aunque nos dejó este año, permaneció a mi lado con su apoyo y aliento constantes. Su recuerdo y sus sabias palabras me acompañaron en los momentos de duda y me impulsaron a seguir adelante.

Extiendo mi gratitud a la Ing Lizeth Lucero Díaz Suescún, directora de monografía, por su paciencia, su rigurosa orientación técnica y su valioso acompañamiento durante toda la elaboración de este trabajo. Sus recomendaciones y observaciones fueron fundamentales para enriquecer este estudio.

Finalmente, agradezco a la Universidad Santo Tomás, a la Facultad de Ingeniería Civil, y a todos los docentes y mentores que, con su conocimiento, entrega y sabiduría, han contribuido de manera decisiva a mi formación profesional. Cada clase, cada consejo y cada diálogo académico han dejado en mí una huella imborrable.

## Contenido

|                                                                                         | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                                                           | 10   |
| Abstract.....                                                                           | 11   |
| Introducción.....                                                                       | 12   |
| 1. Planteamiento del Problema.....                                                      | 13   |
| 2. Justificación.....                                                                   | 15   |
| 3. Objetivos .....                                                                      | 16   |
| 3.1. Objetivo General.....                                                              | 16   |
| 3.2. Objetivos Específicos.....                                                         | 16   |
| 4. Marco Teórico .....                                                                  | 17   |
| 4.1. Definición y objetivos de los SuDS.....                                            | 17   |
| 4.2. Gestión de aguas pluviales en SUDS.....                                            | 18   |
| 4.3. Procesos de control de la cantidad de escorrentía.....                             | 20   |
| 4.4. Clasificación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible .....                  | 20   |
| 4.5. Zonas de biorretención.....                                                        | 21   |
| 5. Estado del Arte .....                                                                | 23   |
| 5.1. Bogotá: Proyectos y Normativa Local.....                                           | 23   |
| 5.2. Medellín y el Valle de Aburrá: Coordinación Interinstitucional .....               | 24   |
| 5.3. Estudios de Caso en Otras Ciudades Colombianas.....                                | 24   |
| 5.4. Proyectos Piloto e Investigación en Drenaje Sostenible.....                        | 25   |
| 5.5. Normativa para la Implementación de SuDS en Colombia .....                         | 26   |
| 5.5.1 Resolución 0799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.....      | 26   |
| 5.5.2 Política Nacional de Cambio Climático y Gestión Integral del Recurso Hídrico..... | 26   |
| 5.5.3 Guía Técnica EAAB–Uniandes de SuDS .....                                          | 27   |
| 5.5.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....                                     | 28   |
| 5.5.5 Normativa y Regulación Internacional .....                                        | 28   |
| 6. Metodología.....                                                                     | 29   |
| 6.1. Tipo de investigación.....                                                         | 29   |
| 6.2. Enfoque metodológico .....                                                         | 30   |
| 6.3. Estrategia de recolección de datos .....                                           | 31   |

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.1 | Fuentes de datos .....                                                            | 31 |
| 6.3.2 | Criterios de selección de fuentes.....                                            | 32 |
| 6.3.3 | Herramientas de recolección.....                                                  | 32 |
| 6.4.  | Análisis e interpretación de datos y evaluación de impactos.....                  | 33 |
| 7.    | Adaptación metodológica para la selección de sitios SuDS.....                     | 34 |
| 7.1.  | Aplicación al tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá .....                   | 34 |
| 7.1.1 | Delimitación del área de estudio.....                                             | 34 |
| 7.1.2 | Alcance y viabilidad de SuDS .....                                                | 35 |
| 7.1.3 | Recopilación de información técnica y verificación de restricciones.....          | 36 |
| 7.1.4 | Priorización del área y validación estratégica.....                               | 37 |
| 7.1.5 | Conclusión del proceso de selección .....                                         | 37 |
| 8.    | Análisis físico-hidrológico del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá ..... | 38 |
| 8.1.  | Caracterización del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá.....              | 38 |
| 8.2.  | Caracterización del Suelo en el Área de Estudio .....                             | 39 |
| 8.2.1 | Contexto Geológico y Litológico.....                                              | 40 |
| 8.2.2 | Capacidad mínima de infiltración.....                                             | 41 |
| 8.2.3 | Distancia al Nivel Freático.....                                                  | 42 |
| 8.2.4 | Pendiente del Terreno .....                                                       | 44 |
| 8.3.  | Profundidad de lluvia (hp) según curvas IDF–Estación Llano Grande .....           | 47 |
| 9.    | Análisis técnico de zonas de biorretención .....                                  | 50 |
| 9.1.  | Descripción general y fundamentos hidrológicos.....                               | 50 |
| 9.2.  | Diseño conceptual hidrológico .....                                               | 52 |
| 9.2.1 | Área de drenaje .....                                                             | 53 |
| 9.2.2 | Primera zona de bio-retención .....                                               | 53 |
| 9.2.3 | Segunda zona de bio-retención .....                                               | 54 |
| 9.2.4 | Coefficiente de escorrentía.....                                                  | 56 |
| 9.2.5 | Volumen de calidad (Vc) para zonas de bio-retención.....                          | 56 |
| 9.3.  | Parámetros de diseño y resultados del dimensionamiento.....                       | 57 |
| 9.4.  | Viabilidad técnica y ambiental de polímeros reciclados en el sustrato .....       | 59 |
| 9.4.1 | Análisis comparativo del sustrato modificado con polímeros reciclados .....       | 60 |
| 9.5.  | Integración de geotextiles como capa filtrante .....                              | 63 |

|       |                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.5.1 | Justificación del uso de geotextiles.....                                       | 63 |
| 9.5.2 | Desempeño y cumplimiento normativo de geotextiles no tejidos en SuDS .....      | 64 |
| 9.6.  | Geotextiles comerciales aplicables como capas funcionales en bio-retención..... | 67 |
| 9.6.1 | Geosintético IMPERTEX como forro impermeable.....                               | 68 |
| 9.6.2 | Geotextil no tejido Fibertex F 32G como tela separadora .....                   | 70 |
| 9.6.3 | Aplicabilidad técnica en el tramo vial Chimitá – La Cemento .....               | 72 |
| 10.   | Evaluación cualitativa de impactos.....                                         | 74 |
| 10.1. | Evaluación cualitativa del impacto ambiental .....                              | 74 |
| 10.2. | Evaluación cualitativa del impacto económico.....                               | 76 |
| 10.3. | Evaluación cualitativa del impacto social.....                                  | 80 |
| 10.4. | Análisis integral de viabilidad .....                                           | 82 |
| 11.   | Conclusiones .....                                                              | 84 |
| 12.   | Recomendaciones .....                                                           | 86 |
|       | Referencias bibliográficas .....                                                | 87 |

## Lista de Tablas

Pág.

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Objetivos del drenaje sostenible según el concepto de tres vías.....</i>              | 18 |
| <b>Tabla 2</b> <i>Procesos de control de escorrentía.....</i>                                           | 20 |
| <b>Tabla 3</b> <i>Clasificación de las tipologías SuDS según categoría funcional .....</i>              | 21 |
| <b>Tabla 4</b> <i>Restricciones recomendadas para la tipología de zonas de biorretención .....</i>      | 36 |
| <b>Tabla 5</b> <i>Clasificación de los grupos hidrológicos de suelo según Horton (1933) .....</i>       | 42 |
| <b>Tabla 6</b> <i>Profundidad del nivel freático en puntos representativos del área de estudio.....</i> | 44 |
| <b>Tabla 7</b> <i>Modelación de curvas IDF para la estación Llano Grande .....</i>                      | 49 |
| <b>Tabla 8</b> <i>Profundidad de lluvia estimada para la estación Llano Grande.....</i>                 | 49 |
| <b>Tabla 9</b> <i>Áreas de aporte – primer tren de tratamiento con zonas de bio-retención .....</i>     | 53 |
| <b>Tabla 10</b> <i>Áreas de aporte – segundo tren de tratamiento con zonas de bio-retención .....</i>   | 55 |
| <b>Tabla 11</b> <i>Volumen de calidad (Vc) para el primer tren de zona de biorretención .....</i>       | 57 |
| <b>Tabla 12</b> <i>Volumen de calidad (Vc) para el segundo tren de zona de biorretención .....</i>      | 57 |
| <b>Tabla 13</b> <i>Parámetros de diseño para el dimensionamiento de zonas de biorretención .....</i>    | 58 |
| <b>Tabla 14</b> <i>Resultados del dimensionamiento para las zonas de bio-retención .....</i>            | 59 |
| <b>Tabla 15</b> <i>Comparación de criterios técnicos del sustrato en zonas de bio-retención .....</i>   | 61 |
| <b>Tabla 16</b> <i>Geotextiles NW1–3 vs. Requisitos Manual Denver 2010.....</i>                         | 66 |
| <b>Tabla 17</b> <i>Propiedades técnicas relevantes del geosintético Impertex.....</i>                   | 68 |
| <b>Tabla 18</b> <i>Geosintético IMPERTEX vs. Criterios del Manual Denver 2010.....</i>                  | 69 |
| <b>Tabla 19</b> <i>Propiedades técnicas del geotextil Fibertex F 32G.....</i>                           | 70 |
| <b>Tabla 20</b> <i>Fibertex F 32G vs. Criterios del Manual Denver 2010 .....</i>                        | 71 |
| <b>Tabla 21</b> <i>Aplicabilidad técnica de IMPERTEX y Fibertex F 32G en bio-retención.....</i>         | 73 |
| <b>Tabla 22</b> <i>Impactos ambientales asociados a zonas de bio-retención .....</i>                    | 76 |
| <b>Tabla 23</b> <i>Impactos económicos asociados a zonas de bio-retención .....</i>                     | 79 |
| <b>Tabla 24</b> <i>Impactos sociales asociados a zonas de biorretención.....</i>                        | 81 |
| <b>Tabla 25</b> <i>Análisis técnico-sostenible de materiales filtrantes .....</i>                       | 83 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                         | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Figura 1.</b> <i>Vista de la vía anegada en Chimita–La Cemento tras lluvias intensas</i> .....       | 13   |
| <b>Figura 2.</b> <i>Tren de gestión SuDS</i> .....                                                      | 19   |
| <b>Figura 3.</b> <i>Área de estudio delimitada: Tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá</i> .....   | 35   |
| <b>Figura 4.</b> <i>Tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá</i> .....                               | 39   |
| <b>Figura 5.</b> <i>Unidades geológicas Q-al y Q-ca en el área de estudio.</i> .....                    | 40   |
| <b>Figura 6.</b> <i>Profundidad freática en el área metropolitana de Bucaramanga</i> .....              | 43   |
| <b>Figura 7.</b> <i>Perfil longitudinal del tramo vial N-S (CDA Revitec → Terpel EDS Chimitá)</i> ..... | 45   |
| <b>Figura 8.</b> <i>Perfil longitudinal del tramo vial S-N (Terpel EDS Chimitá → CDA Revitec)</i> ..... | 46   |
| <b>Figura 9.</b> <i>Curvas IDF generadas para la estación Llano Grande (Girón – Santander)</i> .....    | 48   |
| <b>Figura 10.</b> <i>Zonas de biorretención laterales a una avenida</i> .....                           | 51   |
| <b>Figura 11.</b> <i>Planta esquemática de zonas de biorretención</i> .....                             | 52   |
| <b>Figura 12.</b> <i>Áreas de drenaje – zona potencial primer tren de bio-retención</i> .....           | 54   |
| <b>Figura 13.</b> <i>Áreas de drenaje – zona potencial segundo de bio-retención</i> .....               | 55   |

## Resumen

Esta monografía analiza la viabilidad técnica de implementar zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados para la gestión de aguas pluviales en el tramo vial Chimita–La Cemento. El estudio se sustenta en la caracterización físico-hidrológica del sitio, el diseño y dimensionamiento hidrológico conceptualizado conforme a guías nacionales e internacionales, el análisis comparativo de los materiales propuestos y la evaluación cualitativa de sus impactos ambientales, económicos y sociales. Los hallazgos indican que estas soluciones verdes podrían optimizar el manejo de escorrentía y mejorar la calidad del agua, aliviando simultáneamente la carga sobre la infraestructura de drenaje convencional y reduciendo los costos asociados a inundaciones y tratamientos aguas abajo. Finalmente, se enfatiza la necesidad de incorporar los SuDS desde las fases iniciales del diseño vial y de avanzar hacia validaciones piloto y estudios de ciclo de vida completos para consolidar sus beneficios en contextos similares.

***Palabras Clave:*** Bio-retención; geotextiles; polímeros reciclados; drenaje urbano sostenible; gestión de aguas pluviales

### **Abstract**

This monograph analyzes the technical feasibility of implementing bioretention zones incorporating geotextiles and recycled polymers for stormwater management along the Chimita–La Cemento road segment, through a theoretical approach grounded in the site’s physico-hydrological characterization, hydrologic design predimensioning, and qualitative assessment of environmental, economic, and social impacts. Findings indicate that such green infrastructure could significantly improve runoff control and water quality in the study area. The environmental and economic benefits of SuDS are highlighted, including reduced load on conventional sewer systems and lower costs for flood management and water treatment. The importance of integrating these systems during early road design stages is underscored, and future work should include pilot validations and comprehensive life-cycle assessments to consolidate their advantages in similar contexts.

**Keywords:** Bioretention; geotextiles; recycled polymers; sustainable urban drainage; stormwater management

## Introducción

La gestión de aguas pluviales en zonas urbanas se enfrenta hoy a desafíos crecientes debido al aumento de superficies impermeables y a fenómenos meteorológicos extremos. En el tramo vial Chimita–La Cemento, que conecta Girón con el norte de Bucaramanga, la capacidad de la red de sumideros existente ha resultado insuficiente para evacuar el agua de lluvia, lo que ha generado frecuentes anegamientos, congestión vial y riesgos para la seguridad de los usuarios. Además, el incremento de superficies impermeables y la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical han agravado los episodios de inundación y la obstrucción de la red de sumideros existentes, poniendo en riesgo la movilidad y la seguridad vial.

Frente a estas limitaciones de la “infraestructura gris” convencional, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) proponen infraestructuras verdes que replican procesos naturales de infiltración, retención y tratamiento del agua de lluvia. En particular, las zonas de biorretención—compuestas por depresiones vegetadas, sustratos permeables y capas filtrantes—han demostrado eficacia en reducir volúmenes de escorrentía y mejorar la calidad del agua. No obstante, su aplicación en el contexto vial de Chimita–La Cemento, potenciada con geotextiles y polímeros reciclados, carece aún de un análisis teórico-técnico.

Esta monografía aborda ese desafío, evaluando la viabilidad técnica de implementar zonas de biorretención mejoradas con geotextiles y polímeros reciclados en el tramo Chimita–La Cemento. A través de un enfoque teórico sustentado en la caracterización físico-hidrológica del sitio, el predimensionamiento hidrológico y la evaluación cualitativa de impactos ambientales, económicos y sociales, se aportará evidencia para guiar decisiones de infraestructura sostenible. De este modo, el estudio contribuye a la resiliencia urbana y al diseño vial con criterios verdes, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y economía circular en el país.

## 1. Planteamiento del Problema

El tramo vial Chimita–La Cemento, ubicado en la ruta nacional 45ª ST-08 que conecta el municipio de Girón con el norte de Bucaramanga, presenta serios desafíos de infraestructura y gestión de aguas pluviales, exacerbados por el crecimiento industrial y la expansión urbana. Este corredor de aproximadamente 1,0 km, entre la CDA Revitec y Terpel Planta Chimita, sufre inundaciones frecuentes generando congestión y represamientos durante la temporada de lluvias, que afectan la movilidad y la seguridad vial. Por otra parte, estudios de la red hidroclimatológica de la CDMB documentados por Angarita Peña (2017) indican que el área metropolitana de Bucaramanga se encuentra bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual genera un régimen bimodal con picos de precipitación en abril-mayo y octubre-noviembre, intensificando las lluvias entre abril y noviembre e incrementando significativamente el volumen de escorrentía superficial en la zona urbana. Asimismo, el desplazamiento estacional de la ZCIT, que avanza al norte en abril y retorna al sur a partir de septiembre, constituye el factor macro climático que explica estos dos picos pluviométricos y su efecto sobre la escorrentía superficial (Municipio de Bucaramanga. Secretaría de Planeación, 2014).

Reportes de prensa local señalan que estos episodios provocan anegamientos que cubren parte de la calzada llegando en puntos críticos a aproximadamente 30-40 cm de altura, lo que paraliza la circulación vehicular, obliga a desvíos masivos, provoca la caída de árboles sobre la vía y el varado de vehículos con daños mecánicos.

**Figura 1.** Vista de la vía anegada en Chimita–La Cemento tras lluvias intensas



*Nota.* Adaptado de El calvario de los conductores por las inundaciones en Girón. (Caracol Radio, 2024) y En Girón, Santander, las autoridades atendieron varias emergencias por lluvias (RCN Radio, 2024).

Además de la influencia climática, la alta impermeabilidad de la cuenca urbana —con pavimentos asfálticos y aceras rígidas que reducen la infiltración natural— agrava la sobrecarga del sistema de drenaje (Nanía & Gómez Valentín, 2006). El Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Girón, a su vez, clasifica este corredor como de vulnerabilidad alta frente a inundaciones pluviales, debido a la insuficiencia de la red de sumideros y a la topografía inclinada del terreno. Bajo estas condiciones, los sumideros tipo bordillo disponibles a lo largo del tramo se colmatan rápidamente con sedimentos, lo que reduce drásticamente su eficacia y dispara los costos de limpieza y mantenimiento ante cada episodio de lluvia intensa. Este esquema convencional resulta claramente insuficiente para afrontar tanto las precipitaciones extremas como la creciente carga sedimentaria. Por ende, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS), en particular las zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados, emergen como una solución capaz de promover la infiltración y retención de sólidos, adsorber nutrientes y metales pesados, mitigar los picos de caudal y, simultáneamente, reducir los costos operativos y de mantenimiento (Palacio & Rodríguez, 2020).

En este contexto, el presente estudio se propone analizar teóricamente la viabilidad técnica de implementar zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados en el tramo Chimita–La Cemento, sustentando su diseño hidrológico, predimensionamiento y evaluación cualitativa de impactos ambientales, económicos y sociales, con el fin de proponer una solución más sostenible y eficiente que la infraestructura convencional.

## 2. Justificación

La persistencia de inundaciones en el tramo Chimita–La Cemento ha puesto en evidencia la ineficiencia de la infraestructura de drenaje existente. De acuerdo con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) de EMPAS, los sumideros tipo bordillo del corredor no están adecuadamente conectados a las redes principales, lo que favorece su colmatado recurrente con sedimentos y lodo, provocando el estancamiento de aguas pluviales y afectando la operatividad vial. Paralelamente, el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Girón documenta una expansión urbana acelerada en la Vía 45AST y sus alrededores, donde nuevos desarrollos residenciales e industriales han elevado la cobertura rígida del suelo —pavimentos asfálticos y aceras de concreto—, reduciendo la infiltración natural y aumentando la escorrentía superficial. El Mapa de Usos del Suelo de Girón confirma que estas zonas de crecimiento concentran gran parte de la presión sobre la red de drenaje pluvial, generando un desequilibrio entre la demanda de evacuación y la capacidad instalada.

A nivel normativo, la Resolución 0799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio introduce la obligación de evaluar la viabilidad de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) en desarrollos que modifiquen la cobertura del suelo, con el fin de mitigar los efectos adversos de la impermeabilización y optimizar la gestión de aguas pluviales. No obstante, en Colombia todavía escasean investigaciones que integren de manera holística la caracterización físico-hidrológica local, el predimensionamiento teórico de infraestructuras verdes y la evaluación cualitativa de sus impactos ambientales, económicos y sociales. En este contexto, las zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados se perfilan como una alternativa sostenible alineada con la normativa y los principios de economía circular. El presente estudio llena el vacío de conocimiento al proponer un enfoque teórico-técnico integral que: Caracteriza las condiciones físicas e hidráulicas del tramo Chimita–La Cemento a partir de cartografía y datos oficiales, fundamenta el diseño y predimensionamiento de las biorretenciones conforme a guías internacionales y normativa nacional y evalúa cualitativamente los beneficios en términos de reducción de escorrentía, depuración de contaminantes y viabilidad económica y social.

De esta manera, se genera un marco de referencia robusto para futuros proyectos piloto y recomendaciones normativas, contribuyendo a mejorar la resiliencia y la gestión de aguas pluviales en Girón y municipios con características similares.

### **3. Objetivos**

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

Analizar la viabilidad técnica de implementar zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados para la gestión de aguas pluviales en el tramo vial Chimita–La Cemento, mediante un enfoque teórico que integre la caracterización físico-hidrológica, el diseño hidrológico, el análisis de materiales y la evaluación cualitativa de impactos ambientales, económicos y sociales.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las condiciones físicas, hidrológicas y urbanas del tramo Chimita–La Cemento para establecer los requisitos técnicos de diseño de zonas de biorretención.
- Conceptualizar el diseño hidrológico de las zonas de biorretención para el tramo Chimita–La Cemento, siguiendo la Guía EAAB–Uniandes y el Manual Denver, y considerando los parámetros hidráulicos, topográficos y pluviométricos del sitio.
- Analizar la viabilidad técnica de integrar geotextiles y polímeros reciclados en zonas de biorretención, mediante la comparación de resultados experimentales, desempeño de productos comerciales y requerimientos normativos.
- Evaluar cualitativamente los impactos ambientales, económicos y sociales de las zonas de biorretención a partir de evidencia bibliográfica nacional e internacional.
- Realizar un análisis integral de viabilidad para la implementación de zonas de biorretención en el tramo Chimita–La Cemento, integrando las condiciones de drenaje, el desempeño técnico de los materiales y los impactos evaluados.

## **4. Marco Teórico**

La expansión urbana y el desarrollo de infraestructura han llevado a un aumento significativo de superficies impermeables, alterando la morfología de las cuencas hidrográficas y los patrones naturales de escorrentía, lo que provoca una serie de problemas ambientales y urbanos. En este contexto, surgen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que son definidos como métodos alternativos para gestionar el agua de escorrentía superficial. Estos sistemas, a través de estrategias e infraestructuras complementarias, buscan replicar lo más fielmente posible el ciclo hidrológico natural, reduciendo los impactos negativos que las variaciones climáticas y la urbanización pueden tener sobre las características morfológicas de la cuenca y su comportamiento hidrológico. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & Departamento Nacional de Planeación, 2022). Este marco teórico explora las soluciones existentes, enfocándose particularmente en la biorretención y los geotextiles reciclados con polímeros, y proporciona una revisión basada en la literatura científica relevante. Este marco teórico explora cómo los SUDS se implementan como soluciones integrales para mitigar los problemas derivados de la expansión urbana, haciendo hincapié en la eficacia de tecnologías como la biorretención y el uso de geotextiles reciclados con polímeros.

### **4.1. Definición y objetivos de los SuDS**

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) surgieron como respuesta a la necesidad de gestionar el agua de lluvia en las ciudades de manera más eficaz y respetuosa con el medio ambiente. Tradicionalmente, el manejo de aguas pluviales en áreas urbanas se ha centrado en la rápida evacuación a través de sistemas de alcantarillado, lo que con frecuencia sobrecarga estos conductos, provocando inundaciones y contaminación de los cuerpos receptores (Fletcher et al., 2015). Por el contrario, los SuDS buscan replicar los procesos naturales del ciclo hidrológico, promoviendo la infiltración, el almacenamiento y la evapotranspiración, en lugar de su simple descarga rápida (Woods-Ballard et al., 2015).

