

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)  
EN EL CASO URBANO DEL MUNICIPIO DE PARATEBUENO, CUNDINAMARCA

BAQUERO CRIOLLO LAURA CAMILA

LAVERDE AYA JENNIFER NICOLE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2023

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)  
EN EL CASO URBANO DEL MUNICIPIO DE PARATEBUENO, CUNDINAMARCA

BAQUERO CRIOLLO LAURA CAMILA

LAVERDE AYA JENNIFER NICOLE

Proyecto de grado para optar por el título de

Ingeniera Civil

Director

Antonio Preziosi Ribero

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2023

## 1. TABLA DE CONTENIDO

|        |                                                              |    |
|--------|--------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | TABLA DE CONTENIDO.....                                      | 3  |
| 2.     | INTRODUCCIÓN .....                                           | 8  |
| 3.     | GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO .....                     | 9  |
| 3.1.   | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                             | 9  |
| 3.2.   | OBJETIVOS.....                                               | 10 |
| 3.2.1. | Objetivo General.....                                        | 10 |
| 3.2.2. | Objetivos Específicos.....                                   | 10 |
| 4.     | MARCO TEÓRICO.....                                           | 10 |
| 4.1.   | Sistema de drenaje.....                                      | 10 |
| 4.2.   | Sistema de drenaje sostenible (SUDS).....                    | 11 |
| 4.3.   | Tipos de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) ..... | 12 |
| 5.     | ESTADO DEL ARTE.....                                         | 15 |
| 5.1.   | MARCO NORMATIVO Y LEGAL.....                                 | 16 |
| 6.     | METODOLOGÍA.....                                             | 18 |
| 6.1.   | FASES DEL TRABAJO DE GRADO .....                             | 18 |
| 7.     | MUNICIPIO DE PARATEBUENO.....                                | 20 |
| 7.1.   | DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO .....            | 20 |
| 7.2.   | ECONOMÍA .....                                               | 23 |
| 7.3.   | GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA .....                               | 24 |
| 7.4.   | HIDROLOGÍA.....                                              | 24 |

|         |                                                                |    |
|---------|----------------------------------------------------------------|----|
| 8.      | PRESELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS DE SUDS EN ETAPA DE PREDISEÑO ..... | 26 |
| 8.1.    | MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA.....                        | 28 |
| 8.2.    | CONTROL DE VOLUMENES DE AGUA LLUVIA .....                      | 30 |
| 8.3.    | AMENIDAD Y CONFLICTOS DE USO .....                             | 30 |
| 8.4.    | MANTENIMIENTO.....                                             | 31 |
| 8.5.    | COSTOS.....                                                    | 32 |
| 9.      | EVALUACIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS DE SUDS .....                     | 33 |
| 9.1.    | DISEÑO CONCEPTUAL.....                                         | 34 |
| 10.     | DISEÑO HIDROLÓGICO .....                                       | 35 |
| 10.1.   | CURVAS IDF.....                                                | 36 |
| 10.2.   | HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN.....                              | 37 |
| 10.3.   | Determinación de la profundidad de lámina ( $hQWCV$ ) .....    | 38 |
| 11.     | DISEÑO DE SUDS SELECCIONADOS .....                             | 39 |
| 11.1.   | PAVIMENTO PERMEABLE .....                                      | 39 |
| 11.2.   | Diseño hidráulico.....                                         | 40 |
| 11.2.1. | Tipo de pavimento.....                                         | 40 |
| 11.2.2. | Diseño estructural.....                                        | 44 |
| 11.2.3. | Esquema Pavimento Permeable .....                              | 45 |
| 11.3.   | ZANJAS DE INFILTRACIÓN .....                                   | 45 |
| 11.3.1. | Diseño Hidráulico .....                                        | 45 |
| 11.3.2. | Dimensionamiento .....                                         | 47 |
| 11.3.3. | Esquema Zanja de Infiltración .....                            | 48 |

|         |                                          |    |
|---------|------------------------------------------|----|
| 11.4.   | ZONA DE BIO-RETENCIÓN .....              | 49 |
| 11.4.1. | Diseño hidrológico .....                 | 50 |
| 11.4.2. | Dimensionamiento .....                   | 51 |
| 11.4.3. | Esquema Zona de Bio-Retención .....      | 52 |
| 11.5.   | ESTRUCTURAS ANEXAS.....                  | 53 |
| 11.5.1. | Pre-tratamiento .....                    | 54 |
| 11.5.2. | Entrada .....                            | 54 |
| 11.5.3. | Salida .....                             | 55 |
| 12.     | MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA..... | 55 |
| 12.1.   | Análisis del municipio .....             | 56 |
| 12.2.   | MODELACIÓN DE SUDS.....                  | 57 |
| 12.2.1. | PAVIMENTOS PERMEABLES .....              | 58 |
| 12.2.2. | ZANJAS DE INFILTRACIÓN.....              | 58 |
| 12.2.3. | ZONAS DE BIO- RETENCIÓN .....            | 59 |
| 13.     | RESULTADOS.....                          | 59 |
| 13.1.   | ZONAS DE BIORETENCIÓN .....              | 59 |
| 13.2.   | Zanjas de infiltración .....             | 60 |
| 13.3.   | Pavimento permeable .....                | 61 |
| 14.     | CONCLUSIONES .....                       | 62 |
| 15.     | REFERENCIAS.....                         | 66 |
| 16.     | ANEXOS .....                             | 67 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 Ejemplo de SUDS. Fuente: Catch Themes .....                     | 12 |
| Ilustración 2 Jardín de Bio-retención (Universidad del norte).....            | 13 |
| Ilustración 3 Techos Verdes (Universidad del Norte) .....                     | 13 |
| Ilustración 4 Pavimento Permeable (Universidad del Norte) .....               | 14 |
| Ilustración 5 Zanjas de infiltración (Universidad del Norte) .....            | 14 |
| Ilustración 6 Zonas de bio-retención (Universidad del Norte) .....            | 15 |
| Ilustración 7 Mapa del Departamento de Cundinamarca. (Provincias). ....       | 22 |
| Ilustración 8 Mapa de Paratebueno.....                                        | 23 |
| Ilustración 9 Caño Naguaya.....                                               | 25 |
| Ilustración 10 Caño Dantas.....                                               | 26 |
| Ilustración 11 Diseño conceptual de SUDS en el municipio de Paratebueno. .... | 35 |
| Ilustración 12 Mapa área tributarias o de drenaje.....                        | 42 |
| Ilustración 13 Esquema Pavimento Permeable.....                               | 45 |
| Ilustración 14 Área tributaria de la Zanja de Infiltración. ....              | 46 |
| Ilustración 15 Esquema Zanja de infiltración. ....                            | 49 |
| Ilustración 16 Área tributaria de la Zona de bio-retención.. ....             | 50 |
| Ilustración 17 Esquema de la zona de bio-retención. ....                      | 53 |
| Ilustración 18 Red de alcantarillado de Paratebueno, Cundinamarca.....        | 56 |
| Ilustración 19 Perfil de Elevación de agua en pozos PZP-39 a O-8. ....        | 57 |
| Ilustración 20 Perfil de Elevación de agua en pozo PZP-14.....                | 57 |
| Ilustración 21 Perfil de agua de PZP-39 a O-8. ....                           | 58 |
| Ilustración 22 Perfil de agua de PZP-31 a O-7. ....                           | 59 |
| Ilustración 23 Perfil de agua de PZP-23 a O-4. Fuente: Propia.....            | 59 |

## 2. ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Tipologías de SUDS. ....                                                    | 15 |
| Tabla 2 Tipologías de SUDS. ....                                                    | 18 |
| Tabla 3 Metodología para el desarrollo del proyecto. Fuente: Propia .....           | 20 |
| Tabla 4 Preselección de tipologías según áreas potenciales. ....                    | 27 |
| Tabla 5 Parámetros de construcción. ....                                            | 28 |
| Tabla 6 Calificación según la eficiencia de remoción de algunos contaminantes. .... | 29 |
| Tabla 7 Calificación según el control de escorrentía. ....                          | 30 |
| Tabla 8. Calificación según la Amenidad y conflictos de usos por tipología. ....    | 31 |
| Tabla 9 Calificación según la frecuencia de mantenimiento. ....                     | 32 |
| Tabla 10 Calificación según el costo de cada tipología. ....                        | 33 |
| Tabla 11 Evaluación de selección definitiva de SUDS. ....                           | 34 |
| Tabla 12 Características del suelo.....                                             | 40 |
| Tabla 13 Área de drenaje para SUDS tipo Pavimento permeable. ....                   | 41 |
| Tabla 14 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. ....                             | 42 |
| Tabla 15 Datos para cálculo del volumen de almacenamiento requerido. ....           | 43 |
| Tabla 16 Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento del reservorio. ....   | 44 |
| Tabla 17 Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento del reservorio. ....   | 44 |
| Tabla 18 Espesor de estructura de pavimento según categoría de tráfico. ....        | 45 |
| Tabla 19 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. ....                             | 46 |
| Tabla 20 Variables hidrológicas para el diseño de zanjas. ....                      | 47 |
| Tabla 21 Parámetros de Diseño.. ....                                                | 48 |
| Tabla 22 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. ....                             | 50 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 23 Variables hidrológicas. ....                           | 51 |
| Tabla 24 Parámetros de diseño de la zona de bio-retención. .... | 52 |
| Tabla 25 . Estructuras anexas de Pre-tratamiento. ....          | 54 |
| Tabla 26 Estructuras anexas de Pre-tratamiento. ....            | 55 |
| Tabla 27 Estructuras anexas de salida. ....                     | 55 |

### 3. INTRODUCCIÓN

La crisis ambiental está en la agenda de todos los países, que buscan diariamente medidas para poder mitigar los daños provocados por las actividades humanas. El tratamiento del agua ha sido uno de los grandes problemas, dado que en numerosas industrias no se ha asumido la responsabilidad necesaria para evitar un deterioro absolutamente irreversible. La ingeniería civil no se queda atrás con este compromiso, y entre muchas innovaciones se resalta una, Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Aunque el concepto es relativamente nuevo, la idea ha sido implementada desde inicios de la construcción civil, claramente acoplada a la tecnología de cada época, se han registrado desde cuencas de bio-retención hasta pavimentos permeables durante la civilización minoica (Green Blue Urban, 2021). En la actualidad, se definen como SUDS a los sistemas alternativos o complementarios al drenaje convencional cuyos cuatro pilares fundamentales son el control de escorrentía, reducción de contaminantes en los cuerpos de agua, mitigación de inundaciones y promoción de diseños urbanísticos más involucrados con el medio ambiente. Estos pilares son las principales necesidades que presentan las estructuras de alcantarillados. Por ende, para suplir estas, se diseñaron estructuras que mejoren el sistema.

Estas estructuras son el nuevo enfoque de las grandes ciudades y pueden ser plasmadas en pequeños proyectos localizados en municipios del territorio nacional. Para este caso, se ha escogido el municipio de Paratebueno en el departamento de Cundinamarca, una población rica en ríos, quebradas y en selva tropical, que tiene el potencial de mejorar en cuanto a calidad de agua y aprovechamiento consciente del recurso hídrico. Es por esto que a partir de un estudio, adaptado del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Los Andes, se realiza un análisis en función de la precipitación del municipio, la disposición de terreno entre otras, hasta la determinación de las tipologías que más se adaptan a la necesidad de la región, en cuyo caso es el control de escorrentía, mejorar la calidad del agua y el embellecimiento de espacios públicos, estos tres, serán suplidos con las estructuras de pavimentos permeables, zanjas de infiltración y zonas de bio-retención dispuestas estratégicamente.

#### **4. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO**

##### **4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Colombia, por su ubicación geográfica, cuenta con todos los pisos térmicos, es por ello que en gran parte del territorio del país existe lo que comúnmente se denomina en hidrología como un ciclo hidrológico bimodal (IDEAM, 2018) es decir, que durante el año hay dos temporadas de altas precipitaciones. El municipio de Paratebueno, Cundinamarca, no está exento de las consecuencias que ha traído el cambio climático y es por lo que en los últimos años se han presentado grandes problemas de inundación afectando de manera considerable a la población; debido a que se afecta la agricultura, la ganadería y el turismo del sector.

Por otra parte, el municipio tiene una gran riqueza hídrica que proviene de los ríos Humea, Guacavía y Amarillo. Asimismo, cuenta con importantes caños que abastecen de agua a todo el municipio como lo son caño Naguaya, caño Palomas, caño Rayo, caño Raya, caño Dantas. Muchas

de estas fuentes hídricas se ven afectadas por el paso de la población que arroja basuras y desechos contaminantes, así como también el paso de ganado, que ha destruido poco a poco la calidad del agua de estas fuentes, entrando casi a un estado crítico, con consecuencias en la salud de la población.

El objetivo principal de este proyecto de grado es generar un pre-diseño de las tipologías SUDS para el municipio de Paratebueno, con el fin de mitigar la presente problemática del municipio a causa de las inundaciones y de la deficiente calidad del agua que afecta la salud de la comunidad.

## 4.2. OBJETIVOS

### 4.2.1. Objetivo General

Proponer un diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS, para el municipio de Paratebueno, en el departamento de Cundinamarca. Con el fin de mejorar la calidad del agua en el sector urbano del municipio, manejando información hidrológica disponible de la región e hidráulicos del casco urbano del municipio.

### 4.2.2. Objetivos Específicos

1. Definir las tipologías de SUDS que más se adapten a las condiciones del municipio, según las especificaciones propuestas en la NS-166.
2. Dimensionar un sistema urbano de drenaje sostenible basado en el análisis de datos hidrológicos del área de estudio.
3. Comparar el funcionamiento del sistema de drenaje actual del municipio con el pre-diseño de los SUDS, evaluando el impacto que tiene la implementación de este tipo de estructuras.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. SISTEMA DE DRENAJE

Cumplen la función de evacuar el agua que se acumula en las depresiones topográficas de los terrenos, esto con el fin de evitar afectaciones a las comunidades por inundaciones en sectores urbanizados, así como también pérdida de cultivos en sectores rurales. Un sistema de drenaje se compone por canales que son los encargados de recoger y conducir las aguas a la fuente final como ríos o quebradas.

## 5.2. SISTEMA DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

Los SUDS son elementos de drenaje de aguas pluviales comúnmente utilizados en las ciudades, puesto que ayudan a reducir el caudal producido por la lluvia, disminuyen en gran medida los contaminantes transportados en el proceso de la escorrentía. Su función principal al igual que los demás sistemas de drenajes es evitar inundaciones en zonas urbanas, por otro lado, tienen la función de mitigar la contaminación de las aguas, minimizar los costos económicos que conlleva la gestión y manejo de las aguas pluviales y por último mejoran el paisaje urbano de la zona en donde son implementados.

En su gran mayoría los sistemas SUDS se caracterizan por ser «infraestructuras verdes». Es decir, se caracterizan por el uso de la vegetación para el control y regulación de la precipitación de la zona. El implementar este tipo de estructuras trae varias ventajas; mejorar la estética visual del lugar y crear islas de microclimas frescos en los barrios donde se implementan.

Para el diseño de estos sistemas se siguen criterios hidrológicos para así garantizar un correcto funcionamiento. Es por ello que para la selección e implantación de las técnicas de drenaje sostenible se incluyen varios factores de la zona, cálculos hidrológicos e hidráulicos propios de un sistema de drenaje, y elementos como el urbanismo, el paisajismo y la ecología. Es decir, se tienen en cuenta elementos de diferente naturaleza, combinándolos adecuadamente en el medio en donde se implementan.

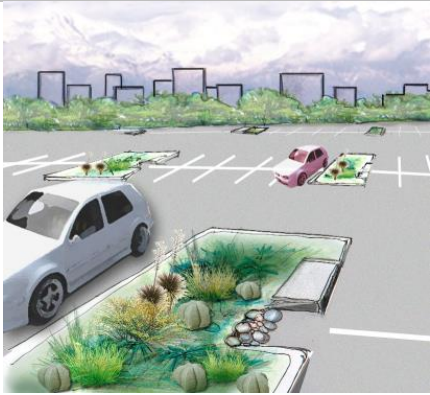


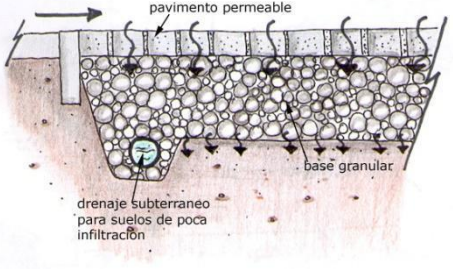
*Ilustración 1 Ejemplo de SUDS. Fuente: Catch Themes*

### 5.3. TIPOS DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

La Tabla 1 presenta los diferentes tipos de sistemas urbanos de drenaje sostenible que se han estudiado en la literatura actual. La primera columna de la tabla muestra el nombre común del sistema. En la segunda columna se indica una breve descripción de la tipología SUDS. Por último, la tercera columna muestra un diagrama con un ejemplo de la posible aplicación que puede tener el SUDS.

| TIPO DE DRENAJE                                 | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                       | EJEMPLO |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Jardines de bio-retención o jardines de lluvia. | Los jardines de bio-retención son espacios modificados que permiten los procesos de captación y almacenamientos de aguas lluvias desde el mismo momento en que se |         |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | <p>presente el evento, a través de las capacidades de infiltración del suelo. (Universidad del norte)</p>                                                                                                                                                                                                           |  <p><i>Ilustración 2 Jardín de Bio-retención (Universidad del norte)</i></p> |
| Techos verdes         | <p>Los techos o cubiertas verdes son áreas con vegetación que, en partes de Europa, son implementadas para permitir el almacenamiento de calor para las viviendas. Son unas capas gruesas de tierra con plantas, césped y/o árboles, y se requiere de un soporte estructural adicional. (Universidad del Norte)</p> |  <p><i>Ilustración 3 Techos Verdes (Universidad del Norte)</i></p>          |
| Pavimentos permeables | <p>Los pavimentos permeables son la mezcla entre hormigón de alta porosidad y una sub-base permeable, pueden cumplir con las mismas</p>                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | <p>funciones de un pavimento tradicional para la aplicación en parqueaderos y andenes. En muchos casos, los pavimentos permeables llegan a tener una capacidad de infiltración superior a la de algunos tipos de suelos, lo que permite que sean capaces de absorber en su totalidad el agua producto de la precipitación del lugar.</p> <p>(Universidad del Norte)</p> |  <p>Ilustración 4 Pavimento Permeable<br/>(Universidad del Norte)</p>      |
| <p>Zanjas de infiltración</p> | <p>Son excavaciones que tienen una profundidad entre 1 y 3 metros, estos se rellenan con material granular, este último permite que se recoja y se almacene el agua mientras se infiltra de manera natural al terreno.</p>                                                                                                                                              |  <p>Ilustración 5 Zanjas de infiltración<br/>(Universidad del Norte)</p> |

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                               |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zonas de bio-retención | Espacios diseñados con el fin de hacer un control de calidad agua antes llegar a los ríos. Son zonas deprimidas a las que se les coloca una capa de filtro orgánico y un dren colector o gravilla este funciona como un filtro, la eliminación de la contaminación se genera gracias a la vegetación existente en la zona. |  <p><i>Ilustración 6 Zonas de bio-retención (Universidad del Norte)</i></p> |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Tabla 1 Tipologías de SUDS. Fuente: Universidad del Norte*

## 6. ESTADO DEL ARTE

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible nacen de la problemática medioambiental que padece el planeta, especialmente cuando se trata del recurso hídrico. Es por esto que surge la necesidad de tratar el agua lluvia desde su recolección, mediante el sistema de drenaje, que en un principio funcionaba únicamente para el control de escorrentía, de esta manera, haciendo ciertas adecuaciones puede ser aprovechado para mejorar la calidad del agua.

Colombia no es la excepción ante la crisis de contaminación del agua, es por esto que en el año 2018 la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en convenio con el Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes formularon una normativa NS-166 la cual funciona como Guía para la implementación de los SUDS, esta investigación ayudó a reforzar antecedentes legislativos, como por ejemplo, el Acuerdo 327 del 2008 de la ciudad de Bogotá donde se empezó a implementar el término SUDS y también el Art.

153 de la Resolución Nacional 330 de 2017 de la RAS donde se estipula que en nuevos proyectos urbanos se deben diseñar sistemas urbanos de drenaje sostenible.

A partir de estos avances se ha logrado implementar paulatinamente estos sistemas a las ciudades principales, especialmente en la ciudad de Bogotá, como en Lagos de Torca, donde platean en el Plan de Ordenamiento Zonal del Norte que los diseños del alcantarillado pluvial sean a partir de SUDS, los cuales obligatoriamente deben de retener mínimo un 30% de las aguas lluvias (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020). Otro proyecto es el Parque metropolitano San Cristóbal Sur, donde se diseñó una cuneta verde y una cuenca seca de drenaje extendido. Lo planeado para Bogotá, según el IDU, es seguir implementando estos sistemas tanto en suelo urbano como en privado, tales como techos verdes, zanjas de infiltración, entre otras tipologías. (Rodríguez, 2017)

Cabe resaltar que la ciudad capital no es la única en avanzar en temas ambientales. También se destaca Manizales, donde en el año 2020 la Universidad Nacional postuló una propuesta de SUDS para ciudades de montaña, por la problemática de inundaciones que presenta esta población, debido a las altas pendientes en el terreno. Caicedo A. (2020). Rey D. (2020)

#### 6.1. MARCO NORMATIVO Y LEGAL

En cuanto a legalidad de los SUDS en Colombia, están a la vanguardia la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, la Universidad de los Andes y el RAS donde proponen ciertas condiciones y criterios de implementación que se tuvieron en cuenta en la investigación propuesta en este documento y serán expuestas en la Tabla 2.