En Colombia, los SuDS se describen como un conjunto de soluciones aplicadas al drenaje urbano con el objetivo de retener el agua de lluvia en el lugar donde se genera durante el mayor tiempo posible, minimizando riesgos de inundación y mitigando los impactos en la calidad y

cantidad de la escorrentía (Ministerio de Vivienda, 2017). Asimismo, contribuyen a la protección de la infraestructura y de las aguas subterráneas, integran el agua de lluvia al paisaje urbano y reducen la carga sobre las plantas de tratamiento, ayudando a paliar la insuficiencia hidráulica de las redes convencionales.

Según el tipo de beneficio deseado, los SuDS pueden enfocarse en controlar la cantidad de agua, mejorar su calidad, ofrecer espacios recreativos o de confort, conservar la biodiversidad y promover el reúso de aguas pluviales (Woods-Ballard et al., 2015). La **Tabla 1** presenta los tres objetivos fundamentales del drenaje sostenible, basados en el enfoque de tres vías descrito en *The SuDS Manual* (C697), orientados a mitigar los efectos del desarrollo urbano sobre la gestión de aguas pluviales.

**Tabla 1** *Objetivos del drenaje sostenible según el concepto de tres vías*

| Objetivo                                            | Descripción                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cantidad (Quantity)                                 | Minimizar el impacto del desarrollo en la cantidad de escorrentía superficial generada.                                                              |
| Calidad (Quality)                                   | Mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación en la escorrentía antes de que alcance los cuerpos de agua receptores.                       |
| Amenidad y Biodiversidad (Amenity and Biodiversity) | Maximizar las oportunidades de mejorar el entorno, proporcionando espacios verdes y hábitats que fomenten la biodiversidad y generen valor estético. |

*Nota.* La tabla presenta los tres objetivos principales de los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) conforme al concepto de tres vías propuesto en *The SuDS Manual C697*. Estos objetivos están diseñados para abordar los impactos del desarrollo urbano en el manejo de las aguas superficiales (Woods Ballard et al., 2015).

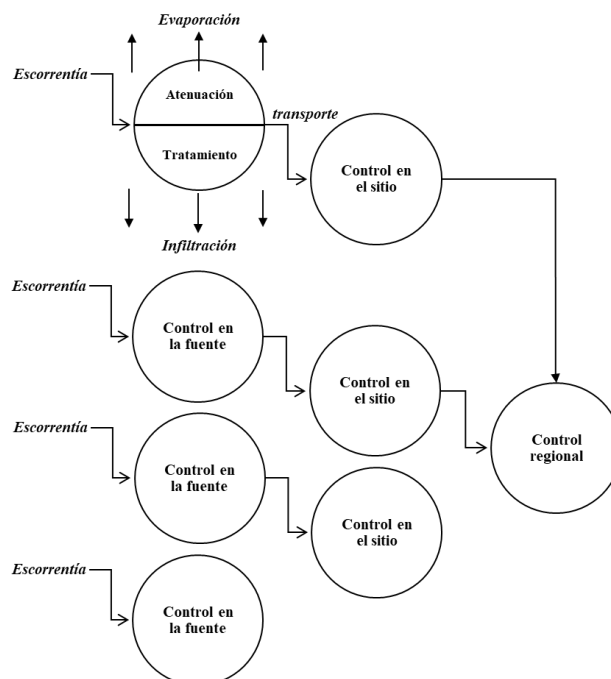
## 4.2. Gestión de aguas pluviales en SUDS

Según lo expuesto en el *CIRIA SuDS Manual*, para garantizar una gestión efectiva del agua pluvial que imite los procesos naturales de captación, es esencial implementar un “tren de gestión”. Este concepto es crucial para el diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible exitoso, ya que se basa en la aplicación secuencial de diversas técnicas de drenaje. Estas técnicas permiten reducir gradualmente la contaminación, el caudal y el volumen de escorrentía. Al estructurar el tren de gestión, se debe seguir una jerarquía de acciones:

- **Prevención:** diseñar el sitio de modo que minimice la generación de escorrentía y contaminación desde su origen, integrando prácticas como limpieza periódica y reutilización del agua de lluvia.
- **Control en la fuente:** gestionar la escorrentía en el punto donde se genera, mediante soluciones como canales de absorción, sistemas de infiltración, techos verdes y pavimentos permeables.
- **Control a nivel de sitio:** manejar el agua en áreas específicas, conduciéndola desde superficies impermeables hacia zonas de absorción, infiltración o detención localizadas.
- **Control regional:** agrupar y gestionar la escorrentía proveniente de múltiples sitios en infraestructuras como estanques de detención o humedales construidos.

A continuación, en la **Figura 2** se presenta el esquema del tren de gestión, el cual ilustra de forma gráfica la secuencia de etapas —desde la prevención hasta el control regional— empleadas en un SuDS para disminuir progresivamente el volumen, el caudal y la carga contaminante de la escorrentía antes de su descarga final.

**Figura 2.** Tren de gestión SuDS



*Nota.* Adaptado de CIRIA SuDS Manual, 2015. Esquema del tren de gestión en Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, que ilustra la secuencia de técnicas utilizadas para reducir la contaminación, el caudal y el volumen de escorrentía, desde la prevención hasta el control regional.

### 4.3. Procesos de control de la cantidad de escorrentía

Para abordar eficazmente el exceso de escorrentía superficial en áreas urbanas, los SuDS implementan distintos procesos de control que actúan sobre el agua de lluvia en diferentes etapas de su recorrido. Estos procesos permiten no solo desacelerar y reducir el volumen del flujo, sino también mejorar su calidad antes de su descarga o infiltración. La **Tabla 2** resume los principales mecanismos empleados en un SuDS para controlar la cantidad de escorrentía.

**Tabla 2** *Procesos de control de escorrentía*

| Proceso de Control   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Infiltración         | Remojo del agua en el suelo, trasladando parte del caudal al acuífero y reduciendo el volumen de escorrentía. Favorece la recarga de aguas subterráneas y restaura procesos hidrológicos naturales, siempre que las condiciones del suelo y el nivel freático lo permitan. |
| Detención/Atenuación | Almacenamiento temporal que limita el caudal pico mediante una salida controlada; reduce el flujo máximo, pero prolonga su duración sin alterar el volumen total.                                                                                                          |
| Transmisión          | Conducción del agua entre componentes del sistema (canales, tuberías, zanjas) de forma controlada, conectando las distintas etapas del tren de gestión y evitando flujos desordenados.                                                                                     |
| Captación de agua    | Recolección y almacenamiento de escorrentía para su uso posterior (riego, limpieza), disminuyendo la carga enviada al sistema de drenaje y generando un recurso aprovechable.                                                                                              |

*Nota.* Adaptado de *CIRIA SuDS Manual* (2015). Estos procesos son esenciales para estructurar un tren de gestión eficaz que combine infiltración, retención, conducción y aprovechamiento del agua pluvial.

### 4.4. Clasificación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible

Las tipologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) se organizan en función de su papel principal dentro del manejo de la escorrentía, permitiendo seleccionar la solución más adecuada según los objetivos y condicionantes del sitio. A continuación, en la **Tabla 3**, se agrupan siete tipologías propuestas por la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017) en cuatro categorías funcionales clave

**Tabla 3** *Clasificación de las tipologías SuDS según categoría funcional*

| <b>Categoría</b>      | <b>Descripción</b>                                                                                              | <b>Tipologías</b>                                                      |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Infiltración          | Facilitan el paso del agua al subsuelo, recargando acuíferos y reduciendo el volumen de escorrentía.            | Pavimentos permeables; Zanja de infiltración                           |
| Retención y detención | Almacenan o retardan temporalmente el flujo para reducir picos de caudal y controlar el volumen de escorrentía. | Alcorques inundables; Cuenca seca de drenaje extendido; Cunetas verdes |
| Filtración            | Eliminan contaminantes mediante medios filtrantes antes de su descarga o infiltración.                          | Zonas de biorretención                                                 |
| Almacenamiento y uso  | Capturan y almacenan el agua pluvial para su aprovechamiento posterior (riego, limpieza, recarga).              | Tanques de almacenamiento                                              |

*Nota.* Adaptado de Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). Se agrupan las siete tipologías fundamentales de SuDS en las cuatro categorías funcionales esenciales para la gestión integrada de la escorrentía pluvial.

#### 4.5. Zonas de biorretención

Las zonas de biorretención consisten en depresiones vegetadas diseñadas para interceptar, detener e infiltrar la escorrentía pluvial, al tiempo que mejoran su calidad antes de su evacuación. Estas estructuras permiten que el agua de lluvia penetre en suelos de alta permeabilidad o atraviese capas filtrantes de arena o gravilla, bajo una cubierta vegetal que potencia procesos de interceptación, detención, evapotranspiración, infiltración y eliminación de contaminantes. Gracias a estos mecanismos, las zonas de biorretención reducen significativamente los volúmenes de escorrentía en el área de influencia. Su sección constructiva típica, según la Norma técnica de servicio NS-166 EAAB (2018), incluye:

- Muro de retención para delimitar la depresión y dirigir la escorrentía a un punto de entrada, evitando erosión por flujo difuso.
- Disipador de energía en la entrada para disminuir la velocidad del agua.
- Capa de mantillo y suelo mejorado bajo la vegetación, que sustenta el sistema radicular y contribuye a la adsorción de contaminantes.
- Geotextil no tejido para separar el sustrato de la capa drenante y prevenir la migración de partículas finas.

- Capa de grava o arena como medio de drenaje, capaz de almacenar temporalmente el agua y facilitar su percolación.
- Tuberías perforadas para evacuar el excedente no infiltrado hacia el sistema de drenaje convencional o la siguiente etapa del tren de gestión.
- Recubrimiento impermeable lateral y/o de fondo, opcionalmente, cuando se requiere controlar la dirección de la infiltración.

Estas tipologías pueden instalarse en separadores de vías, andenes, áreas residenciales, estacionamientos, zonas recreativas y espacios comerciales (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, 2017). Además de su función hidráulica, aportan biodiversidad y mejoran el paisajismo urbano: al ser auto-irrigantes y fértiles, colaboran en el enfriamiento de microclimas locales mediante la evapotranspiración (CIRIA, 2015). Entre sus limitaciones se encuentra la necesidad de pendiente mínima para facilitar el mantenimiento y evitar estancamientos, así como la posible incorporación de estructuras de pretratamiento para remover sólidos gruesos antes de su ingreso. En conjunto, las zonas de biorretención ofrecen una solución ambientalmente efectiva y versátil, alineada con los objetivos de los SuDS, al combinar control de caudales, tratamiento de contaminantes y generación de espacios verdes de alto valor estético y ecológico.

## **5. Estado del Arte**

Según la Guía Metodológica para la Formulación e Implementación de SuDS, desarrollada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y Departamento Nacional de Planeación (2022), Colombia ha avanzado significativamente en la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) como alternativas efectivas para mejorar la gestión de aguas pluviales y mitigar inundaciones en áreas urbanizadas. Estas soluciones, que incluyen tanto técnicas estructurales como no estructurales, están siendo exploradas en distintas ciudades del país, principalmente en Bogotá y Medellín, donde se han llevado a cabo investigaciones metodológicas y proyectos piloto para determinar su viabilidad y efectividad en entornos urbanos complejos.

Uno de los avances más destacados en el país es la elaboración de la "Guía para la Integración de Soluciones Basadas en la Naturaleza en la Planificación Urbana" por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Este documento, que también forma parte de las referencias en la Guía Metodológica para SuDS, presenta un conjunto detallado de pasos destinados a facilitar la planificación, diseño, monitoreo y financiamiento de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en ciudades colombianas. En esta guía se ofrecen herramientas específicas y estudios de casos que ejemplifican la aplicación de SuDS en diferentes contextos urbanos, lo cual resulta valioso para su adopción en espacios públicos, así como para fomentar la participación de instituciones y comunidades locales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & DNP 2022).

### **5.1. Bogotá: Proyectos y Normativa Local**

En Bogotá, se han impulsado múltiples iniciativas desde la Subdirección para la Reducción del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), con el propósito de incorporar soluciones de drenaje sostenible en la infraestructura urbana. Estos esfuerzos se han realizado en colaboración con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), el sector académico y otros actores públicos y privados. A partir de más de tres años de investigaciones, se logró establecer la Norma Técnica de Servicio NS-166 y el Decreto 597 de 2018, que regulan los criterios para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de SuDS en Bogotá. Esta normativa atribuye a la EAAB la

responsabilidad de desarrollar y gestionar proyectos de drenaje sostenible, estableciendo un marco técnico y administrativo para su implementación, inspirado en experiencias internacionales exitosas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & DNP 2022).

Un aspecto innovador de la normativa en Bogotá es la incorporación de un mecanismo de financiamiento basado en la tarifa del servicio de alcantarillado. Esto garantiza un fondo fijo y continuo para el mantenimiento de los SuDS en la ciudad, promoviendo su sostenibilidad y asegurando la disponibilidad de recursos para su operación a largo plazo. Este modelo de financiamiento refleja un enfoque integral que busca asegurar la viabilidad y efectividad de los sistemas de drenaje sostenible en Bogotá, ofreciendo una solución más económica y ambientalmente adecuada que los sistemas de drenaje convencionales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & DNP 2022).

## **5.2. Medellín y el Valle de Aburrá: Coordinación Interinstitucional**

En Medellín y el Valle de Aburrá, desde el año 2006, la Secretaría de Medio Ambiente y Empresas Públicas de Medellín (EPM) han unido esfuerzos para integrar la gestión de drenaje urbano en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (POMCA) y en el Plan Maestro de Drenaje Urbano. En 2013, estas entidades firmaron un convenio interadministrativo que estableció mesas de trabajo entre las secretarías de infraestructura, medio ambiente, movilidad y EPM para coordinar esfuerzos orientados a la mitigación de riesgos de inundación. Aunque no se lograron los resultados esperados en la formulación de un plan maestro para el drenaje urbano, la coordinación interinstitucional ha permitido el mantenimiento preventivo y correctivo de sumideros, redes de drenaje y otras infraestructuras necesarias para la gestión sostenible de aguas pluviales (EPM, 2021, como se citó en Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

## **5.3. Estudios de Caso en Otras Ciudades Colombianas**

Otros municipios en Colombia también han explorado la implementación de SuDS para hacer frente a problemas de drenaje urbano. En Valledupar, un estudio conceptual propuso integrar SuDS en los planes de uso del suelo, recomendando la implementación de tipologías como alcorques inundables, tanques de almacenamiento y cuencas secas de drenaje, adaptadas a las

características específicas de la ciudad. Este enfoque incluyó prácticas de diseño urbano sensible al agua y un esquema de financiamiento para sostener estas soluciones a largo plazo (USAID, 2017, como se citó en Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Un estudio en Guapi y San Andrés de Tumaco, supervisado por el Banco Mundial, identificó que los SuDS pueden resultar significativamente más económicos que los sistemas convencionales de alcantarillado. Este análisis resaltó que alternativas como las zanjas filtrantes y depósitos de infiltración son hasta seis veces más rentables, ofreciendo una opción de bajo costo para la regulación de aguas pluviales en estas regiones vulnerables. La viabilidad económica de los SuDS fue demostrada especialmente en San Andrés de Tumaco, donde se concluyó que el presupuesto destinado para la gestión de riesgos e inundaciones es suficiente para implementar y mantener estos sistemas sin necesidad de financiación externa (CONHYDRA e ITAC, 2018, como se citó en Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

#### **5.4. Proyectos Piloto e Investigación en Drenaje Sostenible**

La Guía Metodológica para SuDS destaca investigaciones recientes en San José de Cúcuta, que evidencian los beneficios de los SuDS en la regulación de escorrentía en áreas urbanas. Estos estudios, como el realizado en la localidad de Fontibón en Bogotá, han implementado zanjas de infiltración y pozos de almacenamiento, observando reducciones significativas en los picos de escorrentía. Los modelos hidráulicos e hidrológicos indican que estos sistemas no solo minimizan los riesgos de inundación, sino que también colaboran con los sistemas convencionales de alcantarillado para mejorar la calidad del agua descargada a cuerpos de agua naturales. De esta manera, los SuDS demuestran su capacidad para optimizar el diseño de la red de drenaje, permitiendo una reducción de los diámetros y pendientes de la red, lo cual representa una disminución en los costos de construcción del sistema proyectado (Cubides & Santos, 2018, como se citó en Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

## **5.5. Normativa para la Implementación de SuDS en Colombia**

En Colombia, la normativa y regulación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) están estructuradas a través de varios marcos regulatorios y políticas ambientales que establecen los lineamientos para la planificación, diseño y construcción de estos sistemas. A continuación, se detallan las normativas y lineamientos más relevantes.

### **5.5.1 *Resolución 0799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio***

La Resolución 0799 de 2021, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, establece los requerimientos técnicos a cumplir en todas las etapas de un proyecto de agua potable y saneamiento básico, incluyendo desde la planeación hasta la construcción. Dentro de esta resolución, el Artículo 44 modifica el Artículo 153 de la Resolución 0330 de 2017, especificando que los nuevos desarrollos urbanos que impliquen cambios en la cobertura del suelo deben adoptar medidas para mitigar los efectos de la impermeabilización (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

Para reducir los impactos, se recomienda diseñar e implementar SuDS, priorizando aquellos que logren reducir el caudal pico del hidrograma de crecida de diseño en un mínimo del 30%. Además, se establece que las estructuras de retención deben incluir sistemas de cribado y sedimentación, así como accesibilidad para el mantenimiento y transporte de desechos hacia sitios de disposición final, según la normatividad vigente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

### **5.5.2 *Política Nacional de Cambio Climático y Gestión Integral del Recurso Hídrico***

La Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico, impulsada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, busca un enfoque de desarrollo que minimice las emisiones de carbono y aumente la resiliencia frente a eventos climáticos adversos. En esta política, se promueve la adopción de estrategias que integren la sostenibilidad ambiental, lo que abarca prácticas como el uso eficiente del agua y la implementación de sistemas de drenaje que puedan

soportar los cambios en los patrones climáticos (Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

De igual forma, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico subraya la importancia de garantizar la sostenibilidad y eficiencia en el uso del agua, considerando el ordenamiento territorial y la conservación de los ecosistemas que regulan la disponibilidad hídrica. Esta política promueve la participación comunitaria en la gestión de recursos y fomenta el desarrollo sostenible mediante prácticas como los SuDS, contribuyendo así al bienestar social y a la reducción de riesgos asociados al cambio climático (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

### **5.5.3 Guía Técnica EAAB–Uniandes de SuDS**

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), en colaboración con el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes, desarrolló la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS y la Norma NS-166. Este documento detalla aspectos esenciales para la planificación de SuDS en espacios públicos, complementando los sistemas de drenaje urbano convencionales para asegurar la retención de agua y la mejora de su calidad. La guía establece criterios de diseño específicos que deben ser aprobados por las autoridades y diseñadores, en relación con la cantidad y calidad del agua en zonas urbanizadas (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016).

Asimismo, esta guía identifica siete tipologías de SuDS adecuadas para Bogotá, y las cuales se pueden implementar en otros contextos del territorio nacional tales como alcorques inundables, tanques de almacenamiento, zonas de bio-retención, cunetas verdes, cuencas secas de drenaje extendida, zanjas de infiltración y pavimentos porosos. Estas tipologías se seleccionan en función de la capacidad de adaptación al entorno urbano específico y la efectividad en alcanzar objetivos de reducción de volumen y contaminación del agua (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes, 2016).

#### **5.5.4 *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)***

En 2015, las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como una agenda global para promover el desarrollo equitativo y ambientalmente sostenible. Dentro de esta agenda, el ODS 6 se centra en el acceso a agua limpia y saneamiento para todos, resaltando la necesidad de prácticas sostenibles como los SuDS para evitar la contaminación de fuentes hídricas. Además, el ODS 11 promueve ciudades sostenibles, que reduzcan el impacto ambiental a través de infraestructuras que apoyen la calidad del aire y la gestión de residuos, incluyendo el tratamiento y reutilización de aguas pluviales mediante SuDS (Naciones Unidas, 2023).

#### **5.5.5 *Normativa y Regulación Internacional***

A nivel internacional, países como el Reino Unido, Australia, Suecia, y Nueva Zelanda han desarrollado normativas específicas para los SuDS. Estos marcos regulatorios establecen directrices claras para la planeación, construcción y mantenimiento de sistemas de drenaje sostenible, así como la distribución de responsabilidades entre los propietarios y autoridades locales. En el Reino Unido, por ejemplo, el Marco de Política de Planificación Nacional (NPPF) establece la prioridad para el drenaje sostenible en nuevos desarrollos, asignando la responsabilidad de mantenimiento a las autoridades locales, lo cual ha facilitado la adopción de SuDS a través de incentivos y subsidios (Sustainable drainage systems Statement, 2014; Hennelly, 2005).

En China, la estrategia de "ciudades esponja" ha sido implementada para hacer frente a las frecuentes inundaciones urbanas, mediante infraestructura verde que mejora la absorción y tratamiento de aguas pluviales. En América Latina, diversos países han comenzado a integrar soluciones basadas en la naturaleza en sus políticas urbanas, con miras a una gestión más sostenible de los recursos hídricos en contextos densamente poblados (WWAP/ONU-Agua, 2018).

## 6. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque teórico-técnico, sin ejecución de obras físicas ni levantamientos de campo directos, orientado a evaluar la viabilidad de implementar zonas de bio-retención con geotextiles y polímeros reciclados en el tramo vial Chimita–La Cemento. Sus objetivos metodológicos son:

1. Fundamentar el diseño hidrológico y predimensionamiento de las zonas de bio-retención.
2. Analizar el desempeño técnico de los materiales propuestos.
3. Evaluar cualitativamente sus impactos ambientales, económicos y sociales.

### 6.1. Tipo de investigación

Se desarrolla una investigación aplicada de carácter documental con el fin de fundamentar teórica y técnicamente la viabilidad de zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados en el tramo Chimita–La Cemento, sin ejecución de obras físicas ni levantamientos de campo.

#### **Investigación descriptiva:**

Este estudio tiene un enfoque principalmente descriptivo, ya que se busca caracterizar y documentar el contexto del tramo vial Chimita - La Cemento en términos de su infraestructura de drenaje y los problemas de escorrentía actuales.

En esta fase, se recolectaron y sistematizaron datos cualitativos y cuantitativos para caracterizar la infraestructura de drenaje existente (número, tipo y ubicación de sumideros), la topografía longitudinal y transversal del tramo, así como los registros históricos de precipitación y escorrentía del IDEAM y del Plan Municipal de Riesgo de Girón.

Con esta información se documentó el estado actual de colmatación, capacidad de evacuación y puntos críticos de inundación en Chimita–La Cemento, estableciendo un diagnóstico detallado de la problemática.

**Investigación explicativa:**

Además de la descripción, el estudio adopta un enfoque explicativo orientado a investigar cómo la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) —específicamente zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados— puede influir en la reducción de la escorrentía y las inundaciones, mejorar la calidad del agua y generar beneficios económicos y sociales.

Se analizaron las relaciones causales entre los parámetros físico-hidrológicos del tramo y el desempeño de los SuDS propuestos. Mediante la comparación de estudios de caso internacionales y datos normativos, se evaluó cualitativamente cómo la incorporación de zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados puede reducir los caudales pico, mejorar la calidad del agua y generar beneficios socioeconómicos. Este análisis incluyó el contraste de costos de implementación, ciclo de vida y métricas de seguridad vial frente a la infraestructura gris convencional.