| NORMA                                                | DESCRIPCIÓN                                                                                                        |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Norma Técnica NS-166 del 9 de febrero de 2018</b> | Esta norma está formulada por la EAAB, donde se exponen conceptos, procesos de diseño y construcción de tipologías |

|                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                   | <p>previamente seleccionadas para la ciudad de Bogotá y estructuras necesarias para conexión entre el sistema de alcantarillado convencional y los SUDS.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p><b>Resolución Nacional 330 de 2017 de la RAS, Art, 153</b></p> | <p>El reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico propone, ante nuevos proyectos de desarrollo urbano que intervengan la cobertura del suelo, implementar ideas que mitiguen el efecto de impermeabilización y la escorrentía mediante SUDS, y a través de una comparación entre este Sistema versus el alcantarillado tradicional, observar el impacto de esta nueva medida, el cual debe ser mínimo del 25% de reducción de los efectos ya mencionados.</p> |
| <p><b>Art. 79 de la Constitución Política de Colombia</b></p>     | <p>“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano”... “Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.” Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 79. 7 de julio de 1991 (Colombia).</p>                                                                                                                                     |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Art. 80 de la Constitución Política de Colombia</b> | “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución”<br><br>Constitución Política de Colombia [Const].<br><br>Art. 79. 7 de julio de 1991 (Colombia). |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Tabla 2 Tipologías de SUDS. Fuente: Universidad del Norte*

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1. FASES DEL TRABAJO DE GRADO**

En la Tabla 3 se plantea la metodología para el desarrollo del proyecto, la cual se basa a partir de los objetivos específicos y las actividades requeridas para el cumplimiento de estos.

| <b>Objetivo</b>                                                                                                                        | <b>Actividad</b>                                                                                                                                                 | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Definir las tipologías de SUDS que más se adapten a las condiciones del municipio, según las especificaciones propuestas en la NS-166. | 1. Búsqueda de información del municipio a intervenir.<br><br>2. Definir objetivos técnicos de la aplicación de SUDS con el fin de hacer una correcta selección. | Definir las estaciones pluviométricas y obtener los datos registrados de estas, posteriormente hacer el debido tratamiento de esta información con la cual se hará el diseño hidrológico (Curvas IDF, Hietogramas, Caudales).<br><br>Obtener cartografía del municipio de Paratebueno, |

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                    | principalmente del sistema de alcantarillado, para obtener información detallada de los pozos, especificaciones de tuberías, pendientes, entre otros datos requeridos para hacer la modelación en el software. |
|                                                                                                                                                                         | 3. Recopilación de información de la zona de estudio.<br><br>4. Selección de tipologías SUDS que mejor se adapten al municipio.    | Características propias de la zona de estudio como son: Topografía, población, entre otras.<br><br>Clasificación y elección de las tipologías SUDS, definiendo su costo y mantenimiento.                       |
| Dimensionar un sistema urbano de drenaje sostenible<br><br>Realizar un redimensionamiento basado en el análisis de datos hidrológicos realizados en el área de estudio. | 1. Obtener información hidrológica de estaciones pluviométricas del IDEAM y la CAR.<br><br>2. Calcular caudal y volumen de diseño. | Elaborar curvas IDF y hietogramas, datos necesarios para la elaboración del diseño SUDS.<br><br>Determinar áreas, coeficiente de escorrentía con el fin de determinar el respectivo caudal de diseño.          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                          | Evaluar y definir las dimensiones de las tipologías y sus características respectivas.                                                                                                                                                            |
| <p>Analizar el funcionamiento del sistema de drenaje actual del municipio en comparación a los datos obtenidos del pre-diseño de los SUDS, para así conocer el impacto que tendrá la implementación de este tipo de estructuras.</p> <p>Comparar el funcionamiento del sistema de drenaje actual del municipio con los datos obtenidos del pre-diseño de los SUDS, evaluando el impacto que tiene la implementación de este tipo de estructuras.</p> | <p>1. Identificar la tipología de la red pluvial</p> <p>2. Modelar en el software EPA SWMM la red de alcantarillado.</p> | <p>Con la ayuda del software representar la red del alcantarillado existente.</p> <p>Analizar la capacidad de la existente red de drenaje con el fin de hacer la comparación de las condiciones actuales y la posible implementación de SUDS.</p> |

*Tabla 3 Metodología para el desarrollo del proyecto. Fuente: Propia*

## **8. MUNICIPIO DE PARATEBUENO**

### **8.1. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO**

El municipio de Paratebueno se encuentra ubicado en el Departamento de Cundinamarca, en la provincia de Medina, a 211 kilómetros de distancia de la capital, Bogotá. Se encuentra a una altura de 256 m.s.n.m y cuenta con una temperatura media anual de 27°C.

Paratebueno al igual que Medina, hacen parte de lo que se conoce como el piedemonte llanero, y hacen parte de la ruta turística que lleva el mismo nombre que se encuentran ubicados sobre lo que se conoce como La Marginal de la selva, vía de suma importancia que recorre la Orinoquia Colombiana.

“Por otra parte cabe mencionar que Paratebueno, limita al norte con el municipio de San Luis de Gaceno y Santa María (Boyacá), al sur con Cumaral (Meta), al oriente con Cabuyaro, Barranca de Upía (Meta) y Sabanalarga (Casanare) y por último al occidente limita con los municipios de Medina y Ubalá (Cundinamarca).



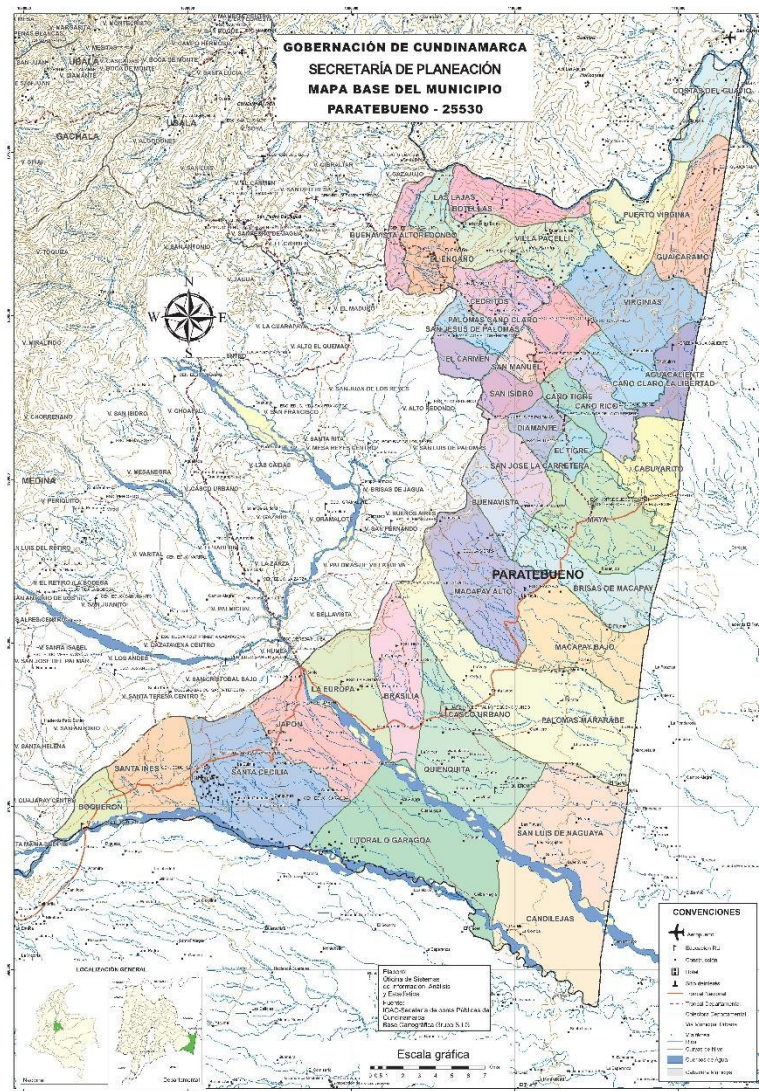


*Ilustración 8 Mapa de Paratebueno.*

*Fuente:* <https://mapas.cundinamarca.gov.co/documents/municipio-de-paratebueno/explore>

## 8.2. ECONOMÍA

Una de las principales actividades económicas de Paratebueno se basa en la producción pecuaria, esta sobresale de actividades como lo son la ganadería de doble propósito, la agroindustria de palma africana y arroz productos que son muy comunes en la región del pie de monte llanero. Así mismo también encontramos un gran potencial en los cultivos de piña, cítricos y es por ello que

los gobiernos Nacional y Departamental trabajan en conjunto para impulsar que estos cultivos se desarrollen bajo el concepto de desarrollo sostenible y sustentable generando así empleo y riqueza para la región. (EPC, 2018)

### 8.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Para llegar al municipio de Paratebueno desde Bogotá, se conduce por carretera pavimentada comúnmente conocida como vía al llano (Bogotá- Villavicencio). Se llega a la capital del Meta y se procede a tomar la vía Marginal de la Selva con dirección a Yopal. En el municipio de Paratebueno se han desarrollado importantes procesos geológicos en los más recientes corresponden al cuaternario, es decir es un proceso que tiene alrededor de 1,5 millones de años hasta hoy; en donde se evidencia el desarrollo de superficies conocidas como terrazas aluviales, depósitos fluvioglaciares, complejos de conos y depósitos de arenisca.

### 8.4. HIDROLOGÍA

Paratebueno es un municipio rico en el recurso hídrico, lo constituyen tres importantes ríos que son el Humea, Guacavía y Amarillo, en estos ríos se lleva a cabo una de las actividades económicas más importantes para el municipio, la producción agropecuaria. Por otra parte, Paratebueno cuenta con otras fuentes hídricas que son: Río Cabuyarito, el caño la Naguaya, caño Palomas, caño Rayo, caño Raya, caño Dantas, entre otros.

- Caño Naguaya

Este caño se alimenta del río Meta y de la subcuenta el Humedal, tiene un área de extensión de  $118,2 \text{ km}^2$  con una longitud de corriente de 27 km. Este caño es de suma importancia porque atraviesa grandes extensiones ganaderas y cultivos de palma.



*Ilustración 9 Caño Naguaya. Fuente: Plan maestro de alcantarillado urbano del municipio de Paratebueno. EPC.*

En esta fuente hídrica existe una gran problemática ambiental, pues al encontrarse en una zona densamente poblada, al caño llegan basuras y aguas negras. Por otra parte, cuenta con un gran número de drenajes que conforman nuevas corrientes con gran afluente de agua como lo son el caño Dantas, Quienquita, Santa Isabel, Gacal, El Algarrobo, El desquite. (Corporinoquia, 2008)

- Caño Dantas

Nace en la finca Pianola y desemboca en el caño Naguaya. En épocas de sequía el caño no presenta caudal. El uso que tiene el caño antes de llegar a los vertimientos es de abrevadero de ganado. Pasa por el casco urbano del municipio, esto causando que sea usado para verter las aguas residuales domésticas, que provienen del sistema de alcantarillado sanitario de Paratebueno.



*Ilustración 10 Caño Dantas. Fuente: Plan maestro de alcantarillado urbano del municipio de Paratebueno. EPC.*

## 9. PRESELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS DE SUDS EN ETAPA DE PREDISEÑO

Antes de tener opciones definitivas en cuanto a qué tipologías de SUDS serán implementadas en el territorio, es necesario realizar un análisis dependiendo de la oferta que hace el municipio, en cuanto a terreno disponible, características del suelo e infraestructura ya existente, y los requerimientos de los Sistemas de Drenajes.

En primera instancia se evalúan las zonas públicas las cuales pueden ser intervenidas y los SUDS que se puedan implementar en estas. (Tabla 4)

| Tipos de SUDS<br>Áreas Potenciales | Alcorque inundable | Cuneta verde | Cuenca seca de drenaje extendido | Pavimento permeable | Tanque de almacenamiento | Zanja filtrante | Zona de bio-retención |
|------------------------------------|--------------------|--------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|
| Andenes                            | X                  | X            |                                  | X                   | X                        | X               |                       |
| Parques Públicos                   |                    | X            | X                                |                     | X                        | X               | X                     |
| Separadores                        | X                  | X            |                                  | X                   | X                        | X               | X                     |
| Zonas Comerciales                  | X                  |              |                                  |                     |                          | X               | X                     |
| Zonas Residenciales                |                    |              |                                  | X                   |                          | X               | X                     |

|              |   |   |   |   |  |   |   |
|--------------|---|---|---|---|--|---|---|
| Zonas verdes | X | X | X |   |  | X | X |
| Zonas viales |   | X |   | X |  | X |   |

*Tabla 4 Preselección de tipologías según áreas potenciales. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

Para elegir el tipo de drenaje más adecuado se deben cumplir con los parámetros de pendiente, Distancia al nivel freático, Tasa de infiltración y distancia a los cimientos, especificados en la norma NS-166.

El municipio de Paratebueno cuenta con pendientes longitudinales entre 0,7% a 7,1% entre calles y carreras, por otra parte, según estudios de suelos realizados a una profundidad de 3m no fue identificado el Nivel freático, únicamente se obtuvo una variación de humedad entre el 10% y el 25%. La tasa de infiltración es de 36 mm/hr y la distancia a los cimientos puede variar dependiendo la localización del SUDS.

Para hacer la preselección de las tipologías a analizar es preciso identificar cuáles son aquellas que más se ajustan a las condiciones del municipio, para ello, en la Tabla 5, se observan los criterios de cada tipo de SUDS y se resalta con cuales se cumple y con cuáles no.

| Tipos de SUDS<br><br>Parámetro | Límite de valor | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje extendido | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de almacenamiento | Zanjas de infiltración | Zonas de bio-retención |
|--------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
|                                |                 |                      |                                  |                |                       |                           |                        |                        |
| Pendiente longitudinal (%)     | Mínimo          | -                    | 1                                | 1              | 0.5                   | 1                         | 1                      | -                      |
|                                | Máximo          | 10                   | 15                               | 10             | 5                     | -                         | 5                      | 10                     |

|                                       |        |   |   |     |    |   |   |     |
|---------------------------------------|--------|---|---|-----|----|---|---|-----|
| Distancia al nivel freático (m)       | Mínimo | 1 | 3 | 1.5 | 3  | 2 | 3 | 1.8 |
| Tasa de infiltración del suelo (mm/h) | Mínimo | 7 | 7 | 13  | 13 | - | 7 | 7   |
| Distancia a cimientos (m)             | Mínimo | 2 | 6 | 4   | 6  | - | 6 | 6   |

*Tabla 5 Parámetros de construcción. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*  
*Tabla*

### 9.1. MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUA

Esta preselección debe ir soportada con el análisis de los agentes contaminantes potenciales de la zona para elegir la opción más eficaz de SUDS en cuanto a tratamiento de agua.

En la Tabla 6, extraída de la “Guía Técnica de diseño y construcción de SUDS” elaborada por el Centro de Investigadores de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Los Andes (CIIA) se pueden observar tres criterios asignados a cada tipología, según su eficiencia respecto a la remoción de contaminantes, Alta (promedio de remoción mayor al 80%), Media (entre 30-80 % de remoción) y baja (menor al 30% de remoción). Para hacer la preselección, estos criterios corresponden a una calificación numérica, donde:

- Alta= 3
- Media= 2
- Baja= 1

Después de la asignación de criterios se promedian los resultados, donde, la tipología con más alta calificación será la de mayor eficiencia respecto a la remoción de contaminantes.

Cabe resaltar que este tipo de calificación aplica para todos los criterios de preselección de SUDS, exceptuando el criterio de mantenimiento, donde la calificación es contraria a la actual, puesto que en primer lugar se asignan los números y a partir de esto se asignan los criterios cualitativos.

| Tipología<br>Contaminante | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de almacenamiento | Zanjas de infiltración | Zona de bio-retención |
|---------------------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Nutrientes                | M                    | B                      | M              | B                     | N/A                       | M                      | M                     |
| Patógenos                 | M                    | A                      | B              | M                     |                           | A                      | M                     |
| Sedimentos                | M                    | M                      | M              | A                     |                           | A                      | A                     |
| Aceites y grasas          | A                    | M                      | M              | A                     |                           | M                      | A                     |
| Basura y escombros        | A                    | A                      | M              | M                     |                           | A                      | A                     |
| <b>TOTAL</b>              | <b>12</b>            | <b>11</b>              | <b>9</b>       | <b>11</b>             |                           | <b>13</b>              | <b>13</b>             |

*Tabla 6 Calificación según la eficiencia de remoción de algunos contaminantes. Fuente: propia (Adaptada de CHIA & EAAB, 2017)*

En el caso del Tanque de almacenamiento, no aplica esta calificación ya que en sus funciones no está contemplada la reducción de contaminantes, esta estructura está más especializada en control de esorrentía y retención.

Como se pudo observar en la Tabla 6, las tipologías que obtuvieron un resultado más alto fueron la zanja de infiltración y la zona de bio-retención, mientras que las cunetas verdes fueron las menos puntuadas.

## 9.2. CONTROL DE VOLÚMENES DE AGUA LLUVIA

Este criterio es valorado según la funcionalidad del sistema en reducción de volumen y reducción de picos de descarga, para así obtener los SUDS más convenientes para el control de esorrentía.

| Tipología / Criterio de volumen | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de almacenamiento | Zanjas de infiltración | Zona de bio-retención |
|---------------------------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Reducción de volumen            | B                    | B                      | B              | A                     | M                         | A                      | M                     |
| Reducción de descarga máxima    | B                    | M                      | B              | M                     | M                         | A                      | B                     |
| <b>TOTAL</b>                    | 2                    | 3                      | 2              | 5                     | 4                         | 6                      | 3                     |

*Tabla 7 Calificación según el control de esorrentía. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

La opción más viable para el control de esorrentía es la Zanja de Infiltración, con una puntuación de 6, seguido de los pavimentos permeables, mientras que las cunetas verdes y los alcorques no son la mejor opción, si el propósito del Sistema de drenaje es la reducción de volúmenes de agua.

## 9.3. AMENIDAD Y CONFLICTOS DE USO

Al implementar cualquier proyecto en una determinada zona, es importante conocer la afectación que ha de producir el mismo sobre los habitantes, es por este motivo que los SUDS, más allá de su función de controlar la escorrentía, mejorar la calidad del agua, etc., también cumplen con su propósito en al ámbito paisajístico, el cual se determina por su estética y por la funcionalidad con relación a la población que se beneficia de estas estructuras. Para saber qué tan amenos son los SUDS se evalúan los factores de Amenidad, Actividades en el sitio y seguridad.

| Tipología<br>Amenidad<br>y conflictos de<br>uso | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje extendido | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de almacenamiento | Zanjas de infiltración | Zona de bio-retención |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Amenidad                                        | M                    | A                                | M              | N/A                   | N/A                       | N/A                    | A                     |
| Actividades en el sitio                         | B                    | M                                | A              | B                     | B                         | M                      | A                     |
| Seguridad                                       | B                    | M                                | A              | B                     | B                         | M                      | M                     |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>4</b>             | <b>7</b>                         | <b>8</b>       | <b>2</b>              | <b>2</b>                  | <b>4</b>               | <b>8</b>              |

*Tabla 8. Calificación según la Amenidad y conflictos de usos por tipología. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

#### 9.4. MANTENIMIENTO

Toda infraestructura urbana requiere de mantenimiento para garantizar su labor de la forma óptima posible. Este criterio se evalúa según la frecuencia del mantenimiento que requiera la estructura

dependiendo del punto de colmatación del SUDS cuando se tiene un medio filtrante y capas superficiales de vegetación.

| Tipología                | Alcorques<br>Inundables |   |   | Cuenca seca de<br>drenaje extendido |   |   | Cunetas verdes |   |   | Pavimentos<br>permeables |   |   | Tanques de<br>almacenamiento |   |   | Zanjas de<br>infiltración |   |   | Zona de bio-<br>retención |   |   |
|--------------------------|-------------------------|---|---|-------------------------------------|---|---|----------------|---|---|--------------------------|---|---|------------------------------|---|---|---------------------------|---|---|---------------------------|---|---|
| Frecuencia<br>Tipo       | M                       | S | A | M                                   | S | A | M              | S | A | M                        | S | A | M                            | S | A | M                         | S | A | M                         | S | A |
| Regular                  | 4                       | 3 | 0 | 5                                   | 2 | 0 | 5              | 3 | 0 | 3                        | 0 | 0 | 3                            | 0 | 0 | 4                         | 3 | 0 | 4                         | 2 | 0 |
| Ocasional                | 0                       | 3 | 4 | 0                                   | 4 | 0 | 0              | 4 | 2 | 1                        | 0 | 1 | 0                            | 3 | 1 | 0                         | 2 | 1 | 0                         | 5 | 5 |
| Correctivo               | 0                       | 1 | 8 | 0                                   | 1 | 6 | 0              | 2 | 8 | 0                        | 2 | 6 | 0                            | 1 | 5 | 0                         | 0 | 8 | 0                         | 1 | 8 |
| Riesgo de<br>Colmatación | M                       |   |   | B                                   |   |   | B              |   |   | A                        |   |   | B                            |   |   | A                         |   |   | M                         |   |   |
| <b>TOTAL</b>             | 2                       |   |   | 1                                   |   |   | 1              |   |   | 3                        |   |   | 1                            |   |   | 3                         |   |   | 2                         |   |   |

*Tabla 9 Calificación según la frecuencia de mantenimiento. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

## 9.5. COSTOS

Para determinar la magnitud del costo se tiene en cuenta la instalación del Sistema de drenaje, el mantenimiento y la frecuencia con la que se debe hacer mejoras al mismo. En esta característica la escala está invertida, donde:

- Alto= 1
- Medio= 2
- Bajo= 3

| Tipología<br>Costos     | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de | Zanjas de infiltración | Zona de bio-retención |
|-------------------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|------------|------------------------|-----------------------|
| Costos de capital       | M                    | M                      | B              | A                     | M          | M                      | M                     |
| Costos de mantenimiento | A                    | M                      | B              | M                     | M          | M                      | M                     |
| <b>TOTAL</b>            | 3                    | 4                      | 6              | 3                     | 4          | 4                      | 4                     |

*Tabla 10 Calificación según el costo de cada tipología. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

## 10. EVALUACIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS DE SUDS

Para definir cuál de las anteriores tipologías es la más acertada para el proyecto, partimos de la problemática que se desea solucionar en el municipio, en cuyo caso es el mejoramiento de la calidad de agua, seguido por el manejo de escorrentía y por último los costos, teniendo esto en cuenta, como se ve en la Tabla 11, se asigna un porcentaje a cada criterio según la importancia y se hace un promedio ponderado para cada tipología según los 5 aspectos que se evaluaron en el punto anterior.

| Tipología<br>Criterio de Selección | Porcentaje (%) | Alcorques Inundables | Cuenca seca de drenaje | Cunetas verdes | Pavimentos permeables | Tanques de almacenamiento | Zanjas de infiltración | Zona de bio-retención |
|------------------------------------|----------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Mejoramiento en calidad del agua   | 35             | 4.2                  | 3.85                   | 3.15           | 3.85                  | -                         | 4.55                   | 4.55                  |
| Control de volúmenes               | 20             | 0.4                  | 0.6                    | 0.4            | 1                     | 0.8                       | 1.2                    | 0.6                   |
| Amenidad y conflictos de uso       | 10             | 0.4                  | 0.7                    | 0.8            | 0.2                   | 0.2                       | 0.4                    | 0.8                   |
| Mantenimiento                      | 15             | 0.3                  | 0.15                   | 0.15           | 0.45                  | 0.15                      | 0.45                   | 0.30                  |
| Costos                             | 20             | 0.6                  | 0.8                    | 1.2            | 0.6                   | 0.8                       | 0.8                    | 0.8                   |
| <b>TOTAL</b>                       | 100            | 5.9                  | 6.1                    | 5.7            | 6.1                   | 1.95                      | 7.4                    | 7.05                  |

*Tabla 11 Evaluación de selección definitiva de SUDS. Fuente: propia (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

La Tabla 11, arrojó como resultado las tipologías que más se adaptan a las necesidades demandadas por el municipio de Paratebueno, las cuales fueron Zanjas de infiltración (7.4) y Zona de bio-retención (7.05) teniendo las calificaciones más altas, por otra parte, el Pavimento permeable y la Cuenca seca de drenaje extendido obtuvieron el mismo puntaje, por tanto, se escoge la que brinde mayores beneficios a la comunidad en cuanto a la problemática a resolver, en cuyo caso es el Pavimento permeable, puesto que la Cuenca requiere una extensión de terreno considerable con el cual no se cuenta, y no es posible diseñarla sin este criterio.