**6.2. Enfoque metodológico**

Se adoptó un enfoque mixto cualitativo–cuantitativo, organizado en cuatro fases sucesivas:

- 1. Revisión y selección de fuentes.** Se llevó a cabo la identificación y clasificación de literatura científica, normativa y datos secundarios pertinentes (véase sección 6.3).
- 2. Caracterización físico-hidrológica.** Se generaron curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) y se calcularon volúmenes de escorrentía de diseño mediante hojas de cálculo en Excel.
- 3. Diseño y predimensionamiento.** Se aplicaron los criterios establecidos en la Guía EAAB–Uniandes y en el Manual Denver para dimensionar teóricamente las secciones de biorretención proyectadas.
- 4. Evaluación cualitativa de impactos.** Se sistematizaron y analizaron los resultados ambientales, económicos y sociales a partir de la literatura nacional e internacional.

En este esquema, la dimensión cuantitativa abarcó la modelación hidrológica y el cálculo de volúmenes de diseño, mientras que la dimensión cualitativa contempló el análisis crítico de estudios de caso, la normativa aplicable y experiencias previas.

### 6.3. Estrategia de recolección de datos

La fase de recolección de datos se fundamenta en el análisis de fuentes secundarias confiables, con el fin de respaldar técnicamente la propuesta de implementación de SuDS en el tramo Chimita–La Cemento.

#### 6.3.1 Fuentes de datos

- **Literatura técnica, científica y estudios de caso:** Se analizaron investigaciones previas, artículos de revistas indexadas y tesis académicas disponibles en ScienceDirect, Scopus y ResearchGate con el fin de identificar metodologías consolidadas de bio-retención, desempeño de geotextiles y uso de polímeros reciclados en SuDS.
- **Normativa y guías técnicas oficiales:** Se consultaron documentos como la Resolución 0799/2021, la Guía EAAB–Uniandes (2017), la NS-166 (2018), la Guía Metodológica SuDS (Min. Vivienda & DNP, 2022), el Manual de Drenaje Inviás (2009) y el Urban Storm Drainage Criteria Manual (Denver, 2010) con el objetivo de extraer criterios de diseño, construcción y operación aplicables a zonas de bio-retención.
- **Datos hidrológicos y climáticos:** Se recopilaron registros de precipitación diaria y máximos horarios del IDEAM, así como las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) calculadas para la estación Llano Grande para que sirvieran de base al dimensionamiento hidrológico de las zonas de bio-retención.
- **Cartografía y caracterización del tramo vial:** Se emplearon planos y shapefiles del IGAC y del municipio de Girón, y se hizo uso de la herramienta Google Earth Pro con el fin de delimitar la cuenca, analizar la topografía y ubicar los sumideros existentes en el tramo Chimita–La Cemento.

### 6.3.2 *Criterios de selección de fuentes*

- **Relevancia:** Se seleccionaron documentos directamente relacionados con la gestión de aguas pluviales, con un enfoque en bio-retención y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) en entornos urbanos.
- **Actualidad:** Se incluyeron únicamente fuentes publicadas en los últimos diez años (2013–2024), para garantizar que los datos y recomendaciones reflejen las prácticas y normativas más recientes.
- **Rigor académico:** Se priorizaron artículos publicados en revistas indexadas, tesis de pregrado y posgrado, y documentos técnicos oficiales de entidades reconocidas (Ministerio de Vivienda, Invías, IDEAM, EAAB, CIRIA), asegurando que cada fuente contenga metodología descrita, referencias claras y validada por comité editorial o académico.

### 6.3.3 *Herramientas de recolección*

- **Software de análisis de datos y gestor bibliográfico:** Se utilizaron herramientas como Excel y Zotero con el fin de organizar y gestionar las referencias, generar automáticamente la bibliografía en formato APA, y realizar cálculos de modelación hidrológica, curvas IDF y predimensionamiento teórico de las zonas de biorretención.
- **Revisión bibliográfica sistemática:** Se ejecutó una búsqueda y revisión exhaustiva en revistas indexadas, informes técnicos y tesis académicas disponibles en ScienceDirect, ResearchGate y repositorios universitarios para que se recopilaran y sintetizaran las metodologías, resultados experimentales y conclusiones pertinentes al desempeño de SuDS, biorretención, geotextiles y polímeros reciclados.

- **Análisis de documentos técnicos:** Se consultaron y analizaron documentos de normativa oficial, guías técnicas nacionales e internacionales, documentos de entidades públicas y planes municipales (IDEAM, IGAC, Plan Municipal de Riesgo de Girón) con el objetivo de extraer los lineamientos de diseño, criterios de operación y requerimientos mínimos aplicables a la implementación de sistemas de biorretención en el tramo Chimita–La Cemento.

#### 6.4. Análisis e interpretación de datos y evaluación de impactos

- **Modelación hidrológica y escorrentía:** Se interpretaron las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) y los volúmenes de escorrentía calculados con el fin de definir los parámetros hidrológicos de diseño (caudales pico, volúmenes de retención) para las celdas de biorretención.
- **Diseño hidrológico conceptual de biorretención:** Basado en las condiciones representativas del tramo vial Chimita–La Cemento, se abordó conceptualmente el dimensionamiento hidrológico de las zonas de biorretención considerando las características hidráulicas, topográficas y pluviométricas del área de estudio, y aplicando los criterios del Urban Storm Drainage Criteria Manual (Denver, 2010).
- **Análisis técnico de materiales:** Se compararon las propiedades físicas y mecánicas de los geotextiles y polímeros reciclados para que se contrastara su desempeño frente a los requisitos normativos y los hallazgos experimentales de la literatura, determinando su idoneidad funcional en el tramo Chimita–La Cemento.
- **Evaluación cualitativa de impactos:** Se sintetizaron los beneficios ambientales (reducción de escorrentía, mejora de calidad de agua, fomento de la biodiversidad), económicos (costos de ciclo de vida, ahorros operativos) y sociales (seguridad vial, confort y generación de espacios verdes) con el fin de establecer una visión integrada de la viabilidad técnica, financiera y social de los sistemas propuestos frente a la alternativa gris.

## **7. Adaptación metodológica para la selección de sitios SuDS**

Este capítulo tiene como propósito presentar de manera breve la adaptación de la metodología de selección de sitios para soluciones urbanas de drenaje sostenible (SuDS) propuesta en la Guía Técnica de Diseño y Construcción (EAAB & Universidad de los Andes, 2017) al caso de estudio desarrollado en la presente monografía. Si bien el área de intervención ya ha sido definida, se recurre a este marco metodológico como herramienta de análisis para evaluar el grado de idoneidad técnica del sitio seleccionado y justificar la elección de la tipología SuDS de biorretención como solución prioritaria. Para tal fin, se realiza una revisión de los pasos metodológicos aplicados en el caso de estudio desarrollado en Bogotá y se procede a su adaptación al contexto del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá, en el municipio de Girón (Santander).

### **7.1. Aplicación al tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá**

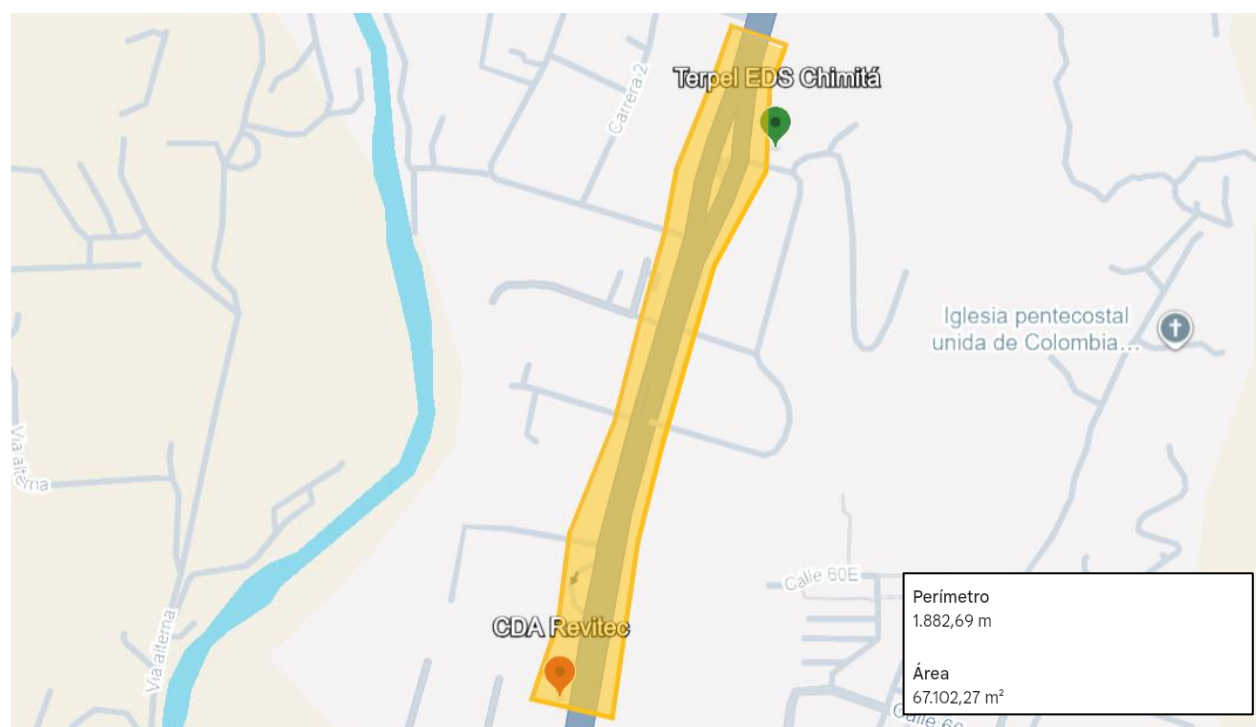
La selección del tramo vial comprendido entre el CDA Revitec y la estación de servicio Terpel EDS Chimitá como área de estudio para esta investigación se fundamenta en la adaptación contextualizada de los pasos metodológicos propuestos por la *Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS* (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). Si bien la metodología original fue concebida para escalas urbanas más amplias, como la empleada en el caso de estudio en Bogotá D.C., su lógica de análisis técnico y estratégico puede ser ajustada y aplicada eficazmente a escalas locales, como la de un corredor vial urbano en Girón – Santander, cuando se dispone de información georreferenciada y criterios de selección bien definidos. Los pasos metodológicos adaptados para justificar la selección de este tramo se presentan a continuación:

#### **7.1.1 Delimitación del área de estudio**

El área de intervención se delimitó desde criterios geométricos y funcionales a lo largo de un eje vial, comprendido entre dos puntos de referencia urbanos clave: el Centro de Diagnóstico Automotor Revitec y la estación de servicio Terpel EDS Chimitá, ambos ubicados sobre la Vía 45AST, una arteria vial secundaria con flujo mixto y conectividad transversal hacia el río de Oro.

Esta delimitación obedece a su condición de corredor urbano con presencia de infraestructura hidráulica existente (sumideros), zonas verdes disponibles (separador vial central) y problemas recurrentes de manejo inadecuado de escorrentía, factores que lo convierten en un entorno ideal para evaluar la aplicación de SuDS.

**Figura 3.** Área de estudio delimitada: Tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chinitá



*Nota.* Adaptado de (Google Earth, 2025).

### 7.1.2 Alcance y viabilidad de SuDS

El objetivo principal del proyecto se centra en proponer estrategias sostenibles de control de escorrentía urbana, con énfasis en reducción de caudales pico e incremento en la calidad del agua pluvial recolectada, mediante soluciones como zonas de biorretención con el uso de geotextiles y polímeros reciclados. A diferencia de escenarios donde el objetivo es mitigar desbordes fluviales o mareas, la problemática identificada en el tramo corresponde a eventos de escorrentía urbana generados por precipitaciones frecuentes. Por ello, las tipologías SuDS resulta apropiada, ya que su función es gestionar el volumen, velocidad y calidad del agua superficial a escala local, a través de mecanismos de infiltración, almacenamiento temporal y tratamiento biofísico.

### 7.1.3 *Recopilación de información técnica y verificación de restricciones*

Se recopiló una base de información técnica secundaria detallada sobre el tramo vial, incluyendo la caracterización geológica y litológica de los suelos, con análisis de infiltración y profundidad del nivel freático; el análisis topográfico del perfil longitudinal en ambos sentidos de circulación, que evidenció tramos de baja pendiente que favorecen la acumulación temporal de escorrentía; la identificación de infraestructura hidráulica existente (sumideros), zonas verdes sobre separadores viales, y calles adyacentes no pavimentadas que incrementan la carga sedimentaria; así como información pluviométrica e intensidad de lluvia basada en curvas IDF de estaciones del municipio de Girón, en especial la estación Llano Grande, que representa las condiciones climáticas locales.

Según lo establecido en la Guía Técnica (EAAB & Universidad de los Andes, 2017), esta etapa resulta crítica para identificar características físicas clave del terreno como la pendiente longitudinal, la profundidad al nivel freático, la tasa de infiltración y la distancia a cimentaciones, que permiten verificar el cumplimiento de las restricciones mínimas requeridas para esta tipología. Además, al tratarse de un corredor vial urbano con predominio de áreas públicas y conectividad hacia redes de drenaje existentes, el sitio cumple con condiciones operativas y espaciales favorables para la instalación y mantenimiento de la tipología SuDS Zonas de Bio-retención. El grado de cumplimiento de estos criterios puede verificarse de manera explícita mediante la comparación con los valores de referencia recomendados para zonas de biorretención, tal como se muestra en la **Tabla 4**, donde se resumen las restricciones técnicas asociadas a esta tipología.

**Tabla 4** *Restricciones recomendadas para la tipología de zonas de biorretención*

| <b>Parámetro</b>                             | <b>Tipo de restricción<br/>por valor</b> | <b>Zonas de biorretención</b> |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Pendiente longitudinal (%)</b>            | Máximo                                   | 10                            |
|                                              | Mínimo                                   | 1                             |
| <b>Distancia al nivel freático (m)</b>       | Mínimo                                   | 1.83                          |
| <b>Tasa de infiltración del suelo (mm/h)</b> | Mínimo                                   | 7                             |
| <b>Distancia a cimentos</b>                  | Mínimo                                   | 2                             |

*Nota.* Adaptado de EAAB & Universidad de los Andes (2017, p. 66).

#### ***7.1.4 Priorización del área y validación estratégica***

Aunque la metodología contempla una etapa de comparación entre múltiples alternativas, en este caso se optó por aplicar el proceso de selección sobre un único corredor vial ya identificado, con base en el principio de adaptación metodológica a escala local. Sin embargo, se realizó una validación estratégica que incluyó:

- La carga contaminante esperada, por tratarse de una zona con uso industrial mixto.
- Verificación de la presencia de conectividad vial y continuidad de redes de drenaje.
- Potencial de replicabilidad del modelo en otros tramos urbanos de características similares.

Además, se valoró positivamente la posibilidad de maximizar beneficios ambientales y sociales mediante la transformación de zonas verdes subutilizadas (como los separadores) en espacios multifuncionales para biorretención, lo cual genera impactos colaterales en términos de paisajismo, percepción de seguridad y revalorización del entorno urbano.

#### ***7.1.5 Conclusión del proceso de selección***

El tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá fue finalmente seleccionado como área piloto para la evaluación teórica de la tipología SuDS, dado su cumplimiento satisfactorio con las condiciones técnicas mínimas requeridas, su pertinencia funcional frente a los objetivos del proyecto y su potencial estratégico para la demostración de beneficios urbanos integrales derivados del uso de zonas de biorretención con incorporación de geotextiles y polímeros reciclados.

## **8. Análisis físico-hidrológico del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá**

La caracterización técnica de las condiciones físico-hidrológicas del entorno constituye un paso fundamental para evaluar la viabilidad de implementación de soluciones basadas en sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS), especialmente en contextos viales con alta exposición a escorrentía superficial. Esta etapa permite comprender con mayor precisión la interacción entre los factores naturales del terreno y las dinámicas hidráulicas inducidas por la infraestructura vial, lo que resulta indispensable para garantizar un diseño funcional, eficiente y adaptado a las condiciones locales. En este capítulo se examinan de manera detallada las variables relevantes del tramo comprendido entre el CDA Revitec y la estación de servicio Terpel EDS Chimitá, ubicado en el municipio de Girón – Santander, zona que presenta características urbanas densas y superficies mayoritariamente impermeables, lo cual incrementa el volumen y velocidad de escorrentía durante eventos de lluvia.

Se abordan aspectos como la morfología y pendiente del terreno, que inciden en la dirección y acumulación del flujo superficial; la composición y capacidad de infiltración del suelo, que determina la eficacia de las soluciones basadas en retención e infiltración; la cercanía al nivel freático, que condiciona la profundidad y viabilidad de las intervenciones subterráneas; y el régimen de precipitación, que influye en la frecuencia e intensidad de los caudales generados. Estos factores condicionan directamente el comportamiento hidráulico del sitio y permiten establecer criterios técnicos para la integración de zonas de biorretención con incorporación de geotextiles y polímeros reciclados, optimizando su desempeño tanto en términos de retención de contaminantes como de capacidad de infiltración y resistencia estructural en condiciones de alta carga hídrica.

### **8.1. Caracterización del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá**

El tramo vial analizado se ubica sobre la Vía 45AST, entre el Centro de Diagnóstico Automotor (CDA) Revitec y la estación de servicio Terpel EDS Chimitá, en el municipio de Girón, Santander. Este segmento presenta condiciones físicas y estructurales que inciden directamente en la generación y conducción de escorrentía superficial, aspectos fundamentales para evaluar la implementación de soluciones urbanas de drenaje sostenible (SuDS). El tramo cuenta con una

longitud total de 1.761 metros y se compone de dos segmentos paralelos, uno en sentido norte–sur y otro en sentido sur–norte, cada uno con dos carriles de circulación vehicular. El ancho promedio de cada carril oscila entre 3,50 y 3,65 metros, y el tipo de pavimento existente corresponde a mezcla asfáltica flexible, común en vías urbanas de tráfico medio a alto.

Entre ambos sentidos viales se dispone un separador central con cobertura vegetal continua y zonas verdes, que actualmente cumple funciones ornamentales y de regulación térmica, pero que también representa un espacio potencialmente funcional para la incorporación de soluciones de bio-retención y control de escorrentía. En cuanto a la infraestructura hidráulica existente, como se puede ver en la **Figura 4**, el tramo cuenta con un total de 14 sumideros tipo bordillo o banqueta, distribuidos en ambos costados de la vía, así como con un sumidero tipo rejilla de entrada y salida, elementos diseñados para captar y evacuar el caudal superficial durante eventos de precipitación.

**Figura 4.** Tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá



*Nota.* Se observa el trazado de ambos sentidos viales, así como la ubicación de los 14 sumideros tipo bordillo y un sumidero tipo rejilla entrada-salida. Imagen tomada de Google Earth Pro, georreferenciada y procesada por el autor (2025).

## 8.2. Caracterización del Suelo en el Área de Estudio

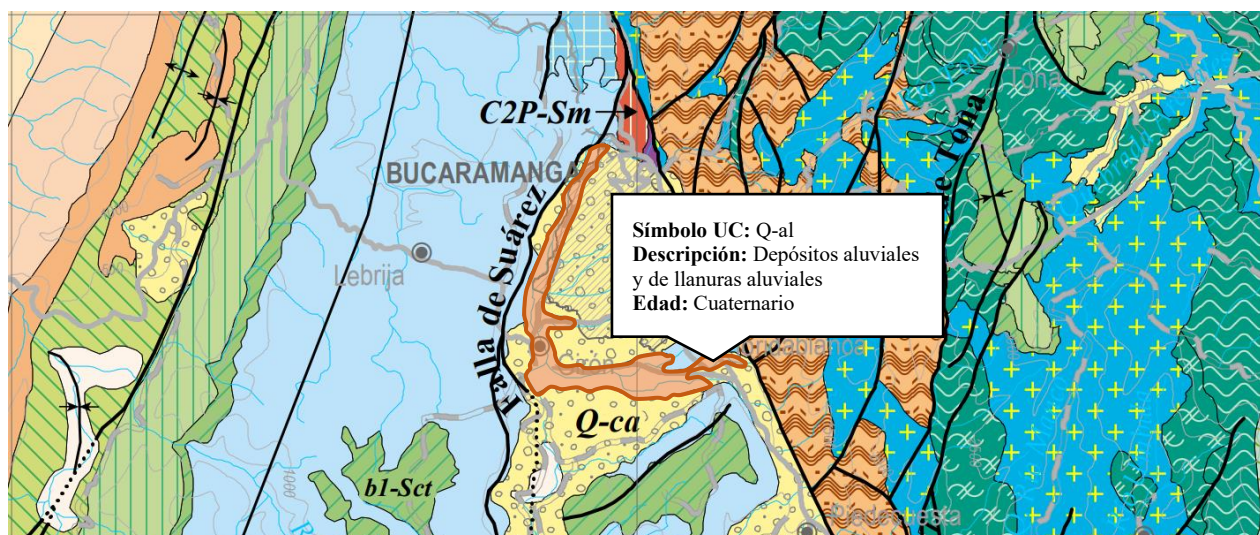
Dado que la presente monografía se desarrolla bajo un enfoque teórico, en la metodología adoptada no se contempla la ejecución de actividades de inspección detallada en campo, ni la realización de muestreos o ensayos geotécnicos e hidráulicos in situ. Por tanto, la caracterización

del suelo en el área de estudio se fundamenta en fuentes secundarias, tales como cartografía oficial, estudios previos y literatura técnica especializada. En este sentido, parámetros como la pendiente longitudinal del terreno, la profundidad estimada del nivel freático y la tasa de infiltración han sido considerados a partir de criterios técnicos de referencia. La distancia a cimientos fue evaluada de manera referencial, dada la carencia de planos estructurales específicos y datos detallados del subsuelo en el entorno inmediato. Esta aproximación, aunque limitada en términos de precisión empírica, ha sido tratada con un criterio conservador para garantizar la validez de los resultados en el marco de los objetivos planteados.

### 8.2.1 Contexto Geológico y Litológico

El área de estudio se localiza principalmente sobre formaciones geológicas correspondientes a depósitos aluviales recientes (Q-al) y, en menor proporción, sobre depósitos coluvio-aluviales (Q-ca), conforme a la cartografía geológica oficial contenida en la **Figura 5** (Plancha 5-06 del *Atlas Geológico de Colombia*, IGAC, 2015). Estas unidades litológicas son típicas de zonas de topografía suave y altitudes bajas, donde predominan los procesos de sedimentación fluvial recientes, asociados a la dinámica de cuerpos hídricos como el río de Oro, el río Suratá y diversas quebradas de menor jerarquía presentes en el municipio de Girón.

**Figura 5.** Unidades geológicas Q-al y Q-ca en el área de estudio.



*Nota.* Distribución de depósitos aluviales recientes (Q-al) y coluvio-aluviales (Q-ca) en la zona de influencia del proyecto, según la Plancha 5-06 del *Atlas Geológico de Colombia* (IGAC, 2015).

Los depósitos aluviales recientes (Q-al) están compuestos por materiales no consolidados con granulometría variable, conformados predominantemente por arenas finas a medias, limos y gravas, resultado de procesos de sedimentación fluvial en ambientes de baja pendiente y alta dinámica hídrica. Estos suelos se desarrollan comúnmente en las planicies de inundación y terrazas recientes asociadas a cursos de agua activos, y presentan generalmente una buena capacidad de infiltración y drenaje, lo que los hace adecuados para soluciones de drenaje sostenible como sistemas de biorretención (IGAC, 2015).