#### 10.1. DISEÑO CONCEPTUAL



*Ilustración 11 Diseño conceptual de SUDS en el municipio de Paratebueno. Fuente: propia (Adaptado de Google Earth)*

La Ilustración 11 es una visualización de cómo se esperan implementar los SUDS a la infraestructura del municipio, teniendo en cuenta criterios de localización especificados para cada tipología seleccionada. En el caso de los pavimentos permeables, se ubican en la parte meridional del casco urbano y se aprovecha la pendiente, las zanjas de infiltración son ubicadas en los separadores cercanos al parque principal ya que está localizado en una zona de pendiente media y se debe evitar que las zanjas se obstruyan por los sedimentos o escombros que pueda arrastrar la esorrentía, por ende, no se deben ubicar en el punto más bajo del municipio por riesgo de colmatación. Y, por último, las zonas de bio-retención, fueron ubicadas cerca a zonas de recreación para así complementar los espacios públicos y aprovechar su terreno.

## 11. DISEÑO HIDROLÓGICO

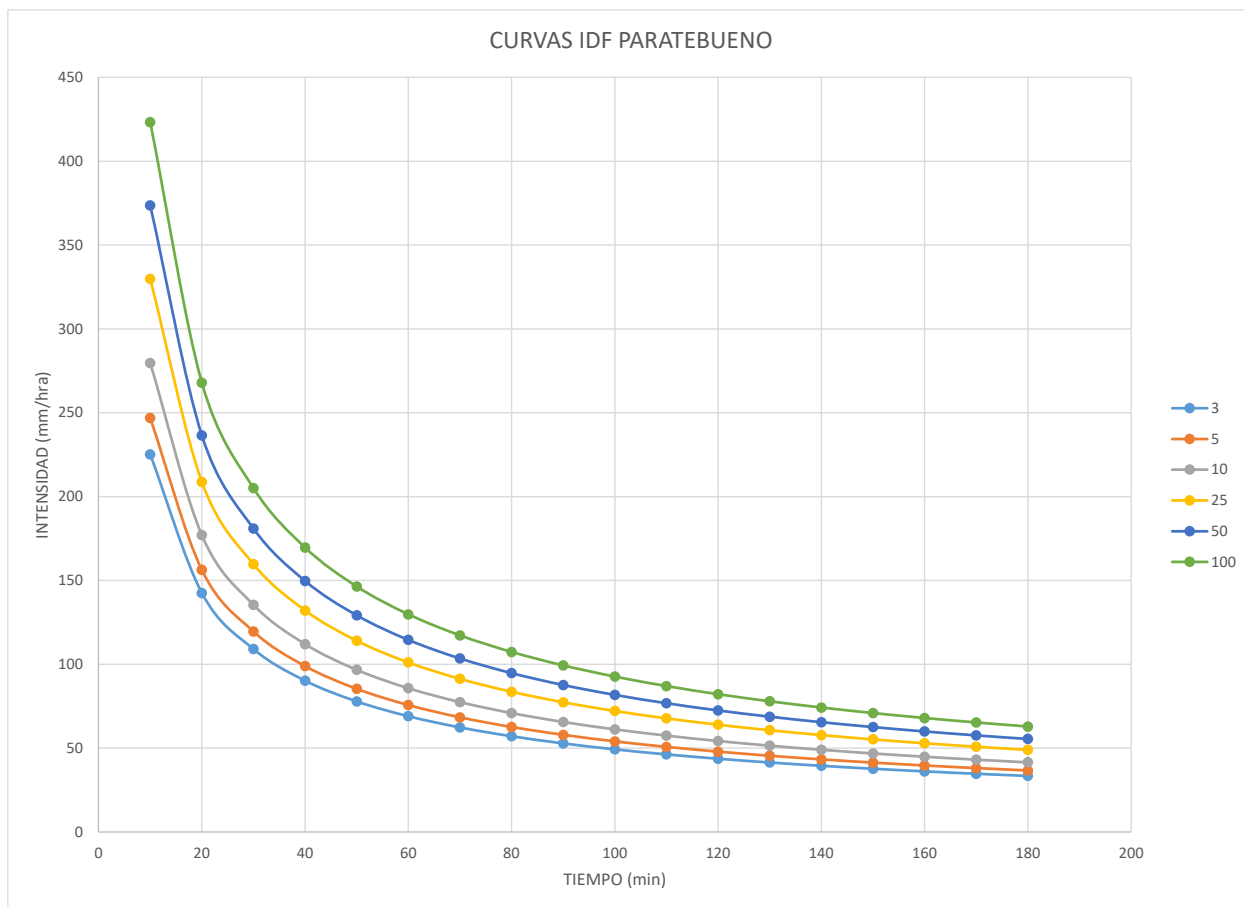
Para implementar los Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles, es necesario conocer las condiciones de lluvia del lugar de intervención, iniciando con las estaciones hidrológicas y sus datos. A partir de esto se hace un tratamiento de dicha información para obtener las curvas IDF y los hietogramas de precipitación. Luego, con estas gráficas se estima la cantidad de precipitación en determinado periodo de tiempo, aparte de esto, basado en la NS-166 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SUDS del Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental (CIIA), se determina el Volumen de Calidad o tratamiento ( $V_c$ ) y la profundidad del agua ( $hp$ ).

#### 11.1. CURVAS DE INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF)

Para el cálculo de las curvas IDF se realizó la búsqueda de estaciones hidrometeorológicas que se encontraran dentro o cerca del municipio de Paratebueno, de las cuales seleccionamos la estación EL JAPÓN [35055010] de categoría Climática Ordinaria, operada por el IDEAM, como estación principal, y las estaciones HACIENDA LA CABAÑA [35045020] y SAN JUANITO [35050020] como estaciones secundarias ya que sus datos no estaban del todo completos y no eran tan próximas al casco urbano del municipio como la primera estación.

De estas estaciones se obtuvieron series de precipitaciones máximas en 24 horas desde 1980 hasta el 2018 y mediante una regresión lineal se complementaron los datos de la estación primaria, para así, hallar las precipitaciones máximas mensuales y las totales anuales, durante el mismo intervalo de años.

Con esta matriz de datos obtenida, hallamos las curvas IDF (Gráfica 1) mediante el método simplificado propuesto por INVIAS donde su ecuación de Intensidad se define:



*Gráfica 1 Curvas IDF. Fuente: propia*

## 11.2. HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN

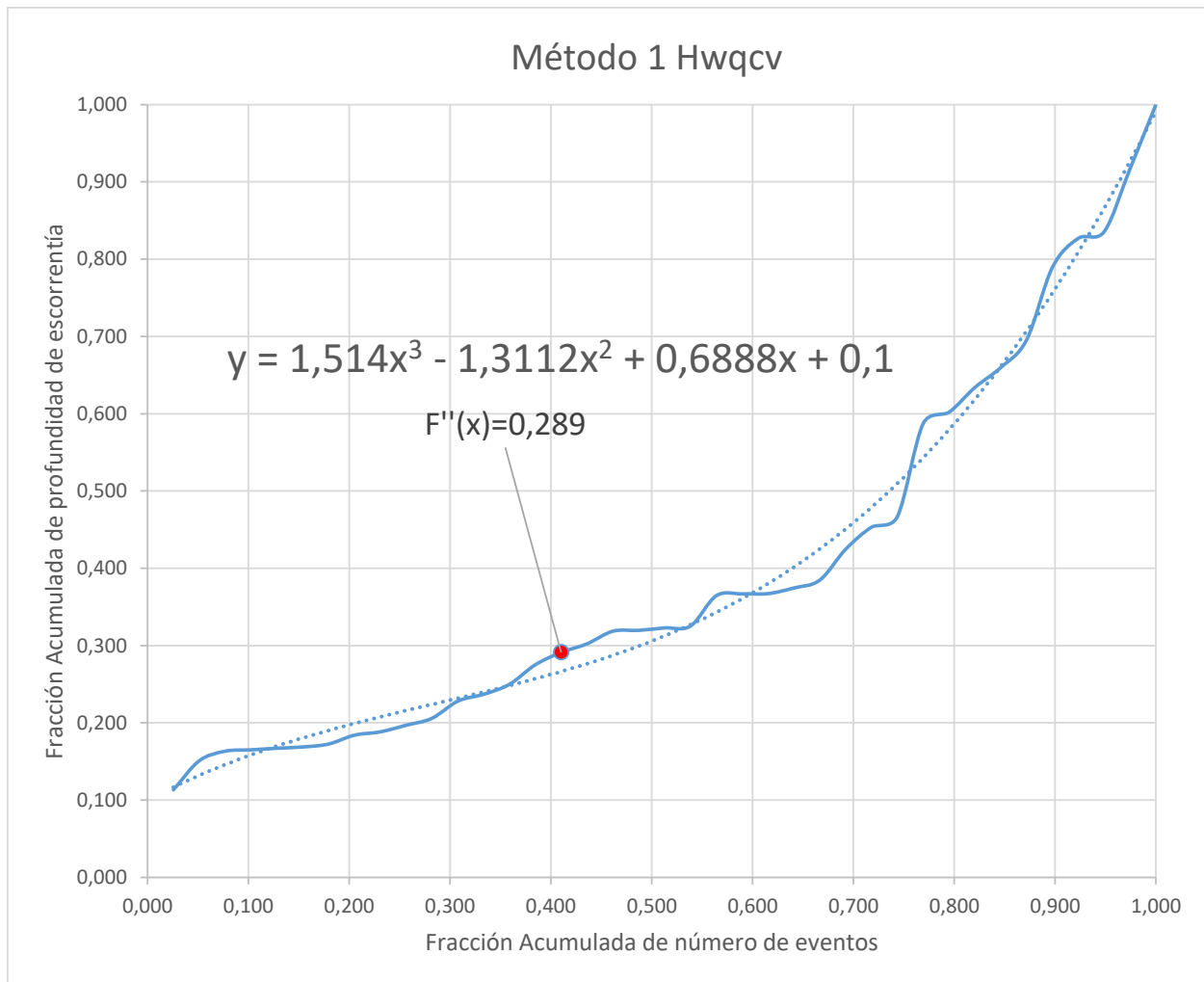
A partir de la información obtenida anteriormente se grafican los hietogramas con los mismos periodos de retorno y duraciones de las Curvas IDF. Véanse completos en el Anexo 17.2.