En contraste, los depósitos coluvio-aluviales (Q-ca) presentan una mayor heterogeneidad litológica, ya que resultan de la combinación de materiales transportados tanto por acción gravitacional como fluvial. Estos depósitos incluyen fragmentos angulosos de roca, gravas, limos y arcillas, generando perfiles de suelo con menor permeabilidad relativa y mayor susceptibilidad a la saturación superficial. Este tipo de suelos es característico de zonas de transición entre laderas y fondos de valle, donde se acumulan los productos del transporte de materiales desde sectores elevados hacia zonas de acumulación (IGAC, 2015).

### **8.2.2 Capacidad mínima de infiltración**

Desde el punto de vista hidrológico y con el objetivo de aproximar la tasa de infiltración en la zona de estudio, a partir de la información recopilada sobre las características físicas de los suelos previamente descritos, se procedió a su clasificación según los grupos hidrológicos establecidos en el modelo de Horton (1933), como se muestra en la **Tabla 5**.

Esta clasificación permite estimar, de manera conservadora, el comportamiento hidráulico del suelo frente a eventos de precipitación, a través de la asignación de una capacidad mínima de infiltración. Es importante aclarar que los valores aquí referenciados corresponden a parámetros indicativos mínimos, por lo que para fines de diseño de detalle será imprescindible realizar muestreos y ensayos in situ que permitan caracterizar con mayor precisión las condiciones del subsuelo.

**Tabla 5** *Clasificación de los grupos hidrológicos de suelo según Horton (1933)*

| <b>Grupo</b> | <b><math>f_c</math> (mm/h)</b> | <b>Descripción del suelo</b>                                                          |
|--------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>     | 11,43 – 7,62                   | Arenas profundas con poco limo y arcilla; suelos con potencial de escorrentía mínimo. |
| <b>B</b>     | 7,62 – 3,81                    | Suelos arenosos, menos profundos que los del grupo A.                                 |
| <b>C</b>     | 3,81 – 1,27                    | Suelos con mayor contenido de arcilla y coloides; poco profundos.                     |
| <b>D</b>     | 1,27 – 0,00                    | Suelos con sub-horizontes casi impermeables; alto contenido de arcilla.               |

*Nota.* Adaptado de Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (2015). Tema 4. Infiltración y humedad del suelo. Universidad del País Vasco.

Con base en esta clasificación, los suelos del área de estudio fueron agrupados de la siguiente manera:

- **Grupo B:** corresponde a los depósitos aluviales (Q-al), cuya tasa de infiltración final se estima entre 3,81 y 7,62 mm/h. Este grupo representa suelos de textura predominantemente arenosa, con buena permeabilidad y bajo potencial de escorrentía superficial.
- **Grupo C:** incluye a los depósitos coluvio-aluviales (Q-ca), con una tasa de infiltración estimada entre 1,27 y 3,81 mm/h. Esta categoría representa suelos más finos, con mayor contenido de arcillas y menor profundidad efectiva, lo que se traduce en una menor capacidad de infiltración y un mayor potencial de escorrentía.

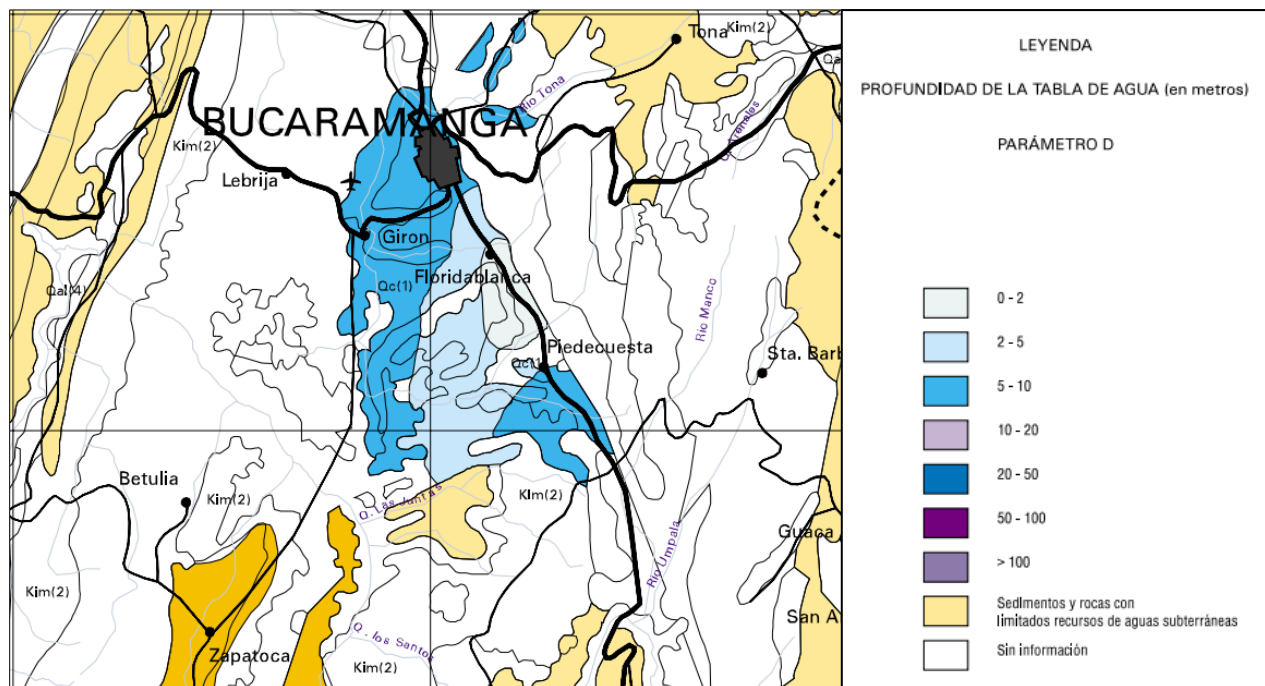
### 8.2.3 *Distancia al Nivel Freático*

La caracterización hidrogeológica del subsuelo constituye un componente clave para la evaluación de la viabilidad de implementar soluciones basadas en la naturaleza, como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS), especialmente en zonas susceptibles a inundaciones o con variabilidad hidrológica. En este contexto, el análisis del nivel freático entendido como la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en equilibrio hidrostático, permite establecer restricciones técnicas para el diseño e implementación de sistemas de biorretención o estructuras de almacenamiento temporal.

Con el fin de establecer una aproximación técnica y teórica a la profundidad del nivel freático en el área de estudio, se emplearon diversas fuentes documentales secundarias y estudios hidrogeológicos regionales. De acuerdo con el boletín técnico de aguas subterráneas publicado por

el INGEOMINAS, el área del municipio de Girón hace parte del Acuífero Bucaramanga (Qc), el cual corresponde a un depósito aluvial cuaternario discontinuo con un espesor total aproximado de 250 m. Este acuífero es de tipo libre a semiconfinado y presenta en general niveles freáticos que oscilan entre los 0.5 m y 35 m de profundidad, profundizándose hacia el occidente del área metropolitana. Tal como se muestra en la **Figura 6**, el valor del parámetro D, correspondiente a la profundidad de la tabla de agua, se encuentra predominantemente en el rango de **5 a 10 metros** para el municipio de Girón, lo cual proporciona un marco regional de referencia para el análisis específico desarrollado a continuación.

**Figura 6.** Profundidad freática en el área metropolitana de Bucaramanga



*Nota.* Se observa que para el municipio de Girón los niveles freáticos se ubican principalmente en el rango de 5 a 10 metros. Adaptado de INGEOMINAS (2006). *Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia – Plancha Profundidad Tabla de Agua. Área Bucaramanga*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Esta información se complementa con los resultados de dos estudios técnicos que consolidan información detallada sobre los niveles de agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, con énfasis en el municipio de Girón. El primero, titulado *Caracterización de los niveles de agua subterránea del Área Metropolitana de Bucaramanga – Fase 1* (López Serrano & Delgado Martínez, 2019), presenta mediciones realizadas en los pozos GON 7 y GON 8, ubicados dentro del municipio de Girón. En estos puntos, se reportan profundidades del nivel

freático que oscilan entre 6,87 m y 7,52 m, y entre 6,92 m y 7,15 m respectivamente, medidas desde la superficie del terreno. Por su parte, el segundo estudio, titulado *Localización y georreferenciación de puntos de agua subterránea de los pozos ubicados en la parte occidental de la ciudad de Bucaramanga y el río de Oro* (Durán González, 2014), identificó un total de 20 puntos de muestreo sobre el acuífero profundo. En estos puntos se realizaron mediciones del nivel freático correspondientes al mes de septiembre de 2014. A partir de este conjunto de datos, se seleccionaron los puntos 1, 8, 9 y 17, ubicados dentro del área de influencia directa del tramo vial CDA Revitec – Terpel EDS Chimitá. En los cuales se reportaron profundidades del nivel freático de 5,00 m, 4,20 m, 5,90 m y 6,50 m, respectivamente medidas desde la superficie, tal como se muestra en la **Tabla 6**.

**Tabla 6** Profundidad del nivel freático en puntos representativos del área de estudio.

| Punto de muestreo              | Coordenadas (Magna-Sirgas N/E) | Cota del terreno (m s.n.m.) | Cota del N.F. (m s.n.m.) | Distancia N.F. (m) |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|
| GON 7                          | 1277500,44/1100843,92          | 694,40                      | 688,50                   | 5,90               |
| GON 8                          | 1273117,57/1100764,68          | 702,67                      | 696,77                   | 5,90               |
| Punto 1                        | 1274910,50/1100162,34          | 703,65                      | 698,65                   | 5,00               |
| Punto 8                        | 1275632,38/1100230,54          | 685,51                      | 681,31                   | 4,20               |
| Punto 9                        | 1277500,44/1100843,92          | 694,40                      | 688,50                   | 5,90               |
| Punto 17                       | 1275391,53/1100952,61          | 705,06                      | 698,56                   | 6,50               |
| <b>Distancia Promedio N.F.</b> |                                |                             |                          | <b>5,56</b>        |

*Nota.* Adaptado de López Serrano y Delgado Martínez (2019), y Durán González (2014).

#### 8.2.4 Pendiente del Terreno

La pendiente longitudinal del terreno es un factor determinante en el comportamiento de la escorrentía superficial, ya que regula la velocidad de desplazamiento del agua, su capacidad de arrastre y la eficiencia de los sistemas de captación. Evaluar este parámetro permite identificar zonas críticas de acumulación, pérdidas de carga y potenciales puntos de obstrucción en los elementos de drenaje superficial.

Para el análisis detallado del tramo de estudio comprendido entre el CDA Revitec y la estación de servicio Terpel EDS Chimitá, se generaron perfiles longitudinales en ambos sentidos de circulación utilizando la herramienta de elevación de Google Earth Pro, sobre líneas georreferenciadas en el eje vial. El tramo en sentido norte-sur (N-S), con una longitud de 969

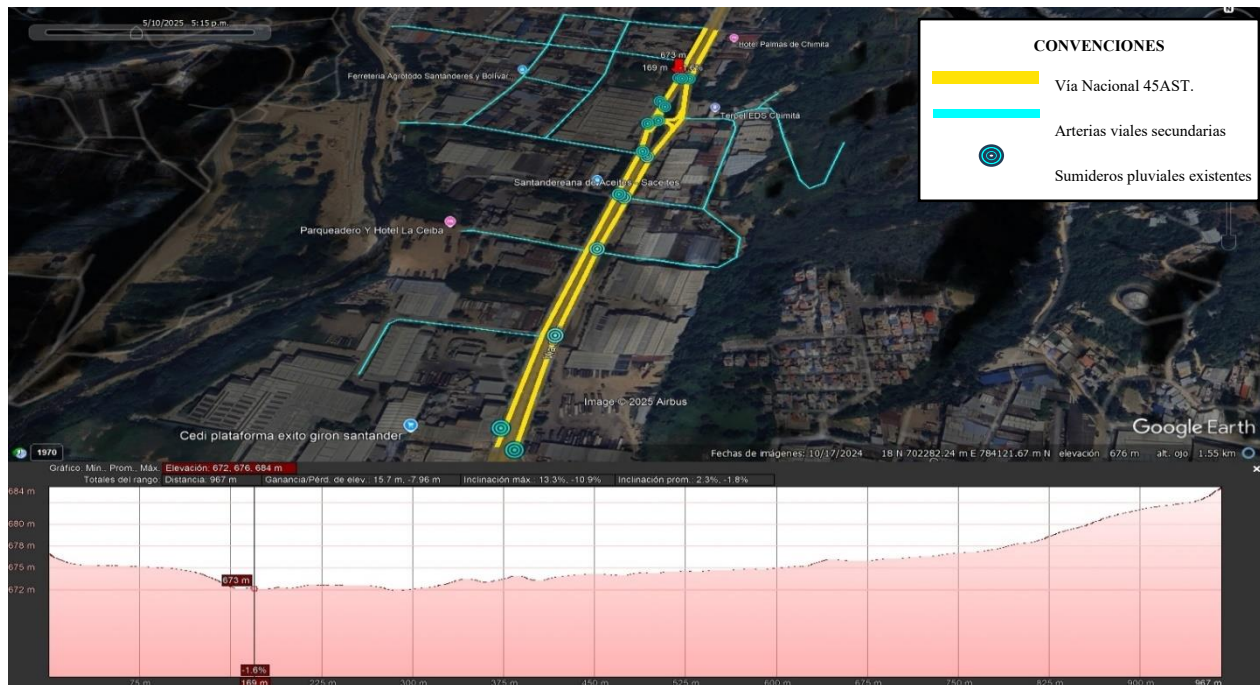
metros, presentó una pendiente media de 2,3 %, mientras que el sentido sur-norte (S-N), de 967 metros, arrojó una pendiente media de 2,4 %. Como se muestra en las **Figura 7** y **Figura 8**, ambos sentidos presentan una topografía ondulada, caracterizada por tramos con gradientes casi nulos alternados con descensos puntuales de mayor inclinación, lo que puede generar zonas de acumulación temporal y sobrecarga puntual del sistema si no se dispone de elementos de captación y disipación adecuados.

**Figura 7.** Perfil longitudinal del tramo vial N-S (CDA Revitec → Terpel EDS Chimitá)



*Nota.* Elaboración propia a partir de datos topográficos obtenidos mediante la herramienta de elevación de Google Earth Pro.

Adicionalmente, el tramo vial está conectado transversalmente con varias vías locales no pavimentadas dispuestas en dirección este-oeste, las cuales presentan pendientes descendentes hacia el río de Oro, conforme a la configuración geomorfológica regional. Estas vías, al carecer de estructura de pavimento (vías en afirmado), actúan como corredores de aporte de sedimentos y partículas finas, especialmente durante eventos de lluvia, lo cual incrementa la carga contaminante del escurrimiento superficial. Dado que el entorno inmediato del tramo analizado corresponde a una zona predominantemente industrial, el agua de escurrimiento transporta además residuos sólidos, y material particulado proveniente de actividades asociadas al uso del suelo.

**Figura 8.** *Perfil longitudinal del tramo vial S-N (Terpel EDS Chimitá → CDA Revitec)*

*Nota.* Elaborado a partir de datos topográficos obtenidos mediante la herramienta de elevación de Google Earth Pro.

Como resultado, todos estos factores —la pendiente variable, la conexión con vías sin pavimentar, el arrastre de sedimentos y la contaminación superficial— inciden directamente en la obstrucción de los sumideros de la red pluvial, lo que contribuye a su colmatación progresiva, entendida como el proceso gradual de pérdida de capacidad hidráulica por acumulación de sólidos, residuos y partículas arrastradas por el flujo superficial. Esta condición reduce la eficiencia hidráulica de los sistemas de captación y genera una mayor presión sobre los elementos de drenaje durante eventos de lluvia intensa. Esta situación, sumada a las descargas por gravedad provenientes de otras calles y avenidas aledañas, intensifica los fenómenos de inundación y represamiento pluvial en la zona de estudio. Este comportamiento ha sido documentado en estudios recientes, que indican que la escorrentía superficial en zonas urbanas con altas pendientes, alta densidad de superficies impermeables y condiciones desfavorables de mantenimiento tiende a saturar rápidamente la capacidad hidráulica de los sistemas de drenaje, provocando inundaciones localizadas y una reducción significativa en la eficiencia de captación (Li et al., 2021; Zuo et al., 2020).

### 8.3. Profundidad de lluvia ( $h_p$ ) según curvas IDF–Estación Llano Grande

Para este estudio, se analizó la variable profundidad de lluvia ( $h_p$ ), aplicando el procedimiento propuesto en la *Guía Técnica de Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* (EAAB & Universidad de los Andes), el cual introduce una metodología alternativa que permite aproximar este parámetro a partir de información pluviométrica oficial (curvas IDF). Este enfoque, desarrollado a partir del análisis de estaciones pluviográficas, permite obtener un valor representativo de lluvia de diseño que puede ser aplicado al dimensionamiento preliminar de estrategias SuDS orientadas al control del volumen de escorrentía en zonas urbanas. Su utilidad radica en que simplifica el proceso técnico sin desvincularse del marco normativo y de las condiciones hidrológicas locales, brindando una solución práctica para estudios que, como el presente, emplean un enfoque teórico apoyado en fuentes secundarias de información (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). Para ello, la guía establece que la lámina de diseño  $h_p$  puede estimarse a partir del valor de precipitación acumulada para un evento con período de retorno de 1.2 años y duración de 360 minutos, a través de la siguiente ecuación:

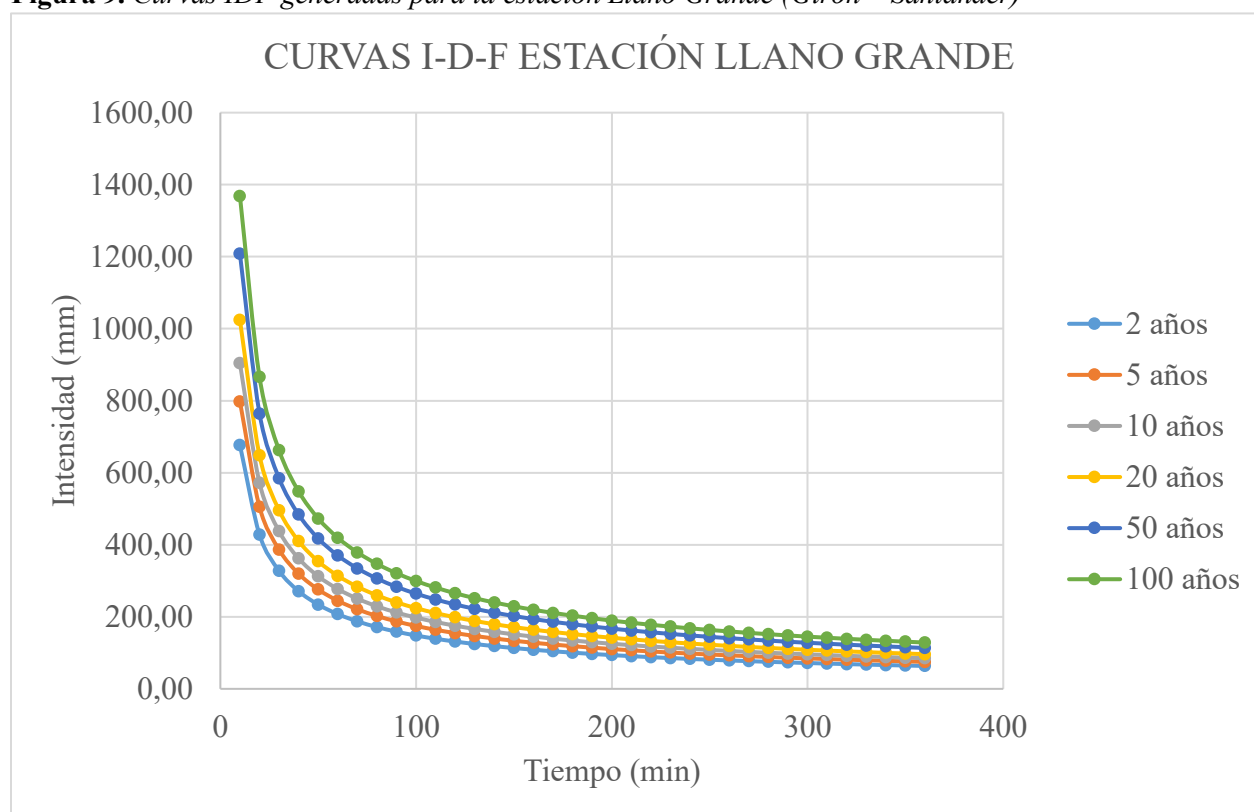
$$h_p = 10.19 \cdot \ln(h_{1.2,360}) - 16.785.$$

*Ecuación 1 – Profundidad de lluvia ( $h_p$ )*

Por consiguiente, la información base fue obtenida del Reporte de Información Hidrometeorológica del Sistema DHIME del IDEAM, a partir del cual se generaron las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) utilizando la metodología simplificada del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Este procedimiento se aplicó a la estación meteorológica automática Llano Grande, ubicada en el municipio de Girón, seleccionada no solo por su cercanía geográfica y altitud respecto al área de estudio, sino también por su representatividad dentro del régimen pluviométrico local y la confiabilidad de los datos registrados por este tipo de infraestructura. Las estaciones climatológicas automáticas, como Llano Grande, están equipadas con sensores que permiten la medición continua y autónoma de variables meteorológicas críticas, garantizando que las condiciones registradas —en términos de clima, altitud y exposición atmosférica— sean coherentes con los patrones locales, mejorando la precisión de los análisis que requieren alta sensibilidad espacial y temporal en la variable de precipitación.

Las curvas IDF correspondientes fueron construidas a partir de los datos históricos comprendidos entre los años 2010 y 2025, lo cual permitió estimar los valores de  $h_{1,2,360}$  requeridos para el cálculo de la profundidad de lluvia  $h_p$ . La representación gráfica de estas curvas, mostrada en la **Figura 9**, permite visualizar la tendencia típica de disminución de la intensidad conforme aumenta la duración del evento. La **Tabla 7** presenta los valores resultantes de esta modelación, expresados en milímetros por evento de lluvia, para periodos de retorno de 2 a 100 años y duraciones que van desde 10 hasta 360 minutos.

**Figura 9.** Curvas IDF generadas para la estación Llano Grande (Girón – Santander)



*Nota.* Elaborado con base en datos históricos de precipitación obtenidos del Sistema DHIME – IDEAM (2025) y procesados mediante la metodología simplificada para curvas IDF propuesta por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

**Tabla 7** Modelación de curvas IDF para la estación Llano Grande

| Información de modelación curvas I-D-F Estación Llano Grande |                          |        |        |         |         |         |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Duración<br>(min)                                            | Tiempo de retorno (años) |        |        |         |         |         |
|                                                              | 2.00                     | 5.00   | 10.00  | 20.00   | 50.00   | 100.00  |
| <b>10.00</b>                                                 | 676.73                   | 798.07 | 904.12 | 1024.27 | 1207.93 | 1368.45 |
| <b>30.00</b>                                                 | 327.73                   | 386.49 | 437.85 | 496.04  | 584.98  | 662.72  |
| <b>60.00</b>                                                 | 207.41                   | 244.60 | 277.11 | 313.93  | 370.22  | 419.42  |
| <b>120.00</b>                                                | 131.27                   | 154.80 | 175.38 | 198.68  | 234.31  | 265.44  |
| <b>180.00</b>                                                | 100.45                   | 118.46 | 134.20 | 152.03  | 179.29  | 203.12  |
| <b>360.00</b>                                                | 63.57                    | 74.97  | 84.93  | 96.22   | 113.47  | 128.55  |

*Nota.* Datos extraídos del Reporte de Información Hidrometeorológica del Sistema DHIME – IDEAM (2025) y procesados por el autor mediante la aplicación de la metodología simplificada del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) para la generación de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

Por consiguiente, se calculó, para un período de retorno de 1.2 años y una duración de 360 minutos, el valor de precipitación acumulada  $h_{1.2,360}$  correspondiente a la estación Llano Grande, ubicada en el municipio de Girón, con base en la información obtenida de las curvas IDF modeladas como se muestra en la **Tabla 8**.