*Gráfica 2 Hietograma de precipitación T retorno 3 años. Fuente: Propia.*

### 11.3. Determinación de la profundidad de lámina ( $h_{QWCV}$ )

Teniendo la información de tres estaciones hidrológicas del municipio es posible implementar el Método 1. A partir de series históricas de escorrentía (CIHA & EAAB, 2017) para hallar  $h_{QWCV}$ , el cual, según el punto de inflexión de la Gráfica 3, tiene un valor de  $h_{QWCV} = 28,9 \text{ mm}$ .



*Gráfica 3 Histograma acumulado normalizado  $h_{QWCV}$  vs  $h_{QWCV MÁX}$ . Método 1. A partir de series históricas de escorrentía para la determinación de la profundidad de lámina de agua.  
Fuente: Propia. (Adaptada de CIIA & EAAB, 2017)*

## **12. DISEÑO DE SUDS SELECCIONADOS**

### **12.1. PAVIMENTO PERMEABLE**

Para implementar el pavimento permeable en Paratebueno se seleccionaron 2 rutas en la zona sur del municipio, la carrera 9ª y la carrera 10 entre las calles 4ª sur y 6ª sur. Más allá de retribuir al embellecimiento de la zona, lo que se busca al implementar los SUDS en esta área, es recolectar parte de la escorrentía proveniente de la zona más alta del pueblo antes de que llegue a la zona de vertimiento.

## 12.2. Diseño hidráulico

### 12.2.1. Tipo de pavimento

Para dimensionar la estructura del pavimento se adopta la Metodología “*Urban Drainage and Flood Control District*”, *Denver (2010)*, donde es necesario saber el tipo de infiltración que se adapta al terreno partiendo de características físicas del mismo, basándose en “*The SUDS Manual (2015)*” se tiene en cuenta el tipo de suelo, la permeabilidad, el nivel freático y el CBR, por consiguiente, en este caso de estudio se tienen las siguientes características:

| CARACTERÍSTICAS DEL SUELO |                    |     |
|---------------------------|--------------------|-----|
| TIPO DE SUELO             | ARCILLA LIMOSA     |     |
| PERMEABILIDAD             | $1 \times 10^{-8}$ | m/s |
| NIVEL FREÁTICO            | N/A                | m   |
| CBR                       | 3                  | %   |

Tabla 12 Características del suelo. Fuente: Propia

Según el estudio de suelos proporcionado por *EPC Empresas Públicas de Cundinamarca*, el Nivel freático de la zona es imperceptible puesto que se realizó un sondeo hasta los 3 m del subsuelo y no se encontró presencia de este, además, el perfil estratigráfico de Paratebueno cuenta con tres capas hasta los 2 m de profundidad de arcilla con limos y arcilla con arena, partiendo de las características típicas de este tipo de suelos, se determinó el valor de los demás factores.

A parte de lo anterior, se tuvo en consideración aspectos como la presencia de contaminantes que se infiltrarán en el sistema de drenajes y actividades económicas que afectarán las condiciones del terreno, como la minería, al ser estos inexistentes, se considera necesario implementar un pavimento permeable Tipo B o de infiltración parcial.

Por otro lado, para la capa de rodadura se propone implementar adoquines entrelazados, ya que es una zona de bajo tráfico y al no ser una zona de intervención tan amplia, no se ve afectada la amenidad por parte de los vehículos.

Volumen de diseño  $V_c$

La principal variable por determinar en la fase de diseño del sistema es el volumen requerido para el funcionamiento apropiado de la estructura, para lo cual es importante identificar el área que contribuirá al volumen de agua al mismo, denominada área tributaria. De igual manera, se debe considerar el tipo de superficie que se va a tener en cuenta como vías en cierto tipo de material, zonas verdes y andenes (CIHA & EAAB, 2017). En la Tabla 13 y la Ilustración 12 se puede observar cómo están distribuidas estas áreas.

| ÁREA TRIBUTARIA | m <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------|
| VÍAS            | 1996           |
| ANDENES         | 420            |
| ZONAS VERDES    | 252            |
| ÁREA TOTAL      | 2668           |

*Tabla 13 Área de drenaje para SUDS tipo Pavimento permeable. Fuente: propia*



*Ilustración 12 Mapa área tributarias o de drenaje. Fuente: propia Adaptado de Google Earth*

Por otra parte, tiene presente el coeficiente de escorrentía (C) que indica la permeabilidad del área dependiendo de las condiciones que esta tenga, el cual es asignado según la *NS-085 Criterios de diseño de alcantarillado*, donde para el caso de estudio corresponde:

| TIPO DE SUPERFICIE                                        | C    |
|-----------------------------------------------------------|------|
| ZONAS URBANIZADAS                                         |      |
| VÍAS NO PAVIMENTADAS Y SUPERFICIES CON SUELOS COMPACTADOS | 0,6  |
| ZONAS VERDES (Jardines, Parques, etc.)                    |      |
| TERRENO PLANO (Pendiente menor al 2%)                     | 0,25 |
| PROMEDIO PONDERADO                                        | 0,58 |

*Tabla 14 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. Fuente: NS-085 Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado. (2009)*

Y, por último, la profundidad de la lámina de agua  $h_p$ , calculada en el punto 11.3, así mediante la siguiente ecuación se obtiene  $V_c$ :

$$V_c = C \cdot h_p \cdot A$$

$$V_c = 0,68 \text{ m}^3$$

Para el diseño hidráulico, se plantea la relación tributaria impermeable la cual indica que, el área del pavimento permeable debe ser al menos el 5% del área tributaria, y su valor no debe ser mayor a 2. (Tabla 15). Posterior a esto, se calcula el volumen del reservorio, para lo cual es necesario establecer la profundidad y pendiente del reservorio, y la profundidad del borde libre que está predeterminada como 0,0254 m y la pendiente se deja igual al terreno natural, o sea, cero, lo que indica que no se requieren barreras de flujo lateral. A parte se fija la porosidad según el material escogido, en este caso, adoquines, a lo cual le corresponde una porosidad del 40%. (Tabla 16)

| <b>DISEÑO HIDROLÓGICO</b>               |         |                |
|-----------------------------------------|---------|----------------|
| Parámetro                               | Valor   | Unidades       |
| Área tributaria ( <b>Ad</b> )           | 2668    | m <sup>2</sup> |
| Coeficiente de escorrentía ( <b>C</b> ) | 0,58    | Adim.          |
| Profundidad de lluvia ( <b>hp</b> )     | 0,00044 | m              |
| Volumen de diseño ( <b>Vc</b> )         | 0,68    | m <sup>3</sup> |

Tabla 15 Datos para cálculo del volumen de almacenamiento requerido. Fuente: Propia

| <b>PARÁMETRO</b>                          | <b>VALOR</b> | <b>UNIDADES</b> |
|-------------------------------------------|--------------|-----------------|
| Profundidad del reservorio ( <b>dcr</b> ) | 0,15         | m               |
| Porosidad ( <b>ncr</b> )                  | 0,4          |                 |
| Profundidad del borde libre (dL)          | 0,025        | m               |
| Área Pavimento Permeable ( <b>As</b> )    | 1168         | m <sup>2</sup>  |

Tabla 16 Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento del reservorio. Fuente: Propia

| PARÁMETRO                                                                               | VALOR | UNIDADES |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|
| Impermeabilidad Efectiva ( <b>R<sub>in</sub></b> )                                      | 0,58  | %        |
| Relación Tributaria de Impermeabilidad ( <b>R<sub>t</sub></b> )                         | 0,75  | Adim.    |
| Relación As/Ad                                                                          | 43,78 | %        |
| Diámetro del Orificio para un Tiempo de Drenaje de 12 horas<br>( <b>D<sub>o</sub></b> ) | 1,05  | m        |
| Distancia entre tuberías                                                                | 0,46  | m        |

Tabla 17 Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento del reservorio. Fuente: Propia

#### 12.2.2. Diseño estructural

##### Determinación CBR y Categoría de Tráfico

Como se había mencionado en la sección 12.2.1 el terreno donde se va a implementar el SUDS cuenta con un suelo arcillo-limoso al cual le corresponde un valor de CBR de 3, según “The SUDS Manual”. Además, teniendo en cuenta la ubicación del sitio y su flujo de tránsito, se determina este como categoría 3, ya que el tráfico se limita a peatones, ciclistas y algunas veces automóviles y vehículos de carga liviana.

##### Consideraciones de diseño

Según “The SUDS Manual” usando el enfoque de diseño ICPI (2011), se determinan los espesores de capa (Tabla 18) basados en la categoría de tráfico, los cuales también dependen del diseño hidráulico.

| ESPESOR TÍPICO DE CONSTRUCCIÓN PARA PAVIMENTACIÓN MODULAR |                                                           |            |      |          |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------|------|----------|
| Categoría de Tráfico                                      | Espesor de tipo de superficie<br>(Adoquines Entrelazados) | Subrasante | Base | Sub-Base |

|   |       |       |   |        |
|---|-------|-------|---|--------|
| 3 | 60 mm | 50 mm | - | 225 mm |
|---|-------|-------|---|--------|

Tabla 18 Espesor de estructura de pavimento según categoría de tráfico. Fuente: Adaptado de “The SUDS Manual” (2015)

### 12.2.3. Esquema Pavimento Permeable

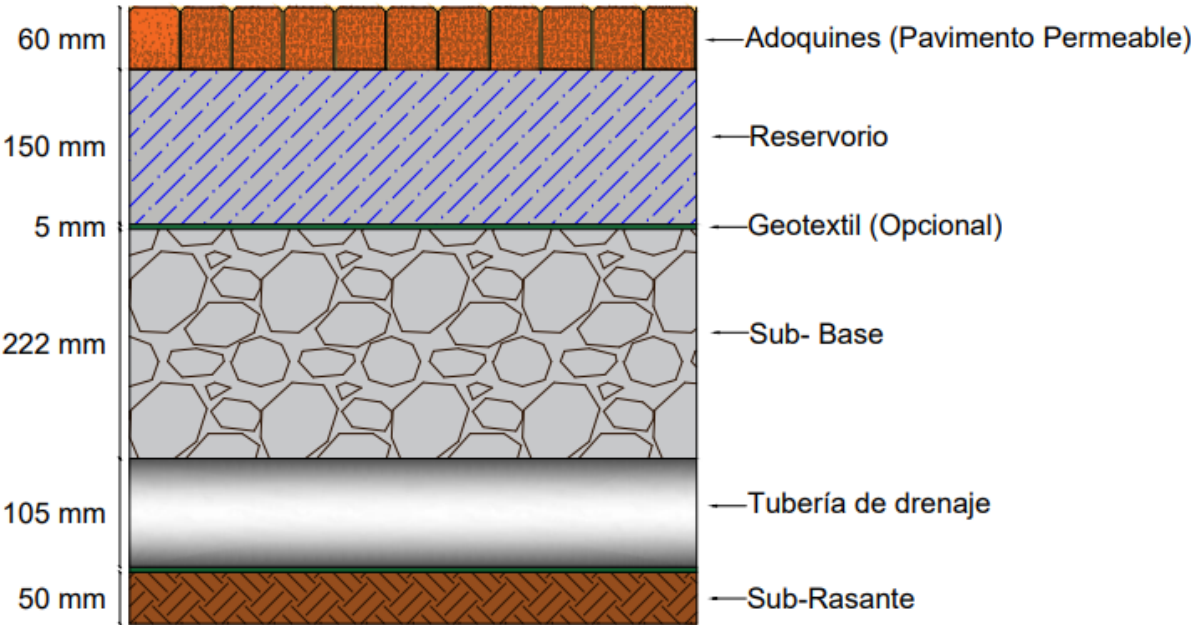


Ilustración 13 Esquema Pavimento Permeable. Fuente: Propia

### 12.3. ZANJAS DE INFILTRACIÓN

Esta tipología, según la evaluación, es la más calificada por su enfoque en el manejo de esorrentía y por su fácil instalación y/o adecuación al entorno, la instalación de este SUDS se propone entre la carrera 6 a la carrera 7 sobre la calle 2, esta manzana está libre de obras de construcción y zonas industriales, con el fin de evitar la acumulación de sedimentos y/o escombros en el sistema lo cual interfiere en su operación.