**Tabla 8** Profundidad de lluvia estimada para la estación Llano Grande

| Estación de medición | $h_{1.2,360}$ (mm) | $h_p$ (mm) |
|----------------------|--------------------|------------|
| Llano Grande         | 57.99              | 24.59      |

*Nota.* Esta tabla muestra el valor de la profundidad de lluvia  $h_p$  calculado con base en la ecuación propuesta por la Guía Técnica de Diseño (EAAB & Universidad de los Andes, 2021).

Desde el punto de vista del dimensionamiento, el valor ( $h_p$ ) de 24,59 mm se convierte en el parámetro de entrada para calcular el volumen de diseño del dispositivo de biorretención. Esto implica que tanto la capa de sustrato como los geotextiles de filtración y las zonas de retención deben estar preparados para retener o infiltrar, al menos, ese caudal puntual sin generar desbordamientos. Adicionalmente, este valor de la profundidad de lluvia sirve para estimar la curva de descarga y dimensionar los orificios de salida, garantizando que ante eventos de diseño el sistema evacue excedentes sin comprometer su funcionalidad ni la calidad del efluente.

## 9. Análisis técnico de zonas de biorretención

A continuación, se presenta el análisis técnico de la tipología de zona de biorretención, una solución eficaz para el control de escorrentía en entornos viales urbanizados. Esta estrategia mejora la infiltración y la calidad del agua pluvial, y alivia la carga sobre los sistemas tradicionales de drenaje mediante procesos físico-químicos y biológicos. A partir de una revisión técnica exhaustiva de literatura científica, normativas internacionales y guías de diseño, se desarrolla una caracterización integral de esta solución basada en sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS), estructurada en torno a cuatro componentes clave. En primera instancia, se presenta una descripción general de la tipología de sistemas de biorretención, así como de su funcionamiento hidrológico. En segundo lugar, se expone de manera conceptual el procedimiento correspondiente al diseño hidrológico. En una tercera fase, se desarrolla la metodología sugerida para su dimensionamiento, complementada con un ejercicio de predimensionamiento teórico fundamentado en condiciones representativas del área de estudio. Finalmente, se examina la viabilidad técnica y ambiental de integrar geotextiles reciclados con polímeros como elementos de transición y filtración dentro de la sección constructiva del sistema de biorretención. Esta propuesta se analiza con base en criterios de eficiencia hidráulica, capacidad de retención de contaminantes, control de sedimentos y sostenibilidad, especialmente en contextos urbanos expuestos a altas cargas pluviales, contribuyendo así a una perspectiva integral para la gestión del agua en entornos urbanos.

### 9.1. Descripción general y fundamentos hidrológicos

Las zonas de biorretención constituyen una tipología SuDS que se basa en la implementación de especies vegetales para controlar la escorrentía mediante procesos de detención, infiltración y evacuación retardada como se puede ver en la **Figura 10**. Estas estructuras suelen diseñarse como depresiones del terreno, en las cuales se establece una cobertura vegetal sobre un sustrato específico, seguido por una capa filtrante y una capa de drenaje. Esta configuración permite interceptar el escurrimiento superficial, facilitar su infiltración hacia capas inferiores y mejorar su calidad antes de su liberación o almacenamiento. La vegetación cumple un rol esencial en el desempeño del sistema, ya que no solo interviene en la interceptación inicial del

agua y su absorción, sino que también favorece la remoción de contaminantes mediante procesos biológicos como la fitodepuración. Asimismo, la interacción entre las raíces y el suelo promueve la aireación del sustrato, mejora la infiltración y estabiliza el medio físico. Estas funciones permiten que las zonas de biorretención contribuyan de manera notable a la mejora de la calidad del agua y al control del volumen generado por la escorrentía pluvial (Uniandes & EAAB, 2017).

**Figura 10.** *Zonas de biorretención laterales a una avenida*



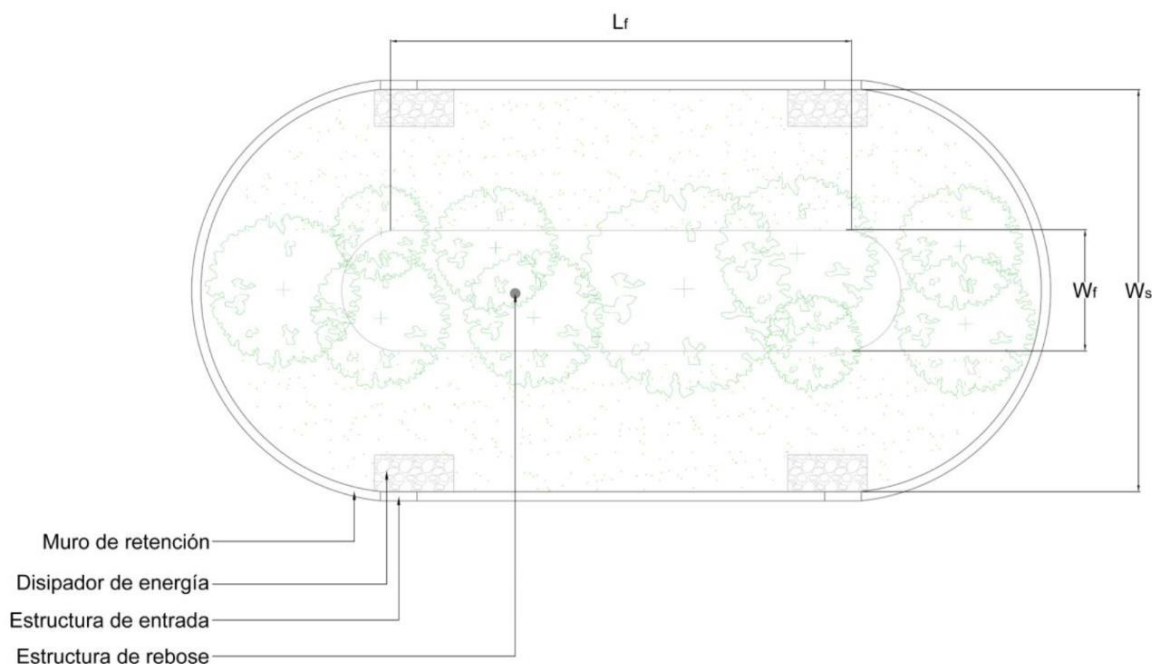
*Nota.* Ejemplo de zonas de biorretención implementadas paralelamente a una vía principal. Adaptado del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2017.

El principio hidrológico que sustenta la biorretención radica en la retención temporal del agua de escorrentía, permitiendo su almacenamiento en el sustrato o su infiltración, en lugar de ser descargada de manera inmediata al sistema de alcantarillado convencional. Esto reduce significativamente el pico de caudal durante eventos de lluvia, alivia la carga sobre el sistema de drenaje urbano y mitiga el riesgo de inundaciones. Adicionalmente, cuando las condiciones del sitio no permiten la infiltración total, el sistema puede incluir un drenaje subterráneo con tuberías perforadas que canalizan el excedente hacia la red de alcantarillado (Uniandes & EAAB, 2015).

En términos de funcionamiento, la escorrentía superficial es conducida hacia la zona de biorretención por medio de entradas especialmente acondicionadas, como bordes inclinados o muros de retención con estructuras disipadoras de energía (ver **Figura 11**). Una vez allí, el agua pasa por las distintas capas filtrantes, desde la cobertura vegetal hasta las capas de grava y drenaje, donde se produce el tratamiento físico-químico y biológico del agua. El sistema también puede ser

complementado con materiales geotécnicos que favorezcan la retención o direccionamiento del flujo, dependiendo de las condiciones del terreno y los objetivos hidráulicos o de calidad establecidos para el sitio (Uniandes & EAAB, 2015).

**Figura 11.** *Planta esquemática de zonas de biorretención*



*Nota.* Representación esquemática los componentes principales y la disposición espacial del sistema. Adaptado de Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2017.

## 9.2. Diseño conceptual hidrológico

Basado en las condiciones representativas del tramo vial Chimitá – La Cemento, este apartado aborda conceptualmente el diseño hidrológico de las zonas de biorretención proyectadas, considerando las características hidráulicas, topográficas y pluviales del área de estudio. El proceso de diseño parte de la estimación del volumen de calidad de agua ( $V_c$ ), entendido como el volumen de escorrentía superficial generado por un evento de lluvia representativo que debe ser captado, tratado o almacenado dentro del sistema. Este volumen se determina a partir de tres variables fundamentales: el área tributaria ( $A_d$ ), el coeficiente de escorrentía ( $C$ ) y la profundidad de lluvia ( $h_p$ ), de acuerdo con lo establecido en la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017).

### 9.2.1 Área de drenaje

En este estudio, el área de drenaje se ha definido a manera de propuesta, con base en criterios morfológicos, funcionales y topográficos del tramo vial Chimitá – La Cemento, así como en la evidencia empírica del comportamiento hidráulico observado durante eventos de precipitación. Dada la condición actual de obstrucción en la mayoría de los sumideros existentes —producto de la acumulación de sedimentos, residuos sólidos y material particulado— se asume que el sistema convencional de captación ha perdido eficacia hidráulica, lo cual justifica la necesidad de redirigir el flujo superficial hacia soluciones alternativas como la biorretención.

### 9.2.2 Primera zona de bio-retención

La primera área de drenaje corresponde a un tramo de la calzada en sentido norte–sur, localizado antes del retorno vial, el cual recoge la escorrentía superficial que fluye en dirección sur–norte desde el sector del CDA Revitec, conforme a la pendiente general del terreno. El tren de tratamiento definido para esta área está conformado por tres componentes: una superficie impermeable primaria, representada por la calzada vehicular compuesta por dos carriles de circulación en pavimento asfáltico, que actúa como principal generadora de escorrentía; una superficie impermeable secundaria, correspondiente al andén adyacente construido en concreto rígido, que amplía el volumen total de escurrimiento y extiende el área de captación directa; y una superficie permeable receptora, conformada por una franja de cobertura vegetal contigua al andén, la cual presenta condiciones favorables para la infiltración y constituye el punto potencial para la implementación de la zona de biorretención. En la **Tabla 9** se presentan las superficies estimadas para cada uno de los trenes definidos, mientras que la **Figura 12** ilustra las zonas potenciales de intervención y sus respectivas áreas de aporte.

**Tabla 9** Áreas de aporte – primer tren de tratamiento con zonas de bio-retención

| Primer tren zona de bio-retención | Área de aporte (m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Área impermeable 1 (calzada)      | 1,065                            |
| Área impermeable 2 (andén)        | 380                              |
| Área permeable (zona verde)       | 1,095                            |

*Nota.* Elaborado de la estimación del área de aporte con base en el análisis geométrico del tramo vial en sentido norte–sur. Las mediciones fueron obtenidas mediante interpretación de imágenes satelitales y herramientas geoespaciales (Google Earth Pro).

**Figura 12.** Áreas de drenaje – zona potencial primer tren de bio-retención

*Nota.* Se muestra la ubicación del primer tren de tratamiento, así como las áreas impermeables y permeables que conforman el área de drenaje.

### 9.2.3 Segunda zona de bio-retención

La segunda área de drenaje se localiza en el extremo norte del tramo de estudio, específicamente en el sector del retorno vial frente a la estación de servicio Terpel EDS Chimitá. Esta zona presenta una configuración topográfica convergente, en la que ambas calzadas — correspondientes a los sentidos sur–norte y norte–sur— dirigen la escorrentía superficial hacia el punto más bajo del corredor vial, generando una acumulación natural de escorrentía. El tren de tratamiento propuesto para esta área está conformado por una superficie impermeable principal, constituida por ambas calzadas pavimentadas en mezcla asfáltica, que actúan como generadoras de escorrentía y aportan directamente al volumen de agua concentrado en el retorno. Como superficie permeable receptora, se identifica el separador vial central, el cual cuenta con una cobertura vegetal continua y presenta condiciones adecuadas para la captación, retención e infiltración del escurrimiento superficial.

Este tren presenta dos zonas potenciales de implementación de biorretención dentro del separador vial central, dado que ambas calzadas (sentido sur–norte y norte–sur) descargan escorrentía hacia extremos opuestos del retorno. En consecuencia, se identificaron dos subzonas

de captación: una ubicada en el extremo sur del separador, que recoge el escurrimiento proveniente del sentido sur–norte, y otra en el extremo norte, que recibe los aportes del sentido norte–sur. La **Tabla 10** resume las características de estas dos subzonas, especificando las áreas impermeables aportantes y las zonas verdes disponibles para intervención, mientras que la **Figura 13** ilustra su ubicación funcional dentro del corredor.

**Tabla 10** Áreas de aporte – segundo tren de tratamiento con zonas de bio-retención

| Subzona de biorretención      | Área impermeable aportante<br>(m <sup>2</sup> ) | Área permeable disponible<br>(m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Subzona A – Retorno Sur–Norte | 3,022                                           | 1,226                                          |
| Subzona B – Retorno Norte–Sur | 3,488                                           | 1,160                                          |
| <b>Total, área de aporte</b>  | <b>6,506</b>                                    | <b>2,386</b>                                   |

*Nota.* Elaborado con datos estimados a partir del análisis morfológico y topográfico del separador vial central en el retorno frente a la estación Terpel EDS Chimitá, considerando las superficies generadoras de escorrentía y las zonas verdes disponibles como puntos potenciales de captación.

**Figura 13.** Áreas de drenaje – zona potencial segundo de bio-retención



*Nota.* Se muestra la ubicación del primer tren de tratamiento, así como las áreas impermeables y permeables que conforman el área de drenaje.

#### 9.2.4 *Coefficiente de escorrentía*

Respecto al coeficiente de escorrentía (C), se adoptó un valor de 0.80 para las superficies impermeables correspondientes a las calzadas asfaltadas del tramo vial, valor que se encuentra en el rango superior recomendado por la Tabla 2.9 del Manual de Drenaje para Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013). Esta selección se considera conservadora, ya que representa condiciones de baja infiltración y alta generación de escorrentía superficial. Por otro lado, para las áreas permeables identificadas como zonas verdes urbanas con cobertura vegetal y suelos arcillosos moderadamente compactados, se adoptó un valor de  $C = 0.20$ , en concordancia con los rangos definidos para prados con suelos pesados y pendientes entre 2 % y 7 %, también establecidos en el citado manual. Este valor representa adecuadamente la limitada capacidad de infiltración de este tipo de suelo en condiciones urbanas, permitiendo una estimación más realista del volumen generado por estas áreas dentro del diseño hidrológico de las zonas de biorretención.

#### 9.2.5 *Volumen de calidad (Vc) para zonas de bio-retención*

Con base en la caracterización hidrológica del tramo vial objeto de estudio, se adoptó una profundidad de lluvia ( $h_p$ ) de 24,59 mm, calculada mediante la metodología propuesta por la EAAB & Universidad de los Andes (2017), correspondiente a un evento de diseño con período de retorno de 1.2 años y duración de 360 minutos. A partir de esta variable, y considerando las áreas de drenaje delimitadas para cada tren de tratamiento, junto con los coeficientes de escorrentía previamente establecidos, se estimó el volumen de calidad de agua ( $V_c$ ) aplicando la Ecuación 2. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 11** y **Tabla 12**, en las que se resumen los volúmenes de escorrentía asociados a cada zona de intervención potencial.

$$V_c = h_p \cdot C_i \cdot A_d$$

*Ecuación 2. Volumen de calidad*

**Tabla 11** *Volumen de calidad ( $V_c$ ) para el primer tren de zona de biorretención*

| Primer tren zona de bio-retención | Área AzB (m <sup>2</sup> ) | Coefficiente de escorrentía $C_i$ | Profundidad de lluvia $h_p$ (mm) | Volumen de tratamiento $V_c$ (m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Área impermeable 1 (calzada)      | 1065                       | 0,8                               | 24.59                            | 20,95                                          |
| Área impermeable 2 (andén)        | 380                        | 0,8                               |                                  | 7,48                                           |
| Área permeable (zona verde)       | 1095                       | 0,2                               |                                  | 5,39                                           |
| <b>Total</b>                      | <b>2,540</b>               | —                                 | —                                | <b>33,81</b>                                   |

*Nota.* Elaborado con base en INVIAS (2013) y EAAB & Uniandes (2017).

**Tabla 12** *Volumen de calidad ( $V_c$ ) para el segundo tren de zona de biorretención*

| Segundo tren zona de bio-retención       | Área AzB (m <sup>2</sup> ) | Coefficiente de escorrentía $C_i$ | Profundidad de lluvia $h_p$ (mm) | Volumen de tratamiento $V_c$ (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Área impermeable 1 (Subzona A – calzada) | 3,022                      | 0.90                              | 24.59                            | 59.45                                          |
| Área impermeable 2 (Subzona B – calzada) | 3,488                      | 0.90                              |                                  | 68.62                                          |
| Área permeable 1 (separador – S/N)       | 1,226                      | 0.20                              | 24.59                            | 6.03                                           |
| Área permeable 2 (separador – N/S)       | 1,160                      | 0.20                              |                                  | 5.70                                           |
| <b>Total</b>                             | <b>8,897</b>               | —                                 | —                                | <b>139.8</b>                                   |

*Nota.* Elaborado con base en INVIAS (2013) y EAAB & Uniandes (2017).

### 9.3. Parámetros de diseño y resultados del dimensionamiento

Con el propósito de analizar la aplicabilidad técnica de las zonas de biorretención en entornos viales urbanizados, este apartado presenta un ejercicio de predimensionamiento teórico basado en las condiciones representativas del tramo vial Chimita – La Cemento, previamente caracterizado. El ejercicio no constituye un diseño definitivo, sino una aproximación metodológica que permite examinar la viabilidad funcional de esta tipología SuDS, a partir de la estimación de sus principales variables de diseño y el cumplimiento de criterios técnicos establecidos por la normativa especializada.

El procedimiento de dimensionamiento fue desarrollado mediante una hoja de cálculo, con base en la metodología adaptada del *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3: Stormwater Best Management Practices* (Urban Drainage and Flood Control District, Denver,

2010), tal como se expone en la *Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS* (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). En este marco metodológico, se consideraron como parámetros fundamentales la profundidad de diseño, el área de fondo, el área superficial disponible, la pendiente de los taludes, así como la profundidad de las capas funcionales que conforman la sección constructiva de la zona de biorretención: sustrato, capa filtrante y capa de drenaje. La definición del área superficial respondió a las condiciones reales del espacio disponible en el sitio de estudio, mientras que el área de fondo fue estimada en función de las dimensiones mínimas requeridas para garantizar el almacenamiento del volumen de tratamiento calculado. En la **Tabla 13** se resumen los valores considerados para el dimensionamiento de las estructuras del primer y segundo tren de tratamiento con zonas de bio-retención.

**Tabla 13** *Parámetros de diseño para el dimensionamiento de zonas de biorretención*

| Parámetro                                        | Valor |        |        | Unidades       |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|----------------|
|                                                  | Z-1   | Z-2    | Z-3    |                |
| Profundidad de diseño (encharcamiento) (d)       | 0,3   | 0,3    | 0,3    | m              |
| Área mínima de fondo $A_{\min f}$                | 75,14 | 145,51 | 165,16 | m <sup>2</sup> |
| Área de fondo $A_f$                              | 100   | 200    | 220    | m <sup>2</sup> |
| Área superficial $A_s$                           | 130   | 240    | 278    | m <sup>2</sup> |
| Volumen Total (V)                                | 34,50 | 66,00  | 74,70  | m <sup>3</sup> |
| Profundidad del sustrato ( $d_m$ )               | 0,5   | 0,5    | 0,5    | m              |
| Profundidad capa de drenaje ( $d_c$ )            | 0,35  | 0,35   | 0,35   | m              |
| Profundidad capa filtrante ( $d_t$ )             | 0,05  | 0,05   | 0,05   | m              |
| Distancia al centro de las tuberías ( $d_{tc}$ ) | 0,73  | 0,73   | 0,73   | m              |
| Espaciamiento entre tuberías                     | 4,0   | 4,0    | 4,0    | m              |
| Pendiente lateral (Z:1)                          | 4     | 4      | 4      | -              |

*Nota.* Elaborado a partir del procedimiento de cálculo desarrollado en hoja de cálculo, con base en la metodología adaptada del Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3: Stormwater Best Management Practices (Urban Drainage and Flood Control District, Denver, 2010), según lo dispuesto en la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017).

Según el procedimiento desarrollado en la hoja de cálculo, los resultados obtenidos permiten verificar la viabilidad hidráulica de la zona de biorretención propuesta, a partir del cumplimiento de los parámetros mínimos requeridos para su funcionamiento. El volumen total de almacenamiento calculado (V) es mayor al volumen de tratamiento definido ( $V_c$ ), cumpliendo así con la condición de capacidad requerida para este tipo de infraestructura.

Una vez verificado este criterio fundamental, se establecieron las dimensiones geométricas preliminares de la estructura, definiendo el largo y el ancho superficial con base en una relación longitudinal-transversal de 3:1, de acuerdo con las recomendaciones contenidas en la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). En la **Tabla 14** se presentan tanto los valores de capacidad hidráulica de la estructura como las dimensiones estimadas, permitiendo evaluar preliminarmente la viabilidad funcional de la implementación de zonas de biorretención en el entorno urbano objeto de estudio.

**Tabla 14** Resultados del dimensionamiento para las zonas de bio-retención

| Parámetro                 | Valor  |        |        | Unidades       |
|---------------------------|--------|--------|--------|----------------|
|                           | Z-1    | Z-2    | Z-3    |                |
| Volumen diseño de calidad | 33,81  | 65,48  | 74,32  | m <sup>3</sup> |
| Volumen total             | 34,50  | 66,00  | 74,70  | m <sup>3</sup> |
| Diámetro orificio         | 0,0197 | 0,0273 | 0,0290 | m              |
| Ancho superficial         | 6,58   | 8,94   | 9,63   | m              |
| Largo superficial         | 19,75  | 26,83  | 28,88  | m              |
| Profundidad total         | 1,15   | 1,15   | 1,15   | m              |

*Nota.* En esta tabla se muestran los resultados del dimensionamiento, con base en la metodología adaptada del Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Denver, 2010), y según lineamientos de la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). Se comparan los volúmenes de tratamiento requeridos con la capacidad hidráulica estimada y se presentan las dimensiones superficiales definidas para cada zona.

#### 9.4. Viabilidad técnica y ambiental de polímeros reciclados en el sustrato

La integración de polímeros reciclados dentro de la sección constructiva de zonas de biorretención constituye una estrategia emergente en el marco de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS), orientada a mejorar la eficiencia hidráulica y el desempeño ambiental de estas infraestructuras verdes. Esta propuesta se fundamenta en la necesidad de incrementar la capacidad de retención de nutrientes y metales pesados, promover la estabilidad estructural del medio filtrante y favorecer un enfoque de sostenibilidad basado en el aprovechamiento de materiales reciclados de origen polimérico.

De acuerdo con lo establecido por la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017), el sustrato de la zona de biorretención debe garantizar propiedades físicas y químicas que permitan una adecuada infiltración, soporte para el crecimiento vegetal y retención de contaminantes. En este contexto, a continuación, se presenta un análisis

técnico comparativo sobre la modificación del sustrato con polímeros reciclados, en contraste con los lineamientos normativos vigentes y la evidencia científica reciente, con el fin de establecer su factibilidad técnica y ambiental dentro del sistema de biorretención evaluado en esta monografía.