#### 12.3.1. Diseño Hidráulico

Volumen de diseño ( $V_c$ )

Para el  $V_c$ , se tuvo en cuenta la profundidad de lluvia  $h_p$  obtenida en el punto 11.3 siendo esta equivalente a 4 mm, por otro lado, el Coeficiente de escorrentía es de 0,6, ya que la zona seleccionada para la zanja es una vía no pavimentada. (Tabla 19)

| TIPO DE SUPERFICIE                                        | C   |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| Zonas Urbanizadas                                         |     |
| Vías no Pavimentadas y Superficies con Suelos Compactados | 0,6 |

Tabla 19 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. Fuente: NS-085 Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado. (2009)

Por último, para definir el área tributaria se estimó que zonas pueden contribuir al sistema según la pendiente del terreno y los componentes del sistema de alcantarillado que estén entre las dos manzanas delimitadas, obteniendo un área de 11692 m<sup>2</sup> (Ilustración 14). Teniendo estos tres parámetros se calcula  $V_c$ , igual que en el SUDS anterior, siendo este  $V_c = 30,61\text{ m}^3$ . (Tabla 20)



Ilustración 14 Área tributaria de la Zanja de Infiltración. Adaptado de Google Earth

| DISEÑO HIDROLÓGICO                      |        |                |
|-----------------------------------------|--------|----------------|
| Parámetro                               | Valor  | Unidades       |
| Área tributaria ( <b>Ad</b> )           | 11692  | m <sup>2</sup> |
| Coeficiente de escorrentía ( <b>C</b> ) | 0,60   | Adim.          |
| Profundidad de lluvia ( <b>hp</b> )     | 0,0044 | m              |
| Volumen de diseño ( <b>Vc</b> )         | 30,61  | m <sup>3</sup> |

Tabla 20 Variables hidrológicas para el diseño de zanjas. Fuente: Propia

### 12.3.2. Dimensionamiento

Aplicando la metodología de “*Virginia Department of Transportation, Virginia (2013)*” se planteó una zanja con un tiempo de infiltración superficial de 48 horas y un Factor de Seguridad  $FS_a$  de 0,5 según sugerencia de la metodología. Seguido de esto se obtuvo una Tasa de infiltración de Diseño  $F_d$  mediante la siguiente ecuación:

$$F_d = f * FS_a \text{ (Tabla 21)}$$

Con este valor se calcula la profundidad máxima de la zanja, la cual indicará la cantidad de agregado grueso requerido y con la porosidad de este, se calcula la profundidad de agua almacenada y el área mínima de fondo.

Seguido de esto, según el área destinada a implementar la zanja, se determina el ancho y el largo de esta para sacar el área de fondo a tener en cuenta.

| PARÁMETROS DE DISEÑO                         |       |          |
|----------------------------------------------|-------|----------|
| Parámetro                                    | Valor | Unidades |
| Factor de Seguridad ( <b>FSa</b> )           | 0,50  | Adim.    |
| Tasa de Infiltración de Diseño ( <b>Fd</b> ) | 18,00 | mm/h     |

|                                                  |        |                |
|--------------------------------------------------|--------|----------------|
| Tasa de Infiltración ( <b>f</b> )                | 36,00  | mm/h           |
| Tiempo Máximo de Drenaje ( <b>Td</b> )           | 48,00  | H              |
| Profundidad Máxima de la Zanja ( <b>D máx.</b> ) | 0,86   | m              |
| Área Mínima de Fondo ( <b>Af Min.</b> )          | 88,57  | m <sup>2</sup> |
| Área de Fondo ( <b>Af</b> )                      | 126,00 | m <sup>2</sup> |
| Porosidad del Material ( <b>Ng</b> )             | 40,00  | %              |
| Largo de Fondo ( <b>Lf</b> )                     | 84,00  | m              |
| Ancho de Fondo ( <b>Wf</b> )                     | 1,50   | m              |
| Profundidad de Diseño ( <b>d</b> )               | 0,61   | m              |

*Tabla 21 Parámetros de Diseño. Fuente Propia.*

### 12.3.3. Esquema Zanja de Infiltración

Según las recomendaciones de la Guía técnica de diseño y construcción de SUDS, se dispondrá de grava triturada de porosidad al 40% para la capa superficial, la cual tendrá una profundidad de 30 cm, seguido de una capa de arena y roca triturada para la retención de sedimentos con un espesor de 11 mm. Por otro lado, el reservorio está compuesto por una grava de tipo AASHTO No. 3 con una porosidad al 40%, y una profundidad de 86 cm. Por último, para prevenir la compactación del suelo nativo, se instala un geotextil.

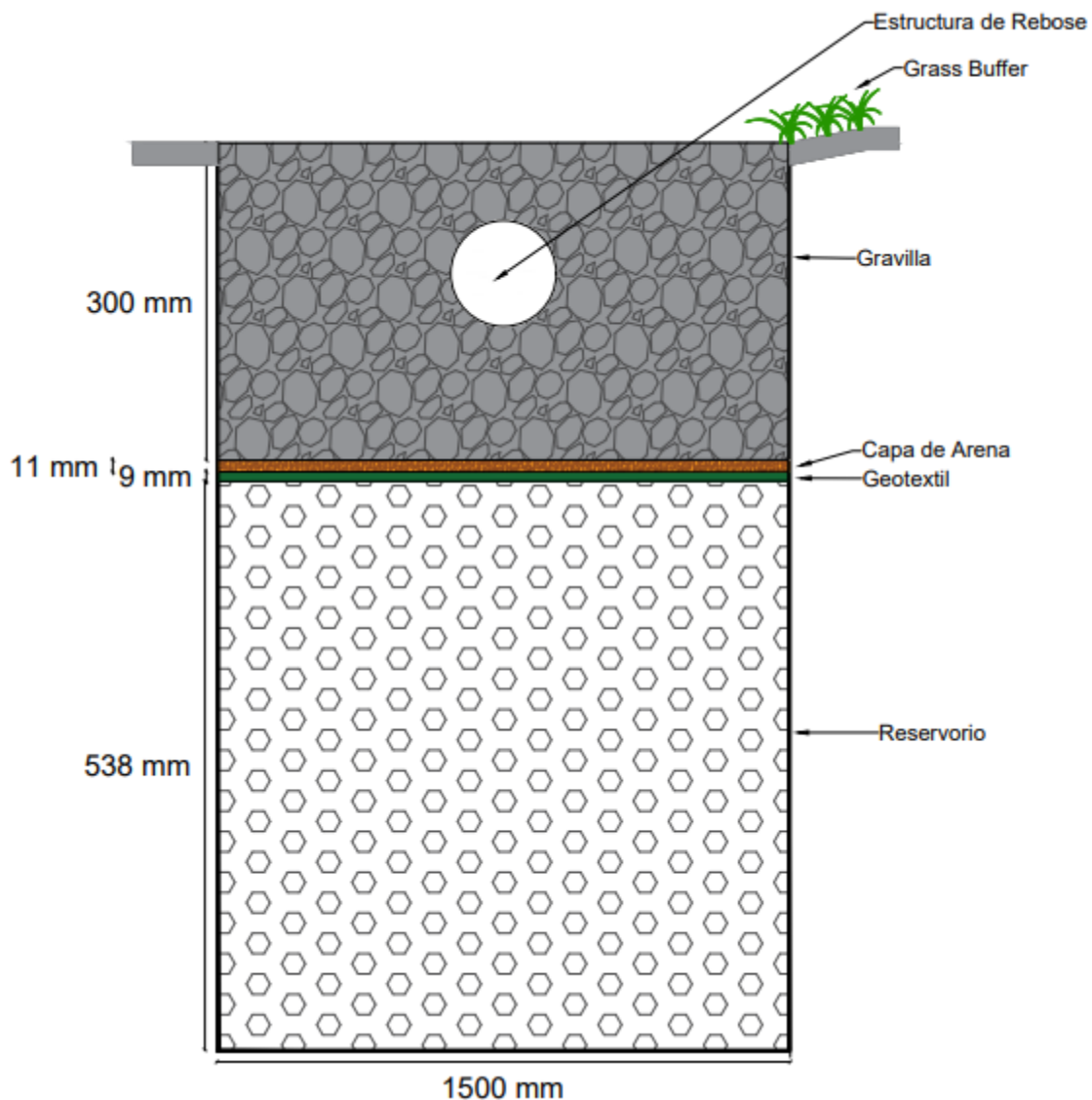


*Ilustración 15 Esquema Zanja de infiltración. Fuente: Propia.*

#### 12.4. ZONA DE BIO-RETENCIÓN

Para esta tipología se hizo un aprovechamiento del paisaje del parque principal, ya que cuenta con un tipo de jardín al cual se le puede dar un doble uso, adaptando la flora que hay en el área seleccionada e implementando la estructura de un sistema de drenaje se cumplirían con los tres objetivos principales de este sistema, que son el manejo de escorrentía, calidad del agua y paisajismo.

#### 12.4.1. Diseño hidrológico

Volumen de diseño  $V_c$

Para hallar este parámetro se tiene en cuenta la profundidad de lluvia  $hp = 4 \text{ mm}$ , el coeficiente de escorrentía, que depende de las características del suelo donde se instala el sistema de drenaje (Tabla 23) y el área tributaria, que en este caso es parte del parque principal y la manzana cuya cota sea más alta, es decir entre la calle 3 y calle 2 y entre la carrera 11 y carrera 10. (Ilustración 16)

| TIPO DE SUPERFICIE                     | C    |
|----------------------------------------|------|
| Zonas Verdes (Jardines, Parques, etc.) |      |
| Terreno Plano (Pendiente menor al 2%)  | 0,25 |

Tabla 22 Valores del Coeficiente de Escorrentía C. Fuente: NS-085 Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado. (2009)



Ilustración 16 Área tributaria de la Zona de bio-retención. Fuente: Propia. Google Earth.