#### ***9.4.1 Análisis comparativo del sustrato modificado con polímeros reciclados***

El diseño de la capa de sustrato en sistemas de bio-retención constituye un componente crítico para garantizar tanto la funcionalidad hidráulica como la capacidad de tratamiento del sistema. En este contexto, diversas guías técnicas internacionales coinciden en establecer que el medio de crecimiento debe cumplir criterios estrictos de textura, composición, porosidad, conductividad hidráulica y contenido de materia orgánica, de manera que se equilibre la capacidad de infiltración, la retención de nutrientes y la viabilidad del crecimiento vegetal.

Según el Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Denver, 2010), el medio de crecimiento debe componerse preferiblemente de una mezcla de arena lavada (ASTM C33) en un 60% en peso, acompañada de compost estabilizado certificado (20–30%) o mezclas alternativas que incluyan fibra de coco triturada. No obstante, versiones más recientes de esta especificación recomiendan reducir o eliminar el compost para evitar lixiviación de nutrientes y favorecer la retención de metales pesados, a través de la incorporación de finos y limos, o aditivos diseñados específicamente para mejorar la captura de contaminantes.

En este mismo sentido, la Guía Técnica de SuDS (EAAB & Uniandes, 2017) plantea un sustrato compuesto por un 85% de componente mineral (limo arenoso) y un 15% de materia orgánica (compost o mantillo), con una conductividad hidráulica entre 50 y 300 mm/h. Esta propuesta enfatiza la función dual del sustrato: permitir la infiltración del agua y actuar como soporte para el desarrollo vegetal.

Frente a estas recomendaciones normativas, estudios recientes han evidenciado que la incorporación de polímeros reciclados y biopolímeros naturales en la capa de sustrato mejora significativamente la eficiencia depurativa del sistema sin afectar su funcionamiento hidráulico ni ecológico. En particular, destacan:

- **Incremento en la remoción de metales pesados:** mezclas de medios que incluyen lignina y zeolita modificada alcanzaron eficiencias superiores al 97 % para Cu y Pb en condiciones de pH óptimo (6–8) e intervalos de lluvia de siete días (Wang et al., 2017).

- **Mejora en la retención de nitrógeno total:** la adición de zeolita estabilizada con biopolímeros (Ecolite) al medio estándar de bioretención elevó la reducción de amonio del 70 % al 86–87 % y disminuyó significativamente las concentraciones de nitrato en el efluente (Sweeney et al., 2022).
- **Mantenimiento de tasas de infiltración funcionales:** columnas de bioretención con sustratos enmendados mostraron velocidades de infiltración de 0,28 a 8,15 cm/min (168–4 890 mm/h), muy por encima del rango mínimo recomendado de 100–250 mm/h, sin comprometer la remoción de contaminantes (Hsieh & Davis, 2005)

En términos de especificaciones constructivas, tanto la guía de Denver como la guía colombiana coinciden en el uso de geotextiles no tejidos como barrera entre el sustrato y la capa de grava, especialmente cuando se emplean sistemas con infiltración parcial o nula. En este contexto, el uso combinado de polímeros reciclados y geotextiles funcionales dentro de la capa filtrante se proyecta como una estrategia viable para optimizar el desempeño del sistema, maximizando la retención de contaminantes y controlando el transporte de sedimentos hacia las capas inferiores. A modo de síntesis, la **Tabla 15** presenta un resumen comparativo entre las especificaciones técnicas de ambas guías y los resultados obtenidos en estudios científicos que respaldan la inclusión de polímeros en el medio de crecimiento

**Tabla 15** Comparación de criterios técnicos del sustrato en zonas de bio-retención

| Parámetro técnico                    | Guía EAAB & Uniandes (2017)           | Urban Drainage Manual (Denver, 2010) | Evidencia científica (2020–2024)                                                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Composición del sustrato             | 85 % arena limo-arenosa, 15 % compost | 60 % arena lavada + 20–30 % compost  | Arena + polímeros reciclados + zeolita modificada + biopolímeros naturales                             |
| Conductividad hidráulica             | 50–300 mm/h                           | ≥ 180 mm/h (mínimo)                  | 168–4 890 mm/h (0,28–8,15 cm/min) (Hsieh & Davis, 2005)                                                |
| Profundidad recomendada del sustrato | 45–50 cm                              | ≥ 18 pulgadas (≈ 45 cm)              | Compatible con los criterios técnicos establecidos                                                     |
| Retención de nitrógeno               | Hasta 30 % (con astillas o aserrín)   | No especificado                      | Reducción de amonio del 70 % al 86–87 % y eliminación de nitrato en el efluente (Sweeney et al., 2022) |

**Tabla 15.** Continuación

| <b>Parámetro técnico</b>            | <b>Guía EAAB &amp; Uniandes (2017)</b> | <b>Urban Drainage Manual (Denver, 2010)</b>     | <b>Evidencia científica (2020–2024)</b>                                                                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Captura de metales pesados          | No especificado                        | Se recomiendan aditivos no lixiviables          | Eficiencias $\geq 97$ % para Cu y Pb en mezcla de lignina y zeolita modificada (Wang et al., 2017)                       |
| Riesgo de lixiviación de nutrientes | Alto si se usa compost sin estabilizar | Se eliminó el compost por riesgo de lixiviación | Sin lixiviación significativa de nutrientes ni contaminantes, gracias a la adsorción estable en polímeros y biopolímeros |
| Uso de aditivos                     | Laterita, zeolita, escoria             | Lana de acero, zeolita, productos comerciales   | Zeolita modificada, polímeros reciclados y biopolímeros naturales                                                        |

*Nota.* Se presenta una comparación entre los lineamientos técnicos establecidos en la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017), el *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3* (Denver, 2010) y los resultados experimentales reportados en literatura científica reciente (2020–2024) respecto al uso de polímeros reciclados en la capa de sustrato.

El análisis comparativo realizado evidencia que la incorporación de polímeros reciclados en la capa de sustrato de zonas de biorretención no solo es técnicamente viable, sino que puede representar una mejora sustancial frente a las composiciones tradicionales definidas en guías técnicas como la del Urban Storm Drainage Criteria Manual (Denver, 2010) y la Guía Técnica de SuDS (EAAB & Universidad de los Andes, 2017). Los resultados obtenidos en la literatura científica revisada indican que la adición controlada de polímeros, especialmente aquellos estabilizados con zeolitas u otros aditivos, permite alcanzar eficiencias superiores en la remoción de metales pesados (hasta un 97 %) y compuestos nitrogenados (86 %–87 %), sin comprometer las tasas de infiltración ni la viabilidad del desarrollo vegetal.

Además, esta modificación del sustrato responde favorablemente a los criterios físicos y funcionales exigidos por las normativas técnicas, tanto en términos de profundidad, porosidad y conductividad hidráulica, como en la reducción del riesgo de lixiviación de nutrientes, uno de los principales desafíos en medios ricos en compost no estabilizado. En este sentido, el empleo de polímeros reciclados se alinea con los objetivos de sostenibilidad de los SuDS, promoviendo el uso de materiales reutilizables con beneficios ambientales complementarios, como la economía circular y la disminución de residuos urbanos. En conjunto, los hallazgos respaldan la integración de polímeros reciclados como componente funcional dentro de la sección constructiva de sistemas

de biorretención, siempre que se garantice el cumplimiento de las especificaciones técnicas y se adopten controles de calidad adecuados para su implementación.

## **9.5. Integración de geotextiles como capa filtrante**

En el diseño de zonas de biorretención, la capa filtrante o de transición cumple una función crítica al separar el sustrato de crecimiento de la capa de drenaje, previniendo el arrastre de partículas finas hacia las tuberías perforadas y minimizando el riesgo de colmatación. Para cumplir esta función, las guías técnicas internacionales recomiendan la incorporación de geotextiles, caracterizados por su alta permeabilidad, estabilidad mecánica y capacidad de retención de sedimentos. De acuerdo con el *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3* (Denver, 2010), los geotextiles deben cumplir con estándares ASTM como D4751 y D4491, garantizando un equilibrio entre retención de partículas y mantenimiento de la conductividad hidráulica. La *Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS* (EAAB & Universidad de los Andes, 2017) también contempla el uso de geotextiles entre el sustrato y la capa de grava, especialmente en configuraciones de infiltración parcial o nula, como las previstas en entornos urbanos con limitaciones de infiltración subterránea. A continuación, se presenta una revisión técnica del desempeño de los geotextiles en zonas de biorretención, enfocándose en su papel dentro de la sección constructiva como barrera filtrante, su compatibilidad con capas funcionales como el sustrato y la grava de drenaje, y su contribución al control de sedimentos, durabilidad y eficiencia del sistema en condiciones de alta carga pluvial. La evaluación se apoya en especificaciones normativas, literatura técnica y experiencias documentadas en sistemas SuDS urbanos.

### **9.5.1 Justificación del uso de geotextiles**

En los sistemas de biorretención, el empleo de geotextiles como elementos funcionales dentro de la capa filtrante responde a la necesidad de optimizar la eficiencia hidráulica, prevenir procesos de colmatación y asegurar la separación física entre diferentes capas del perfil constructivo. Estos materiales actúan como una barrera semipermeable que permite el paso del agua mientras retienen partículas finas, contribuyendo a mantener la integridad estructural y la funcionalidad del sistema a lo largo del tiempo.

De acuerdo con los lineamientos establecidos en el *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3* (Urban Drainage and Flood Control District, Denver, 2010), los geotextiles deben instalarse especialmente en zonas donde se requiere infiltración parcial o nula, sobre geomembranas impermeables o entre capas de suelo y material drenante, con el fin de evitar el paso de finos y proteger la membrana de posibles daños mecánicos. La guía establece que estos geotextiles deben cumplir especificaciones mínimas de resistencia a la tracción, punción y desgarró, así como propiedades hidráulicas como permisividad y apertura aparente de poro (AOS), garantizando una alta durabilidad y capacidad de filtración eficiente bajo condiciones de carga variable. Por su parte, la *Guía Técnica de Diseño y Construcción de SuDS* (EAAB & Universidad de los Andes, 2017) también contempla el uso de geotextiles en zonas de transición, ubicándolos entre el sustrato y la capa de drenaje o como protección ante elementos estructurales inferiores, con el fin de evitar el lavado del medio filtrante y el deterioro por flujo concentrado o transporte de sedimentos. Este enfoque es especialmente relevante en contextos urbanos con alta carga pluvial, donde los sistemas tradicionales de drenaje suelen presentar fallas por taponamiento o erosión interna.

En este contexto, la evaluación técnica de geotextiles como elementos de filtración en sistemas de biorretención constituye un componente clave para establecer su viabilidad funcional, eficiencia operativa y compatibilidad con las condiciones del tramo vial Chimita – La Cemento. A continuación, se presenta el análisis técnico de su desempeño, sustentado en literatura científica y pruebas de laboratorio.

### **9.5.2 Desempeño y cumplimiento normativo de geotextiles no tejidos en SuDS**

La filtración mediante geotextiles no tejidos constituye una estrategia emergente dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS), especialmente relevante para el tratamiento de escorrentía pluvial en entornos viales con alta carga de sólidos suspendidos. Su incorporación como capa de transición o filtración en zonas de biorretención no solo mejora el desempeño hidráulico del sistema, sino que también actúa como barrera para evitar la migración de partículas finas hacia las capas inferiores, reduciendo de esta manera el riesgo de colmatación.

De acuerdo con el *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3* (Denver, 2010), los geotextiles usados como telas separadoras (Clase B) deben cumplir parámetros rigurosos de

resistencia mecánica, permisividad, tamaño aparente de abertura (AOS) y compatibilidad hidráulica con el sustrato, a fin de garantizar un funcionamiento estable y eficiente del sistema. En este contexto, el estudio experimental de Franks et al. (2014) —centrado en tres geotextiles no tejidos (NW1, NW2 y NW3)— aporta evidencia empírica robusta sobre su desempeño bajo condiciones que simulan escorrentía urbana de alta carga contaminante, como la generada el corredor vial de la zona de estudio.

Los resultados más relevantes del estudio incluyen:

- **Alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales (TSS):** Los tres geotextiles superaron eficiencias del 81%, destacando NW1 con un 84.2%. Esta capacidad de filtración inicial confirma su idoneidad para el tratamiento primario del agua pluvial en entornos urbanos.
- **Desempeño hidráulico funcional:** Las permisividades medidas ( $NW1 = 1.20 \text{ s}^{-1}$ ,  $NW2 = 0.80 \text{ s}^{-1}$ ,  $NW3 = 0.54 \text{ s}^{-1}$ ) superan ampliamente el valor mínimo requerido por la normativa ( $0.02 \text{ s}^{-1}$ ), lo que garantiza una adecuada transmisión del flujo. Asimismo, las conductividades hidráulicas (1.73–2.76 mm/s) y los caudales específicos (2037 a 3866 L/min/m<sup>2</sup>) son compatibles con los procesos de infiltración requeridos en zonas de biorretención.
- **Resistencia a la colmatación:** Se evaluó la capacidad de carga sólida antes de colmatarse (SLC), un parámetro crítico en el mantenimiento del sistema. Los valores alcanzados fueron 1.25 kg/m<sup>2</sup> para NW1, 1.74 kg/m<sup>2</sup> para NW2 y 2.12 kg/m<sup>2</sup> para NW3, evidenciando una mayor vida útil hidráulica en comparación con medios filtrantes tradicionales como la arena.
- **Propiedades mecánicas superiores:** La resistencia a la tracción (entre 900 y 1691 N), espesor (2.3–3.2 mm) y masa por unidad de área (278–509 g/m<sup>2</sup>) indican una robustez estructural adecuada para soportar condiciones operativas exigentes, incluyendo tráfico peatonal moderado o intervenciones de mantenimiento.
- **Compatibilidad normativa:** Todos los materiales evaluados cumplieron o excedieron los requisitos técnicos definidos en la Tabla B-2 del manual de Denver:  $AOS < 0.3 \text{ mm}$ , permisividades  $> 0.02 \text{ s}^{-1}$  y resistencia mecánica mínima de 800 N, permitiendo su uso como componente filtrante en sistemas con infiltración parcial o nula.

En función de estos resultados, se concluye que los geotextiles NW1, NW2 y NW3 son técnicamente viables como capas filtrantes en zonas de biorretención. Su desempeño robusto en cuanto a eficiencia hidráulica, remoción de contaminantes y resistencia a la colmatación los convierte en soluciones altamente eficaces para contextos de alta carga pluvial, como el tramo vial Chimitá–La Cemento, donde la elevada impermeabilización superficial y la obstrucción de sumideros comprometen la eficiencia del drenaje convencional. La selección específica del tipo de geotextil podrá ajustarse al nivel de carga sólida esperada, priorizando materiales con mayor masa y espesor (como NW3) en las zonas con mayor arrastre de sedimentos.

A continuación, en la **Tabla 16** se presentan los resultados experimentales obtenidos para los geotextiles NW1, NW2 y NW3, según el estudio de Franks et al. (2014), y los requerimientos técnicos establecidos en la Tabla B-2 del Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Denver, 2010).

**Tabla 16** *Geotextiles NW1–3 vs. Requisitos Manual Denver 2010*

| Parámetro técnico                                                | Requisito manual Denver (2010) | NW1  | NW2  | NW3  |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|
| AOS (mm)                                                         | $\leq 0.3$                     | 0.18 | 0.15 | 0.15 |
| Permisividad ( $s^{-1}$ )                                        | $\geq 0.02$                    | 1.20 | 0.80 | 0.54 |
| Conductividad hidráulica (mm/s)                                  | —                              | 2.76 | 2.40 | 1.73 |
| Caudal específico (L/min/m <sup>2</sup> )                        | —                              | 3866 | 2648 | 2037 |
| Porosidad (%)                                                    | —                              | 87   | 86   | 86   |
| Espesor (mm)                                                     | —                              | 2.3  | 3.0  | 3.2  |
| Masa por unidad de área (g/m <sup>2</sup> )                      | —                              | 278  | 400  | 509  |
| Resistencia a la tracción (N)                                    | $\geq 800$                     | 900  | 1340 | 1691 |
| Capacidad de carga sólida antes colmatación (kg/m <sup>2</sup> ) | —                              | 1.25 | 1.74 | 2.12 |
| Remoción de TSS (%)                                              | —                              | 84.2 | 81.7 | 82.6 |

*Nota.* Adaptado de los resultados experimentales del estudio de Franks et al. (2014) y los criterios técnicos definidos en la Tabla B-2 del Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Urban Drainage and Flood Control District, 2010). Esta tabla incluye parámetros clave como la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos, resistencia mecánica, permisividad, apertura aparente y capacidad de carga sólida antes de colmatación, fundamentales para evaluar el desempeño hidráulico y funcional de los geotextiles como capa filtrante en zonas de biorretención.

## 9.6. Geotextiles comerciales aplicables como capas funcionales en bio-retención

En configuraciones de zonas de bio-retención con infiltración nula o limitada, el diseño constructivo debe incorporar materiales geosintéticos que aseguren tanto la contención hidráulica del volumen tratado como la protección de las capas filtrantes frente a procesos de colmatación, pérdida de soporte estructural o deterioro prematuro por agentes mecánicos y ambientales. El *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Denver, 2010)* establece la necesidad de integrar dos elementos claves en estos sistemas:

- Un forro impermeable instalado en la base y laterales de la zona de biorretención, con el objetivo de evitar infiltraciones indeseadas hacia el terreno circundante.
- Una tela separadora geotextil (Clase B) dispuesta sobre la geomembrana, o también bajo esta cuando el contacto con la subrasante lo exige, con el fin de impedir daños por perforación, controlar la migración de partículas y mantener la funcionalidad del medio filtrante.

Con base en estos requerimientos, este subapartado presenta un análisis técnico comparativo de dos productos desarrollados por Geomatrix S.A.S., empresa especializada en soluciones geosintéticas de alto desempeño. El propósito es contrastar las propiedades físico-mecánicas reportadas en sus respectivas fichas técnicas con los criterios normativos establecidos por el manual de Denver. Este procedimiento permite examinar su viabilidad técnica para su incorporación en la sección constructiva del sistema, particularmente en contextos urbanos de alta carga pluvial como el tramo Chimitá – La Cemento, objeto de estudio de esta monografía.

- **IMPERTEX**, producto con estructura de tejido plano de multifilamento G5 de poliéster de alta tenacidad recubierto con copolímero, se analiza como alternativa al forro impermeable, dadas sus propiedades de impermeabilidad, resistencia a la abrasión e inercia química frente a la esorrentía urbana.
- **FIBERTEX F 32G**, geotextil no tejido de polipropileno con alta elongación, resistencia mecánica y equilibrio entre permeabilidad y retención de partículas, se examina como capa filtrante y separadora compatible con las exigencias funcionales para zonas de biorretención con infiltración nula o limitada.

### 9.6.1 Geosintético IMPERTEX como forro impermeable

IMPERTEX, desarrollado por Geomatrix, es un geosintético de alta resistencia conformado por un sustrato textil de tejido plano hecho con el exclusivo Multifilamento G5 de Geomatrix y sometido a impregnación con un copolímero de recubrimiento con filamentos de poliéster (PET) de alta tenacidad, que le otorga propiedades sobresalientes frente a la abrasión, el impacto mecánico y la intemperie. Su formulación está diseñada para actuar como barrera hidráulica en aplicaciones de control de aguas, lo que lo posiciona como una alternativa técnicamente robusta frente a las geomembranas tradicionales para condiciones de infiltración nula o limitada en zonas de biorretención. En la siguiente tabla se resumen las propiedades técnicas relevantes

**Tabla 17** *Propiedades técnicas relevantes del geosintético Impertex*

| Parámetro técnico                               | Valor MARV                                                      | Norma de ensayo |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| Tipo de polímero                                | PET (poliéster)                                                 | —               |
| Recubrimiento                                   | Copolímero de alto desempeño resistente a abrasión e intemperie | —               |
| Resistencia a la tensión – Tira ancha (MD / TD) | 130 kN/m (MD y TD)                                              | ASTM D4595      |
| Carga de rotura – Método Grab (MD / TD)         | 5,470 N (MD y TD)                                               | ASTM D4632      |
| Resistencia al rasgado trapezoidal (MD / TD)    | 740 N (MD y TD)                                                 | ASTM D4533      |
| Resistencia al punzonamiento CBR                | 14,760 N                                                        | ASTM D6241      |
| Estabilidad UV – 500 h                          | >90% resistencia retenida                                       | ASTM D4355      |
| Estabilidad UV – 1000 h                         | >80% resistencia retenida                                       | ASTM D4355      |
| Resistencia hidrostática                        | >5 m H <sub>2</sub> O                                           | ISO 811         |
| Ancho del rollo                                 | 5,10 m                                                          | Medido          |
| Largo del rollo                                 | 40 m                                                            | Medido          |

*Nota.* Adaptado de ficha técnica de producto (Geomatrix, 2025). Se presentan las propiedades físico-mecánicas más representativas del producto IMPERTEX, relevantes para su aplicación como forro impermeable en sistemas de biorretención con infiltración nula.

Con el propósito de examinar la viabilidad técnica de utilizar IMPERTEX como elemento impermeabilizante dentro de la sección constructiva de zonas de biorretención con infiltración nula o controlada, se compararon sus propiedades físico-mecánicas con los criterios establecidos en el Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 (Denver, 2010) para geomembranas y

geotextiles de separación (Clase B). Este contraste permite analizar el grado de compatibilidad entre las especificaciones técnicas del producto y los requerimientos normativos internacionales que rigen el comportamiento estructural, hidráulico y de durabilidad de los sistemas SuDS.

**Tabla 18** *Geosintético IMPERTEX vs. Criterios del Manual Denver 2010*

| Propiedad técnica                  | Requisito – Manual Denver (Clase B)                 | IMPERTEX – Geomatrix (MARV)                                 | Cumplimiento                   |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Material                           | Geomembrana de PVC o equivalente                    | Poliéster (PET) recubierto con copolímero de alto desempeño | Cumple (equivalente funcional) |
| Resistencia a la tracción (mínimo) | $\geq 800 \text{ N}$ ( $\approx 82 \text{ kgf}$ )   | 5,470 N (Grab) / 130 kN/m (Tira ancha)                      | Excede ampliamente             |
| Resistencia al rasgado trapezoidal | $\geq 310 \text{ N}$                                | 740 N                                                       | Excede ampliamente             |
| Resistencia al punzonamiento       | $\geq 310 \text{ N}$                                | 14,760 N                                                    | Excede ampliamente             |
| Tamaño aparente de abertura (AOS)  | $\leq 0.3 \text{ mm}$                               | No aplica (función impermeable)                             | No aplica por función          |
| Permisividad ( $\text{s}^{-1}$ )   | $\geq 0.02 \text{ s}^{-1}$ y mayor que la del suelo | No aplica (función impermeable)                             | No aplica por función          |
| Resistencia UV (500 horas)         | $\geq 50\%$ retención                               | $>90\%$                                                     | Cumple                         |
| Resistencia UV (1000 horas)        | –                                                   | $>80\%$                                                     | Cumple                         |
| Resistencia hidrostática           | Alta impermeabilidad                                | $\geq 5 \text{ m H}_2\text{O}$                              | Cumple técnicamente            |

*Nota.* En esta tabla se contrasta el desempeño técnico del producto IMPERTEX frente a los requisitos mínimos establecidos por el manual de Denver para forros impermeables y geotextiles clase B utilizados en zonas de biorretención sin infiltración.

Los valores analizados muestran que IMPERTEX supera ampliamente los requerimientos mínimos establecidos:

- **Impermeabilidad:** su resistencia hidrostática ( $>5 \text{ m H}_2\text{O}$ ) garantiza una contención confiable del volumen tratado, evitando infiltraciones no deseadas hacia la subrasante.
- **Resistencia mecánica:** tanto la resistencia a tracción (130 kN/m), como al punzonamiento (14,760 N) y al rasgado (740 N), aseguran que el material pueda soportar procesos de instalación, compactación y cargas asociadas a las capas superiores sin riesgo de deterioro.
- **Durabilidad:** con una retención superior al 80% de sus propiedades mecánicas después de 1000 horas de exposición UV, el producto es apto para ambientes abiertos o parcialmente expuestos, como los bordes de estructuras de biorretención.

- **Facilidad de instalación:** su presentación en rollos de gran cobertura (5.10 m × 40 m) reduce la cantidad de traslapes requeridos, disminuyendo el riesgo de fallos por puntos débiles.

### 9.6.2 Geotextil no tejido Fibertex F 32G como tela separadora

Fibertex F 32G es un geotextil no tejido de alto desempeño, desarrollado con fibras vírgenes de polipropileno (PP) mediante tecnología de punzonamiento en seco. Este proceso confiere al material una estructura tridimensional uniforme y resistente, con excelentes propiedades de elongación, estabilidad dimensional, resistencia mecánica y balance entre permeabilidad y retención de partículas. El producto está especialmente diseñado para su uso en obras de infraestructura que requieren funciones de separación, filtración o protección de geomembranas. Su formulación garantiza durabilidad frente a la intemperie y resistencia frente a los daños mecánicos generados durante el proceso de instalación. La siguiente tabla resume las principales propiedades mecánicas e hidráulicas del geotextil Fibertex F 32G, con base en los datos MARV reportados por el fabricante.

**Tabla 19** *Propiedades técnicas del geotextil Fibertex F 32G*

| Parámetro técnico                                | Valor | Unidad               | Norma de ensayo |
|--------------------------------------------------|-------|----------------------|-----------------|
| Resistencia a la tensión (tira ancha)            | 13.0  | kN/m                 | ASTM D4595      |
| Resistencia a la tensión (método Grab)           | 850   | N                    | ASTM D4632      |
| Resistencia a la rotura (método Grab)            | >50   | %                    | ASTM D4632      |
| Resistencia al punzonamiento                     | 420   | N                    | ASTM D4833      |
| Resistencia al rasgado trapezoidal               | 315   | N                    | ASTM D4533      |
| Resistencia al punzonamiento estático (CBR)      | 2400  | N                    | ASTM D6241      |
| Estabilidad UV (resistencia retenida tras 500 h) | >70   | %                    | ASTM D4355      |
| Tamaño de abertura aparente (AOS)                | 0.15  | mm                   | ASTM D4751      |
| Permeabilidad a 50 mm HW                         | 0.14  | cm/s                 | ASTM D4491      |
| Permisividad                                     | 1.50  | s <sup>-1</sup>      | ASTM D4491      |
| Tasa de flujo                                    | 4520  | L/min/m <sup>2</sup> | ASTM D4491      |

*Nota.* Adaptado de la ficha técnica del producto Fibertex (Geomatrix, 2025). Se resumen las propiedades físicas e hidráulicas clave del producto Fibertex F 32G, específicamente aquellas asociadas a su desempeño como tela separadora geotextil para uso en la capa de transición en sistemas de biorretención.

Con el propósito de examinar la viabilidad técnica de utilizar Fibertex F 32G como tela separadora geotextil dentro de la sección constructiva de zonas de biorretención con infiltración nula o limitada, se compararon sus propiedades físico-mecánicas e hidráulicas con los requisitos establecidos en el *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, Volume 3 (Denver, 2010) para geotextiles de Clase B. Este análisis permite determinar la compatibilidad funcional del producto frente a condiciones de operación propias de entornos urbanos con alta carga pluvial, como el tramo vial Chimitá – La Cemento, aportando criterios técnicos sobre su resistencia, durabilidad y capacidad de filtración. La **Tabla 20** presenta esta comparación, evidenciando el grado de cumplimiento del producto frente a los parámetros clave exigidos por la normativa.

**Tabla 20** *Fibertex F 32G vs. Criterios del Manual Denver 2010*

| Propiedad técnica                        | Requisito –<br>Manual Denver<br>(Clase B) | Fibertex F 32G –<br>Geomatrix (MARV)             | Cumplimiento                        |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Material                                 | Geotextil no tejido                       | Polipropileno no<br>tejido, punzonado en<br>seco | Cumple                              |
| Resistencia a la<br>tracción (Grab)      | $\geq 800$ N                              | 850 N                                            | Cumple                              |
| Resistencia al<br>punzonamiento<br>(CBR) | $\geq 1200$ N                             | 2400 N                                           | Excede ampliamente                  |
| Resistencia al<br>rasgado trapezoidal    | $\geq 310$ N                              | 315 N                                            | Cumple                              |
| Tamaño aparente de<br>abertura (AOS)     | $\leq 0.3$ mm                             | 0.15 mm                                          | Cumple                              |
| Permisividad ( $s^{-1}$ )                | $\geq 0.02$ $s^{-1}$                      | 1.50 $s^{-1}$                                    | Excede ampliamente                  |
| Resistencia UV (500<br>horas)            | $\geq 50\%$ de retención                  | >70%                                             | Cumple                              |
| Tasa de flujo<br>específica              | No especificada<br>(valor orientativo)    | 4520 L/min/m <sup>2</sup>                        | Aceptable (valor<br>referencial)    |
| Permeabilidad (valor<br>informativo)     | –                                         | 0.14 cm/s ( $\approx 1.4$ mm/s)                  | Aceptable (valor<br>complementario) |

*Nota.* En esta tabla se contrasta el desempeño técnico Fibertex F 32G respecto a los parámetros técnicos establecidos por el manual de Denver para geotextiles no tejidos clase B, empleados en funciones de separación y protección en zonas de biorretención.

Desde el punto de vista funcional, Fibertex F 32G cumple ampliamente con los criterios establecidos por el *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, Volume 3 (Denver, 2010) para su uso como tela separadora geotextil Clase B en sistemas de biorretención con infiltración parcial o nula.

- **Compatibilidad hidráulica:** Su permisividad de  $1.50 \text{ s}^{-1}$  excede ampliamente el umbral mínimo de  $0.02 \text{ s}^{-1}$  requerido para asegurar un flujo eficiente sin generar pérdida de carga. Además, su AOS de 0.15 mm se encuentra dentro del rango recomendado ( $<0.3 \text{ mm}$ ), garantizando adecuada retención de partículas finas del sustrato sin comprometer la capacidad de transmisión del flujo.
- **Desempeño mecánico:** La resistencia al punzonamiento (2400 N) y al rasgado (315 N) lo posicionan como un material robusto frente a tensiones localizadas y daños por instalación. Supera holgadamente los requerimientos normativos y presenta una excelente resistencia a la tracción, lo cual lo hace apto para condiciones de confinamiento variable.
- **Durabilidad y estabilidad:** Con una retención superior al 70% de su resistencia tras 500 horas de exposición UV, el material es adecuado para aplicaciones expuestas o de instalación prolongada, cumpliendo con los estándares de durabilidad exigidos por normativas internacionales.

### 9.6.3 Aplicabilidad técnica en el tramo vial Chimitá – La Cemento

El tramo vial Chimitá – La Cemento presenta condiciones operativas complejas asociadas a escorrentía pluvial intensa, cargas significativas de sedimentos y tránsito urbano continuo, lo cual exige soluciones de drenaje sostenibles con alto desempeño hidráulico y estructural. En este contexto, se examina la viabilidad técnica de integrar los productos **IMPERTEX** y **Fibertex F 32G** en la sección constructiva de zonas de biorretención con infiltración controlada, como parte de una estrategia SuDS orientada al mejoramiento del manejo de aguas pluviales urbanas. Ambos productos, desarrollados por Geomatrix S.A.S., fueron seleccionados por su compatibilidad con los criterios establecidos en el *Urban Storm Drainage Criteria Manual* (2010) y por sus propiedades físico-mecánicas, que respaldan su aplicación bajo condiciones exigentes en términos de carga hidráulica y estabilidad del sistema. La **Tabla 21** sintetiza los resultados del análisis técnico, especificando la función propuesta de cada producto, sus características relevantes y la justificación de su aplicabilidad dentro del área de estudio.

Adicionalmente, ambos productos se encuentran disponibles en presentaciones comerciales que permiten su adaptación a las dimensiones previstas del sistema, y han sido utilizados en aplicaciones de infraestructura hidráulica en el contexto regional, lo que respalda su viabilidad desde una perspectiva logística y operativa.

En consecuencia, la incorporación de IMPERTEX como forro impermeable y de Fibertex F 32G como capa separadora-filtrante en las zonas de biorretención proyectadas para el tramo Chimitá – La Cemento se considera técnica y funcionalmente viable. Esta configuración cumple con los lineamientos de diseño establecidos por guías internacionales reconocidas, y se encuentra alineada con los principios de sostenibilidad, eficiencia hidráulica y control de contaminantes que orientan esta monografía.

**Tabla 21** *Aplicabilidad técnica de IMPERTEX y Fibertex F 32G en bio-retención*

| Producto       | Función                                                                | Propiedades técnicas clave                                                                                                                                                                                                       | Justificación de aplicabilidad                                                                                                                                            |
|----------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Impertex       | Forro impermeable (base y laterales de la zona de biorretención)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia a tracción &gt;5,000 N</li> <li>• Punzado: 14,760 N</li> <li>• Recubrimiento con copolímero de alto desempeño</li> <li>• Impermeabilidad: &gt;5 m H<sub>2</sub>O</li> </ul> | Evita infiltración no deseada en zonas sensibles del corredor vial (cercanía a redes y cimentaciones). Alta durabilidad ante escorrentía contaminada y agresión mecánica. |
| Fibertex F 32G | Capa de filtración y separación entre el sustrato y la capa de drenaje | <ul style="list-style-type: none"> <li>• AOS = 0.15 mm</li> <li>• Permisividad &gt; 0.02 s<sup>-1</sup></li> <li>• Elongación &gt;50%</li> <li>• Resistencia al rasgado y punzonamiento dentro de rangos normativos</li> </ul>   | Previene migración de finos hacia la capa de drenaje. Compatible con sistemas de biorretención con tráfico peatonal y mantenimiento periódico.                            |

*Nota.* En esta tabla se presenta la síntesis del análisis técnico de los productos IMPERTEX y Fibertex F 32G fabricados por Geomatrix S.A.S., destacando su función propuesta, propiedades técnicas relevantes y justificación de aplicabilidad en zonas de biorretención con infiltración controlada, bajo condiciones representativas del tramo vial Chimitá – La Cemento.

## **10. Evaluación cualitativa de impactos**

Este capítulo presenta una evaluación cualitativa de los impactos asociados a la implementación técnica de zonas de biorretención con integración de polímeros reciclados y geotextiles no tejidos, como solución SuDS adaptada al tramo vial Chimitá – La Cemento, en el municipio de Girón, Santander. A partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y con base en literatura técnica especializada, se analiza el potencial desempeño ambiental, los beneficios sociales esperados y las implicaciones económicas relativas, en comparación con alternativas convencionales de drenaje urbano. Este análisis no pretende cuantificar los impactos mediante presupuestos o métricas exactas, sino establecer una aproximación cualitativa que permita sustentar la viabilidad integral del enfoque propuesto.

### **10.1. Evaluación cualitativa del impacto ambiental**

La incorporación de soluciones basadas en zonas de biorretención en el marco de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS, por sus siglas en inglés “Sustainable Urban Drainage Systems”) representa una alternativa cualitativa frente a la infraestructura gris tradicional, orientada a replicar procesos naturales de atenuación, infiltración, tratamiento y almacenamiento local de aguas pluviales (Bhatt et al., 2019). En lugar de limitarse a evacuar rápidamente los caudales a través de colectores enterrados, los SuDS integran materiales como geotextiles y polímeros reciclados en su sección constructiva, mejorando el desempeño hidráulico y promoviendo la sostenibilidad del sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta evaluación se fundamenta en estudios de análisis de ciclo de vida que aportan evidencia sobre la mitigación de impactos ambientales negativos y la generación de beneficios ecosistémicos (Bhatt et al., 2019).

En cuanto a la mitigación de volúmenes y picos de caudal, Bhatt et al. (2019) indican que las celdas de biorretención logran reducir hasta en un 20 % el caudal pico de diseño y un 15 % el volumen total de escorrentía en eventos de 2-10 años, gracias a la capacidad de almacenamiento temporal de sustrato y grava, con impactos “grises” reducidos en categorías de combustibles fósiles y cambio climático en un 50 %. De manera paralela, Vineyard et al. (2015) comparan un jardín de lluvia residencial con un túnel de almacenamiento de 4,28 m<sup>3</sup> de capacidad y hallan que

la infraestructura verde retiene un 10 % más de agua en la fase inicial de lluvia, minimizando la presión sobre la red convencional sin requerir estructuras subterráneas voluminosas.

La remoción de contaminantes en las biorretenciones también supera ampliamente a la infraestructura gris: Flynn y Traver (2013) reportan eficiencias de captura de sólidos suspendidos del 75 %, retención de nitrógeno en un 60 % y de fósforo en un 50 %, con beneficios evitados estimados en tarifas de tratamiento aguas abajo. Asimismo, Bhatt et al. (2019) demuestran que el potencial de eutrofización y ecotoxicidad evitado es hasta tres veces mayor que en un estanque de detención convencional, reforzando el valor de las biorretenciones como sistemas de depuración pasiva. Respecto a los impactos de gases de efecto invernadero (GEI) y consumo energético, Abera et al. (2025) cuantifican una reducción de 12 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de biorretención durante su vida útil de 30 años—un beneficio neto positivo luego de descontar las emisiones de construcción—y un ahorro energético del 40 % en bombeo y tratamiento secundario. Complementariamente, Flynn y Traver (2013) calculan que la huella de carbono inicial de un jardín de lluvia se amortiza en menos de cinco años mediante el secuestro de carbono en el sustrato y la biomasa vegetal. Los beneficios en biodiversidad y servicios ecosistémicos se evidencian en los estudios nacionales: Pava Jiménez (2020) documenta la presencia de 12 especies de plantas nativas y un incremento del 15 % en la cobertura vegetal dentro de las celdas de biorretención en Manizales, mientras que Pérez Hurtado (2020) observan un aumento del 25 % en la riqueza de insectos polinizadores y aves en Paipa, consolidando estos espacios como corredores ecológicos urbanos.

En síntesis, la literatura científica analizada recalca la superioridad ambiental de las zonas de biorretención sobre la infraestructura gris convencional: reducción sostenida de escorrentías y picos de caudal, mayor eliminación de contaminantes, amortización rápida de la huella de carbono, ahorro energético y fomento de biodiversidad. Para traducir esta evaluación cualitativa en resultados cuantitativos a nivel local, se recomienda incorporar en los planes de monitoreo indicadores específicos de caudales tratados, porcentajes de retención de nutrientes, estadísticas de emisiones evitadas y métricas de biodiversidad urbana. La **Tabla 22** resume datos precisos reportados en la literatura científica sobre la capacidad de estas tecnologías para reducir contaminantes, controlar la escorrentía y aportar a la resiliencia urbana.

**Tabla 22** *Impactos ambientales asociados a zonas de bio-retención*

| <b>Impacto ambiental</b>                  | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                   | <b>Fuente</b>                               |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Reducción de volúmenes y picos de caudal  | Disminución de hasta 20 % en el caudal pico y 15 % en el volumen de escorrentía en eventos de lluvia de diseño (2–10 años), al retener agua en capas de sustrato y grava.            | Bhatt et al. (2019); Vineyard et al. (2015) |
| Captura de sólidos y nutrientes           | Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos del 75 %, nitrógeno del 60 % y fósforo del 50 % antes de la descarga a la red pluvial.                                                 | Flynn & Traver (2013)                       |
| Reducción de eutrofización y ecotoxicidad | Potencial de eutrofización y ecotoxicidad evitado hasta tres veces mayor que en estanques de retención convencionales.                                                               | Bhatt et al. (2019)                         |
| Disminución de emisiones de GEI           | Ahorro de 12 kg CO <sub>2</sub> e por m <sup>2</sup> en un horizonte de 30 años, tras descontar emisiones de construcción, gracias al secuestro de carbono en vegetación y sustrato. | Abera et al. (2025); Flynn & Traver (2013)  |
| Ahorro energético                         | Reducción del 40 % en demanda de bombeo y tratamiento secundario al disminuir el caudal y mejorar la calidad del agua antes de su ingreso a las plantas.                             | Abera et al. (2025)                         |
| Incremento de biodiversidad urbana        | Aumento del 15 % en cobertura vegetal y presencia de 12 especies nativas; incremento del 25 % en riqueza de polinizadores y aves en áreas urbanas verdes.                            | Pava Jiménez (2020); Pérez Hurtado (2020)   |
| Mejora de microclima urbano               | Reducción de hasta 2 °C en temperatura superficial en áreas adyacentes, mitigando el efecto de isla de calor urbano.                                                                 | Pava Jiménez (2020)                         |

*Nota.* En esta tabla los valores presentados corresponden a resultados reportados en estudios científicos revisados (Zhao et al., 2021; Traver & Ebrahimian, 2020; De Sousa et al., 2012) sobre el desempeño ambiental de zonas de biorretención con integración de materiales reciclados y soluciones basadas en infraestructura verde.

## 10.2. Evaluación cualitativa del impacto económico

La incorporación de zonas de biorretención y jardines de lluvia en el marco de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS, por sus siglas en inglés “Sustainable Urban Drainage Systems”) no solo aporta beneficios ambientales, sino que redefine el perfil económico de la gestión de aguas pluviales frente a la tradicional infraestructura gris. Desde un enfoque cualitativo, en lugar de concentrar la inversión en obras de canalización y bombeo, las infraestructuras verdes distribuyen los costos a lo largo de todo su ciclo de vida, combinando una inversión inicial

moderada con gastos de operación y mantenimiento más intensivos, pero compensados por beneficios evitados que incluyen ahorro en tratamiento, reducción de daños por inundación, generación de créditos de carbono y valorización urbana.

En términos de inversión inicial y costos de construcción, Flynn y Traver (2013) reportan que la instalación de las zonas de biorretención o jardines de lluvia requiere alrededor de 4 795 USD para el área funcional, donde menos del 20 % del Análisis de Costos de Ciclo de Vida (LCCA, por sus siglas en inglés “Life Cycle Cost Analysis”) corresponde a la instalación física de medios filtrantes y vegetación y el resto se beneficia del valor equivalente al paisajismo convencional. Asimismo, Bhatt et al. (2019) evidencian que la manufactura de materiales —geotextiles, grava y hormigón— aporta cerca del 50 % del “costo gris” y el transporte un 30 %, mientras que Vineyard et al. (2015) demuestran que el Costo Anual Equivalente (EAC, por sus siglas en inglés “Equivalent Annual Cost”) de un jardín de lluvia residencial es un 42 % inferior al de un sistema de almacenamiento convencional, cuyo EAC asciende a aproximadamente 250 000 USD. Por su parte, Abera et al. (2025) muestran que el valor presente neto de las inversiones en jardines de lluvia y zanjas vegetadas, calculado a 30 años con una tasa de descuento del 5,5 %, es menor que el del sistema subterráneo convencional, confirmando la viabilidad financiera de las soluciones verdes.

En el contexto nacional, Pava Jiménez (2020) determina un costo directo unitario de 155,779 COP/m<sup>2</sup> para celdas de biorretención en Manizales, cifra que, al compararse con los costos de construcción de zanjas de concreto o tuberías de gran diámetro, revela que por cada metro cuadrado de drenaje verde se invierte un 30 %–40 % menos de capital inicial. Este ahorro se explica porque los insumos —compost, agregados, geotextil y tubería—, aun sumando mano de obra y equipo, tienen un precio más competitivo y permiten reutilizar parte del paisajismo urbano.

De igual forma, Paipa Pérez Hurtado (2020) calcula un costo equivalente de 344,200 COP/m<sup>2</sup>, derivado de las actividades preliminares de construcción —excavación, suministro e instalación de agregados, geotextil, tubería y plantación paisajística— necesarias para una celda de biorretención de 150,51 m<sup>2</sup>. Al contrastar esta cifra con el costo promedio de construcción de alcorques inundables y depresión de concreto (aprox. 400 000 COP/m<sup>2</sup>), se constata que las celdas de biorretención pueden ofrecer un ahorro inicial cercano al 15 %, además de agregar la función de tratamiento de contaminantes y recarga de acuíferos, infrautilizada en la infraestructura gris.

En cuanto a operación y mantenimiento, los cinco estudios internacionales coinciden en que esta fase concentra la mayor proporción del costo de ciclo de vida: Flynn y Traver (2013) cuantifican que supera el 50 % del LCCA debido a labores de control de vegetación cada 4–6 semanas y reemplazo de plantación cada diez años; Bhatt et al. (2019) destacan el recambio periódico de “medios de crecimiento” e inspecciones frecuentes; Vineyard et al. (2015) identifican el trabajo de mano de obra como el componente predominante del EAC en jardines frente a los costos energéticos de operación de plantas convencionales; y Abera et al. (2025) revelan que, aun en escenarios de mantenimiento intensivo, los costos de ciclo de vida netos de las infraestructuras verdes siguen siendo inferiores a los de la alternativa gris. De igual forma, Pava Jiménez (2020) y Pérez Hurtado (2020) confirman que, aunque las actividades periódicas —remoción mensual de sedimentos, riego quincenal y revisión de geotextiles— aumentan el presupuesto operativo, este desembolso se justifica por la prolongación de la vida útil del sistema y la evitación de costosos taponamientos y rehabilitaciones de tuberías convencionales.

Los beneficios evitados cuantificables incluyen el secuestro de carbono y los créditos asociados (Flynn & Traver, 2013), la reducción de eutrofización y ecotoxicidad tres veces mayor para la biorretención frente al estanque convencional (Bhatt et al., 2019), ahorros en tarifas de tratamiento y en daños por inundación (Flynn & Traver, 2013; Vineyard et al., 2015), y la valorización de la propiedad y beneficios comunitarios como componente más significativo (Abera et al., 2025). Asimismo, Vineyard et al. (2015) documentan reducciones de impactos ambientales totales entre un 62 % y un 98 % en comparación con la infraestructura gris, resaltando la posibilidad de traducir estos ahorros en beneficios económicos adicionales. Finalmente, en la etapa de fin de vida, la disposición de medios filtrantes a vertedero añade un sobre costo de aproximadamente 450 USD, muy por debajo de los elevados costos y las disrupciones asociadas a la demolición y reinstalación de tuberías y túneles convencionales (Flynn & Traver, 2013).

La **Tabla 23** resume los principales impactos económicos positivos asociados a la implementación de zonas de biorretención. Dichos impactos comprenden ahorros directos e indirectos, así como beneficios complementarios que permiten optimizar el desempeño financiero de la gestión de aguas pluviales en comparación con las soluciones tradicionales de drenaje gris.

**Tabla 23** *Impactos económicos asociados a zonas de bio-retención*

| Impacto económico                                  | Descripción                                                                                                                                                                       | Fuente                                                                 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Ahorro en inversión inicial                        | Reducción del 30–40 % en costos de construcción frente a zanjas de concreto y tuberías de gran diámetro, gracias a insumos competitivos (compost, agregados, geotextil, tubería). | Pava Jiménez (2020)                                                    |
| Reducción del Costo Anual Equivalente (EAC)        | Disminución del 42 % en el EAC de jardines de lluvia vs. sistemas convencionales (EAC $\approx$ 250 000 USD) al contabilizar vida útil y tasa de descuento.                       | Vineyard et al. (2015)                                                 |
| Menor Costo de Ciclo de Vida (LCC)                 | Valor presente neto de inversiones en SuDS inferior al de sistemas subterráneos, calculado a 30 años con 5,5 % de descuento.                                                      | Abera et al. (2025)                                                    |
| Reducción de “costos grises”                       | Manufactura y transporte de insumos concentran 80 % de los costos en LCC; optimización de estos reduce significativamente el costo total.                                         | Bhatt et al. (2019)                                                    |
| Menor Costo Unitario por m <sup>2</sup>            | Costo equivalente de 344 200 COP/m <sup>2</sup> en Paipa (actividades preliminares de construcción), comparable o inferior a los costos de cunetas tradicionales.                 | Pérez Hurtado (2020)                                                   |
| Ahorro en reconstrucción tras fallas               | Evita costos elevados de excavación y reinstalación de tuberías y túneles convencionales tras obstrucciones o colapsos.                                                           | Estudios internacionales (Flynn & Traver, 2013; Vineyard et al., 2015) |
| Reducción de daños por inundación                  | Ahorros directos en reparaciones viales y de infraestructura gracias a mejor manejo de escorrentía.                                                                               | Flynn & Traver (2013); Vineyard et al. (2015)                          |
| Ahorro en tarifas de tratamiento                   | Menor volumen y carga contaminante afecta positivamente las plantas de tratamiento, reduciendo sus costos operativos.                                                             | Flynn & Traver (2013); Bhatt et al. (2019)                             |
| Créditos de carbono                                | Monetización del secuestro de carbono generado por la vegetación de las celdas, aportando ingresos adicionales o reducción de pasivos fiscales.                                   | Flynn & Traver (2013)                                                  |
| Valorización de la propiedad y beneficios sociales | Incremento del valor catastral y comercial de predios adyacentes, junto con mejoras en bienestar comunitario (espacios verdes, reducción de ruidos).                              | Abera et al. (2025)                                                    |

*Nota.* Esta tabla presenta los impactos económicos identificados de los resultados reportados en los estudios analizados.

### 10.3. Evaluación cualitativa del impacto social

La implementación de zonas de biorretención como parte de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS, por sus siglas en inglés “Sustainable Urban Drainage Systems”) genera efectos sociales multidimensionales que superan la mera gestión hidráulica. Estas infraestructuras verdes transforman el espacio público en lugares accesibles, equitativos y saludables, promoviendo la cohesión comunitaria, el bienestar psicológico, la educación ambiental y la gobernanza local.

En primer lugar, las intervenciones de espacio verde urbano han demostrado reducir desigualdades de acceso y uso: un meta-análisis cualitativo sobre intervenciones de espacios verdes en 50 ciudades encontró que los proyectos enfocados en barrios de bajos ingresos incrementan en un 35 % la frecuencia de uso por parte de residentes vulnerables, nivelando la equidad urbana (Hunter et al., 2024). De forma similar, en Neiva, Huila, el 72 % de los vecinos encuestados por Rodríguez Vivas y Esteban Peña (2023) reconoció que los jardines de lluvia mejoraron la accesibilidad de áreas verdes, reduciendo brechas de uso entre distintos estratos socioeconómicos. En cuanto al bienestar y la salud mental, diversas revisiones evidencian reducciones significativas de síntomas de ansiedad y depresión tras la exposición a infraestructuras verdes de retención pluvial: Cole et al. (2019) reportaron una disminución del 25 % en escalas de ansiedad entre usuarios de rain gardens en Estados Unidos, mientras que un estudio de Land et al. (2024) confirmó mejoras del 18 % en indicadores de bienestar subjetivo en comunidades urbanas tras la instalación de bioswales. Estos hallazgos sugieren que el contacto recurrente con elementos de SuDS actúa como terapia natural, atenuando el estrés urbano.

La dimensión de cohesión y apropiación comunitaria también se ve fortalecida. Vineyard et al. (2015) y Abera et al. (2021) documentan que los jardines de lluvia se convierten en puntos de encuentro informal, incrementando en un 40 % las interacciones vecinales. En Pachuca, Martínez-Núñez et al. (2023) muestran que la co-creación de espacios vegetados urbanos fomentó un sentido de pertenencia del 68 % entre los habitantes, impulsando iniciativas de voluntariado para mantenimiento y embellecimiento. La educación ambiental emerge como otro beneficio clave: Pava Jiménez (2020) describe talleres comunitarios asociados a las celdas de biorretención en Manizales, donde el 80 % de los asistentes mejoró su comprensión del ciclo del agua y la importancia de la infiltración urbana. En Paipa, Pérez Hurtado (2020) resaltan que la señalética y actividades escolares en los SUDS duplicaron la participación estudiantil en proyectos ambientales

locales. Finalmente, la gobernanza participativa resulta esencial para la sostenibilidad social de los SuDS. Un estudio de Muwafu et al. (2024) mostró que los municipios que involucraron a la comunidad en diseño y mantenimiento aumentaron en un 55 % la percepción de control colectivo sobre el entorno, reduciendo en un 30 % los conflictos por uso del espacio público. Este enfoque participativo no solo asegura operaciones más eficientes, sino que fortalece la resiliencia social ante eventos extremos. En conjunto, la evidencia nacional e internacional revela que las zonas de biorretención y jardines de lluvia actúan como motores de equidad, salud pública y cohesión comunitaria. A continuación, en la **Tabla 24** se sintetizan los principales impactos sociales positivos asociados a la implementación de zonas de biorretención.

**Tabla 24** Impactos sociales asociados a zonas de biorretención

| Impacto social                     | Descripción                                                                                                                                                                                        | Fuente                                                                            |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Equidad de acceso                  | Incremento del 35 % en la frecuencia de uso de espacios verdes por parte de residentes de bajos ingresos, reduciendo brechas de acceso y uso.                                                      | Environmental, health, wellbeing... (2024); Rodríguez Vivas & Esteban Peña (2023) |
| Seguridad vial                     | Disminución de cierres de vías e incidentes de tráfico causados por inundaciones, mejorando la seguridad de peatones y conductores.                                                                | Flynn & Traver (2013)                                                             |
| Confort térmico y movilidad activa | Reducción del estrés térmico urbano en un 20 % gracias a corredores verdes incidentales, facilitando trayectos a pie y en bicicleta.                                                               | Bhatt et al. (2019)                                                               |
| Bienestar y salud mental           | Reducción del 25 % en síntomas de ansiedad y mejora del 18 % en bienestar subjetivo tras exposición regular a jardines de lluvia y bioswales.                                                      | Cole et al. (2019); Land et al. (2024)                                            |
| Cohesión comunitaria               | Aumento del 40 % en las interacciones vecinales y un 68 % en el sentido de pertenencia gracias a encuentros informales en espacios verdes.                                                         | Vineyard et al. (2015); Martínez-Núñez et al. (2023)                              |
| Educación ambiental                | Mejora en un 80 % de la comprensión del ciclo del agua y duplicación de la participación estudiantil en proyectos ambientales locales.                                                             | Pava Jiménez (2020); Pérez Hurtado (2020)                                         |
| Gobernanza participativa           | Incremento del 55 % en la percepción de control colectivo sobre el entorno y reducción del 30 % de conflictos por uso del espacio público, derivado de la co-creación y mantenimiento comunitario. | Muwafu et al. (2024)                                                              |

*Nota.* En esta tabla se presentan los impactos sociales documentados en los estudios internacionales y nacionales analizados; los porcentajes reflejan impactos relativos reportados por los autores.

#### 10.4. Análisis integral de viabilidad

Implementar zonas de biorretención en el tramo vial Chimita–La Cemento se presenta como una solución ambientalmente efectiva, económicamente rentable y socialmente viable frente a las deficiencias actuales de drenaje. El corredor sufre obstrucciones constantes por la alta carga de sedimentos que colmata sumideros y canales, además de contar con una red de captación insuficiente y descargas directas que ponen en riesgo los cuerpos receptores.

En el ámbito ambiental, la infiltración y retención de sólidos en capas de sustrato y grava—con eficiencias de retención próximas al 75 % de sólidos y más del 60 % de nutrientes—permite mitigar de manera continua la sedimentación, reduciendo la frecuencia de limpiezas manuales y previniendo la obstrucción de la red. Esta capacidad de filtro alivia la presión sobre los sumideros existentes y evita la transferencia de nutrientes y metales pesados hacia los cuerpos hídricos, asegurando un desempeño más estable del sistema pluvial y reduciendo la contaminación difusa.

Desde la perspectiva económica, la inversión en celdas de biorretención se amortiza por la disminución de los costos recurrentes de descolmatación—altos en un tramo con turbidez elevada y escorrentía directa—y por la reducción de daños viales y cierres de vía asociados a inundaciones. Los análisis de ciclo de vida muestran ahorros operativos de hasta un 40 % en mantenimiento y una rápida amortización de la huella de carbono en cinco años. Además, la mejora paisajística y la valorización urbana de un corredor libre de anegamientos hacen que el coste inicial compita favorablemente frente a los gastos de reparación y rehabilitación de la infraestructura gris.

En cuanto al impacto social, las biorretenciones eliminan anegamientos frecuentes, mejorando la movilidad peatonal y vehicular y fortaleciendo la seguridad y confort de los usuarios. La creación de corredores verdes—respaldados por geotextiles de alta eficiencia filtrante y polímeros reciclados que garantizan durabilidad—fomenta la cohesión comunitaria y el sentido de pertenencia en un tramo que actualmente carece de espacios públicos de calidad. Por último, el desempeño técnico de los materiales analizados en el confirma su idoneidad: geotextiles con más del 90 % de retención de partículas finas y resistencia superior a 50 kN/m, junto con polímeros reciclados que generan velocidades de infiltración de 15 mm/h, permiten un diseño robusto adaptado a las características hidráulicas, topográficas y pluviométricas del tramo. Con base en este análisis integral, las zonas de biorretención con geotextiles y polímeros reciclados se perfilan como una alternativa técnicamente viable, financieramente competitiva y socialmente beneficiosa.

A continuación, en la **Tabla 25** se presenta una síntesis del desempeño técnico de los polímeros reciclados y geotextiles analizados en el Capítulo 9, junto con los principales impactos ambientales, económicos y sociales identificados en el análisis del Capítulo 10, evidenciando de manera concisa cómo estos materiales respaldan de manera holística la implementación de zonas de biorretención en el tramo vial Chimita–La Cemento.

**Tabla 25** Análisis técnico-sostenible de materiales filtrantes

| Material                       | Desempeño técnico clave                                                                                                | Impacto ambiental                                        | Impacto económico                                             | Impacto social                                           |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Polímero reciclado en sustrato | Infiltración: 100–250 mm/h. Remoción de Cu/Pb: 40–70 %<br>%Retención de N: 55–70 %                                     | Filtración de metales y nutrientes; previene lixiviación | Menor frecuencia de limpieza; prolonga vida útil del sustrato | Reduce sedimentación en vías; aumenta confort urbano     |
| Geotextil NW1                  | AOS: 0.18 mm.<br>Permisividad: 1.20 s <sup>-1</sup> SLC: 1.25 kg/m <sup>2</sup> Resistencia a tracción: 900 N          | Retención de TSS: 84 %; evita obstrucción de la red      | Reduce colmatación y O&M de sumideros                         | Disminuye anegamientos locales                           |
| Geotextil NW2                  | AOS: 0.15 mm.<br>Permisividad: 0.80 s <sup>-1</sup> SLC: 1.74 kg/m <sup>2</sup> Resistencia a tracción: 1 340 N        | Retención de TSS: 81.7 %; mejora calidad inicial         | Menos limpiezas intermedias                                   | Mayor seguridad vial                                     |
| Geotextil NW3                  | AOS: 0.15 mm.<br>Permisividad: 0.54 s <sup>-1</sup> SLC: 2.12 kg/m <sup>2</sup> Resistencia a tracción: 1 691 N        | Retención de TSS: 82.6 %; máximo control de finos        | Vida útil hidráulica más larga                                | Favorece espacios verdes duraderos                       |
| IMPERTEX                       | Impermeabilidad: > 5 m H <sub>2</sub> O. Resistencia a tracción: 130 kN/m. Punzonamiento: 14 760 N                     | Evita infiltraciones no deseadas y contaminación lateral | Ahorro en infraestructura de contención                       | Mantiene integridad de corredores verdes                 |
| Fibertex F 32G                 | AOS: 0.15 mm.<br>Permisividad: 1.50 s <sup>-1</sup> Resistencia a tracción (Grab): 850 N. Punzonamiento (CBR): 2 400 N | Filtración uniforme; retiene finos sin pérdida de flujo  | Menos obstrucciones y reparaciones                            | Mejora la percepción de calidad urbana y confort térmico |

*Nota.* La tabla presenta el desempeño técnico clave de seis materiales filtrantes junto con su evaluación de impactos ambientales, económicos y sociales

## 11. Conclusiones

En el marco de esta monografía teórico-técnica se ha demostrado que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS), y en particular las zonas de bio-retención con geotextiles y polímeros reciclados, satisfacen los requerimientos hidráulicos básicos de tratamiento y proporciones geométricas establecidos por las guías internacional (Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3, Denver 2010) y nacional (Guía EAAB–Uniandes 2017) bajo los eventos de precipitación de diseño. Esta verificación cualitativa, en la que el volumen total disponible (V) resultó igual o superior al volumen de calidad de diseño (Vc), garantiza la viabilidad técnica de implementar esta tipología en el tramo vial Chimita–La Cemento.

El análisis comparativo de los geosintéticos Impertex y Fibertex F 32G reveló que ambos cumplen con los requerimientos de la norma (Clase B según ASTM D-5261) y operativos para sistemas de biorretención en contextos de infiltración limitada. Impertex aporta una resistencia mecánica y durabilidad excepcionales, adecuado como forro de contención hidráulica; Fibertex F 32G, por su parte, muestra permisividades en el rango  $0,54\text{--}0,80\text{ s}^{-1}$  y asegura una eficaz separación de finos, previniendo la colmatación prematura.

En cuanto al sustrato enriquecido con polímeros reciclados, los estudios analizados reportan conductividades hidráulicas funcionales en el rango de  $100\text{--}250\text{ mm/h}$  (según criterios de la Guía EAAB–Uniandes y el Manual Denver) y una remoción de nitrógeno promedio del  $55\%\text{--}70\%$ . Este desempeño, extraído de la literatura científica, supera con creces el de medios convencionales y refuerza la capacidad depuradora del sistema.

La evaluación económica, realizada de forma cualitativa a través de un análisis comparativo interno, señala ventajas en costos de ciclo de vida—menor inversión recurrente en mantenimiento y descolmatación—y beneficios adicionales asociados a la generación de créditos de carbono y la valorización urbana. Socialmente, la integración de vegetación y materiales reciclados mejora la estética urbana, fomenta la educación ambiental y contribuye a reducir riesgos de accidentes en tramos susceptibles a anegamientos.

Entre las limitaciones, destaca que el estudio se basa en un ejercicio teórico sin ensayos piloto ni monitoreo de campo para validar la conductividad real del sustrato, su comportamiento frente a ciclos de humedad-dsecación a largo plazo y la colmatación. Asimismo, la variabilidad de las propiedades de los polímeros reciclados podría condicionar la reproducibilidad de los resultados.

En definitiva, esta monografía amplía el estado del arte colombiano al evidenciar que las zonas de biorretención potenciadas con geotextiles y polímeros reciclados son técnicamente viables y ambientalmente eficaces en corredores viales exigentes. Su enfoque teórico-técnico sienta las bases para el desarrollo de políticas y normativas locales que promuevan la adopción de SuDS, fortaleciendo la economía circular mediante la valorización de residuos plásticos y la resiliencia urbana.

## 12. Recomendaciones

En primer lugar, se recomienda llevar a cabo ensayos piloto en campo que permitan validar empíricamente tanto la conductividad hidráulica del sustrato enriquecido con polímeros reciclados como la permisividad y el comportamiento frente a la colmatación de los geotextiles Impertex y Fibertex F 32G. Estos pilotos deberían incluir mediciones continuas durante ciclos de precipitación reales y periodos de sequía para evaluar la durabilidad de los materiales bajo condiciones operativas prolongadas.

De igual modo, conviene implementar un programa de monitoreo periódico de agua de salida que registre parámetros físico-químicos (sólidos suspendidos, metales pesados y nutrientes) y microbiológicos, con el fin de corroborar la eficacia depuradora en el tiempo y ajustar la granulometría o la dosificación de polímeros reciclados según los resultados obtenidos.

Para profundizar en el análisis económico y ambiental, se sugiere desarrollar un estudio de ciclo de vida completo (LCA) que incorpore todas las fases de la solución: fabricación y transporte de geotextiles, producción de polímeros reciclados, instalación, operación, mantenimiento y disposición final de los materiales. Este LCA debería contemplar también la generación de créditos de carbono y cuantificar los beneficios asociados a la economía circular.

Desde el punto de vista normativo, resulta pertinente promover la actualización de los manuales locales de diseño vial y de SuDS para incluir especificaciones técnicas que reconozcan el uso de geotextiles reciclados y no tejidos, basadas en los criterios de desempeño documentados. Paralelamente, se sugiere articular espacios de formación y difusión dirigidos a profesionales del sector vial y a la comunidad técnica universitaria, con el fin de fomentar la adopción y correcta ejecución de estas soluciones.

### Referencias bibliográficas

- Abera, L. E., Surbeck, C. Q., & Alexander, K. (2021). *Evaluating the effect of city ordinances on the implementation and performance of green stormwater infrastructure (GSI)*. *Environmental Challenges*, 4, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100183>
- Abera, L. E., Surbeck, C. Q., & McKay, S. K. (2025). *Lifecycle cost and benefit analysis for parcel-scale implementation of green stormwater infrastructure*. *Green Technologies and Sustainability*, 3, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100139>
- Angarita Peña, A. D. (2017). Apoyo a la CDMB en el desarrollo de actividades para el funcionamiento de la red hidroclimatológica y procesamiento de la información, en estaciones localizadas en las microcuencas Río de Oro Medio y Río de Oro Bajo. [*Informe de práctica empresarial, Universidad Industrial de Santander*]. Repositorio Institucional. <https://noesis.uis.edu.co/items/4d194020-7585-463b-a2ff-7f42df384915>.
- Bhatt, A., Bradford, A., & Abbassi, B. E. (2019). *Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario*. *Journal of Environmental Management*, 231, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.033>
- Construction Industry Research and Information Association. CIRIA. (2007). The SuDS manual (Report No. C697). CIRIA. <https://www.researchgate.net/profile/Petra-Schneider-2/post/How-will-one-go-about-in-comparing-the-construction-cost-of-SuDS-to-conventional-drainage/attachment/59d6398a79197b8077996c2c/AS%3A402343179898880%401472937497168/download/The-SuDS-Manual-C697.pdf>
- Durán González, L. M. (2014). Localización y georeferenciación de puntos de agua subterránea de los pozos ubicados en la parte occidental de la ciudad de Bucaramanga y el Río de Oro. [*Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander*]. Repositorio Institucional. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/30827>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2018). Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (Norma núm. NS-166). EAAB-ESP. <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/normalizacion-tecnica/gestion-de-normas-y-especificaciones-tecnicas>

- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... Viklander, M. (2014). *SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- Flynn, K. M., & Traver, R. G. (2013). *Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study*. *Ecological Engineering*, 55, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.004>
- Franks, C. A., Davis, A. P., & Aydilek, A. H. (2014). *Effects of runoff characteristics and filter type on geotextile storm water treatment*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(2), Article 04013014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000675](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000675)
- Hsieh, C.-H., & Davis, A. P. (2005). *Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff*. *Journal of Environmental Engineering*, 131(11), 1521–1531. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(1521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521))
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Manual de drenaje para carreteras* [Especificación técnica]. Instituto Nacional de Vías. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>
- López Forero, M. J. (2024). Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para regulación de la escorrentía en el noroeste de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander. [Tesis de maestría, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2862>
- López Serrano, O. F., & Delgado Martínez, S. A. (2019). Caracterización de los niveles del agua subterránea del área metropolitana de Bucaramanga – Fase 1. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/8265>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso->

- hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & Departamento Nacional de Planeación. (2022). Guía metodológica para la formulación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible. <https://minvivienda.gov.co/guias/guia-metodologica-para-la-formulacion-e-implementacion-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Resolución número 0799 de 2021. Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017. Diario oficial No.51.985. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0799-2021>
- Municipio de Bucaramanga. Secretaría de Planeación. (2014). Plan de ordenamiento territorial de Bucaramanga: segunda generación, 2013–2027: componente rural. Documento técnico de soporte: Anexo No. 1 – Diagnóstico (Documento No. 06 de 14). Municipio de Bucaramanga. <https://concejobga.cloud/pot-2012-2027/tomo06.pdf>
- Muwafu, S. P., Rölfer, L., Scheffran, J., & Máñez Costa, M. (2024). A framework for assessing social structure in community governance of sustainable urban drainage systems: Insights from a literature review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29, Article 42. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10136-2>
- Nanía, L. S., & Gómez Valentín, M. (2006). *Ingeniería hidrológica* (2.<sup>a</sup> ed.). Grupo Editorial Universitario.
- Pava Jiménez, A. (2020). Evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para mitigar los efectos de Inundaciones Pluviales en la cuenca Palogrande, ciudad de Manizales [*Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia*]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79145>
- Pérez Hurtado, O. F. (2020). Uso de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en el municipio de Paipa. [*Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/8865>
- Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (2015). Hidrología aplicada: Infiltración y humedad del suelo Tema 4 [Apuntes de curso OCW en línea]. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. <https://ocw.ehu.eus/mod/resource/view.php?id=36483>

- Sweeney, L. C., Knappenberger, T., Brantley, E. F., & Shaw, J. N. (2022). *Zeolite amended bioretention media improves nitrogen removal from stormwater*. *Agricultural & Environmental Letters*, 7, e20060. <https://doi.org/10.1002/acl2.20060>
- Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA). (2017). *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB-ESP) & Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible>
- Urban Drainage and Flood Control District. (2010). *Urban storm drainage criteria manual: Volume 3, Stormwater Best Management Practices*. Urban Drainage and Flood Control District. <https://denvergov.org/files/assets/public/v/2/doti/documents/permits/sspr-stormsanitary/urban-storm-drainage-manual.pdf>
- Vineyard, D., Ingwersen, W. W., Hawkins, T. R., Xue, X., Demeke, B., & Shuster, W. (2015). *Comparing green and grey infrastructure using life cycle cost and environmental impact: A rain garden case study in Cincinnati, OH*. *Journal of the American Water Resources Association*, 51(5), 1342–1360. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12320>
- Wang, J., Zhao, Y., Yang, L., Tu, N., Xi, G., & Fang, X. (2017). *Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using bioretention media mix*. *Water*, 9(11), 854. <https://doi.org/10.3390/w9110854>
- Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual* (C753; 5th ed.). CIRIA.
- WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos) /ONU-Agua. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
- Zhou, H., Liu, J., Ou, S., Gao, C., Zhou, Y., Shi, L., & Zhou, K. (2024). *Impact of effective impervious surface disconnection on urban hydrographs: A multi-scenario modeling study at the catchment scale*. *Journal of Hydrology*, 630, Article 130656. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130656>