### DISEÑO HIDROLÓGICO

| Parámetro                               | Valor   | Unidades       |
|-----------------------------------------|---------|----------------|
| Área tributaria ( <b>Ad</b> )           | 8837,00 | m <sup>2</sup> |
| Coeficiente de escorrentía ( <b>C</b> ) | 0,25    | Adim.          |
| Profundidad de lluvia ( <b>hp</b> )     | 0,00044 | m              |
| Volumen de diseño ( <b>Vc</b> )         | 9,64    | m <sup>3</sup> |

*Tabla 23 Variables hidrológicas. Fuente: Propia.*

#### 12.4.2. Dimensionamiento

En primer lugar, se determinó que la zona de bio-retención tendrá una infiltración parcial por lo que no se hará uso de geotextiles ya que el agua infiltrada se conduce por tuberías al sistema de drenaje. Para el dimensionamiento, se establece una profundidad de 30 cm con una base plana para evitar el empozamiento y la acumulación de sedimentos. Además, se calcula el área superficial y de fondo para obtener el volumen total del SUDS. (Tabla 24)

##### Sustrato

En esta capa, de grosor aproximado a 45 cm, se usará arena, la cual cumple con la función de filtrar material fino y de conservar nutrientes para la vegetación, para lo cual se debe agregar una capa de 5 cm de componentes orgánicos, como lo puede ser la madera desmenuzada o compost, esta mezcla debe cumplir con un pH adecuado para no perjudicar la flora.

##### Sistema de drenaje

El drenaje se puede emplear con tuberías perforadas, siempre y cuando la tasa de infiltración sea dos veces menor a la necesaria para drenar el  $V_c$  en 12 horas. Sin embargo, en este caso no aplica esta pauta, así que se implementa una placa perforada, cuyo orificio de salida tiene un diámetro de 1 cm por recomendación de la NS-166.

|                             |
|-----------------------------|
| <b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b> |
|-----------------------------|

| Parámetro                                                                                    | Valor  | Unidades       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| Área Superficial ( <b>As</b> )                                                               | 308,00 | m <sup>2</sup> |
| Área Mínima de Fondo ( <b>af mín</b> )                                                       | 21,42  | m <sup>2</sup> |
| Volumen Total ( <b>V</b> )                                                                   | 549,03 | m <sup>3</sup> |
| Diámetro de los Orificios ( <b>Do</b> )                                                      | 0,52   | m              |
| Distancia de la Superficie del Estrato de Filtración al Centro de las Tuberías ( <b>Do</b> ) | 0,23   | m              |
| Capa de Drenaje ( <b>dc</b> )                                                                | 23,00  | cm             |
| Pendiente lateral ( <b>Z:1</b> )                                                             | 4,1    | m:m            |
| Profundidad de diseño ( <b>d</b> )                                                           | 0,30   | m              |
| Tasa de Infiltración                                                                         | 36,00  | mm/h           |

*Tabla 24 Parámetros de diseño de la zona de bio-retención. Fuente: Propia.*

#### 12.4.3. Esquema Zona de Bio-Retención

La capa superficial se dispone a 30 cm de profundidad, debe estar libre de ramas, piedras, entre otros objetos de un tamaño menor a 5 cm, la siguiente es la capa filtrante o sustrato la cual debe ser de 45 cm de espesor y debe estar compuesta en un 85% arena, 12,75% arena gruesa, 2,25% mezcla orgánica de compost y madera desmenuzada o papel.

Finalmente, la capa de drenaje de 23 cm de profundidad, compuesta de un agregado grueso ASTM #57 en la cual se ubica la placa perforada de tal manera que tenga una profundidad de 15 cm sobre el orificio y 8 cm por debajo de este, a parte, en medio del sustrato y la capa de drenaje, se usa un geotextil para evitar el lavado entre los dos materiales.

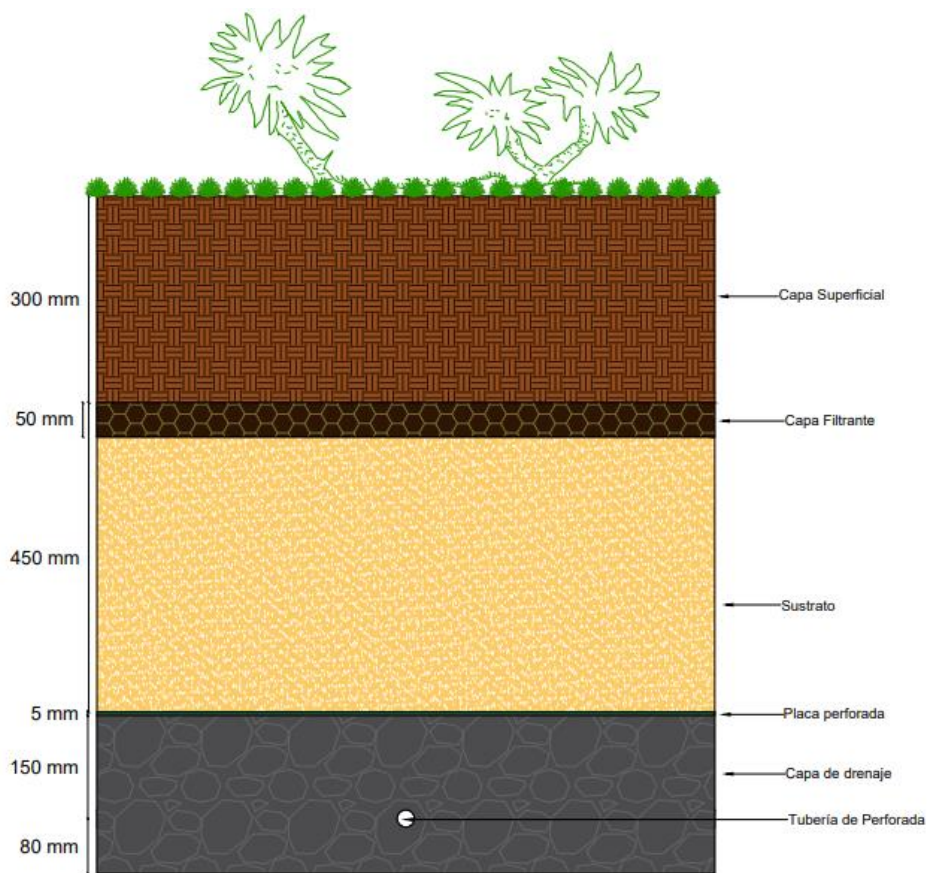


*Ilustración 17 Esquema de la zona de bio-retención. Fuente: Propia*

## 12.5. ESTRUCTURAS ANEXAS

Para las tres tipologías, se recomienda incluir estructuras que mejoran el desempeño de los sistemas de drenaje, ahorrando en factores de mantenimiento y costos, estas sugerencias están condicionadas a las zonas donde se implementen los SUDS y a las condiciones hidrológicas, estas estructuras pueden ser de pretratamiento, entrada o salida. En la Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27 se especifica bajo qué condiciones es pertinente anexar estas estructuras, asignando un valor según sea el caso. Los cuales son:

- 1: Obligatorio.
- 2: Obligatorio, si el volumen de esorrentía se capta de un sumidero vial.
- 3: Obligatoria, si el flujo de esorrentía ingresa de manera difusa.

- 4: Obligatoria, si la esorrentía ingresa de forma puntual o concentrada.
- 5: Obligatoria, si la tipología no hace parte de un tren de tratamiento.
- 6: Obligatoria, si en el diseño la esorrentía ingresa desde superficies impermeables (vías) a área adyacentes.
- 7: Obligatoria, si la esorrentía se capta y concentra en tuberías.
- 8: Obligatoria, si la tipología se localiza de forma intermedia en un tren de tratamiento.
- 9: Obligatoria, si la esorrentía proviene de una estructura anexa de entrada que concentre el flujo.
- 10: Obligatoria, si el flujo de esorrentía ingresa de forma concentrada.
- 11: Obligatoria, si la tipología no está en capacidad de manejar el caudal de diseño para sistemas de alcantarillado pluvial.

#### 12.5.1. Pre-tratamiento

| Estructura de Pre-<br>Tratamiento | Tipologías             |                     |                       |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|                                   | Zanjas de infiltración | Pavimento Permeable | Zona de bio-retención |
| Filtros en los sumideros          | -                      | 1                   | 2                     |
| Franjas de césped                 | 3                      | -                   | 3                     |
| Separador de aceites              | 2                      | -                   |                       |
| Antecámara                        | -                      | -                   | 2 – 4                 |
| Pozos de sedimentación            | 2- 4- 5                | -                   | -                     |

*Tabla 25 . Estructuras anexas de Pre-tratamiento. Fuente: Adaptado de CIIA & EAAB, 2017*

#### 12.5.2. Entrada

| Estructura de Entrada | Tipologías             |                     |                       |
|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|                       | Zanjas de infiltración | Pavimento Permeable | Zona de bio-retención |
|                       |                        |                     |                       |

|         |      |   |     |
|---------|------|---|-----|
| Vado    | 6    | - | 6   |
| Tubería | 7- 8 | 7 | 7-8 |

*Tabla 26 Estructuras anexas de Pre-tratamiento. Fuente: Adaptado de CIIA & EAAB, 2017*

### 12.5.3. Salida

| Estructura de Salida  | Tipologías             |                     |                       |
|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
|                       | Zanjas de infiltración | Pavimento Permeable | Zona de bio-retención |
| Enrocado              | -                      | -                   | 9                     |
| Distribuidor de flujo | -                      | -                   | 10                    |
| Bypass                | 11                     | -                   | -                     |

*Tabla 27 Estructuras anexas de salida. Fuente: Adaptado de CIIA & EAAB, 2017*

## 13. MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Para el municipio de Paratebueno se busca diseñar tres tipologías de SUDS que cumplan con la normatividad de la NS-165 de la EEAB, se hace una modelación mediante el software Storm Water Management Model (SWMM) versión 5.2. En este software se puede ver la escorrentía superficial, así como también la capacidad hidráulica de la red existente y futura del diseño. Para realizar adecuadamente el diseño debemos contar y conocer la infraestructura existente de la red de acueducto del municipio, en ella podemos conocer el diámetro de la red, los pozos, material, longitud y elevaciones; esta información fue suministrada por la Empresa de Servicios Públicos de Cundinamarca.



*Ilustración 18 Red de alcantarillado de Paratebueno, Cundinamarca. Fuente: EPC.*

### 13.1. Análisis del municipio

Para realizar la modelación, se conectaron los pozos de la misma forma en que está el alcantarillado del municipio, así como también se nombraron los pozos de la misma forma. La red de flujo está de sentido Norte a sur, de Oriente a Occidente, como se puede observar en la Ilustración 18 de la Red de alcantarillado.

Se ha diseñado con unos periodos de diseño de 3, 5, 10 y 25 años, uno para cada una de las tipologías planteadas como solución.

Iniciamos con un periodo de diseño de tres años, para lo cual se tiene un tiempo de tormenta de 4 horas, con un tiempo de análisis de 24 horas en donde se observa el comportamiento de la red.

El pico máximo de escorrentía se presenta entre las 2 y las 2:30 horas de tormenta, para analizar este evento, se tomó un intervalo de tiempo de 24 horas donde se evidencia que la tubería no alcanza a vaciar por completo, lo cual genera inundaciones en el casco urbano.

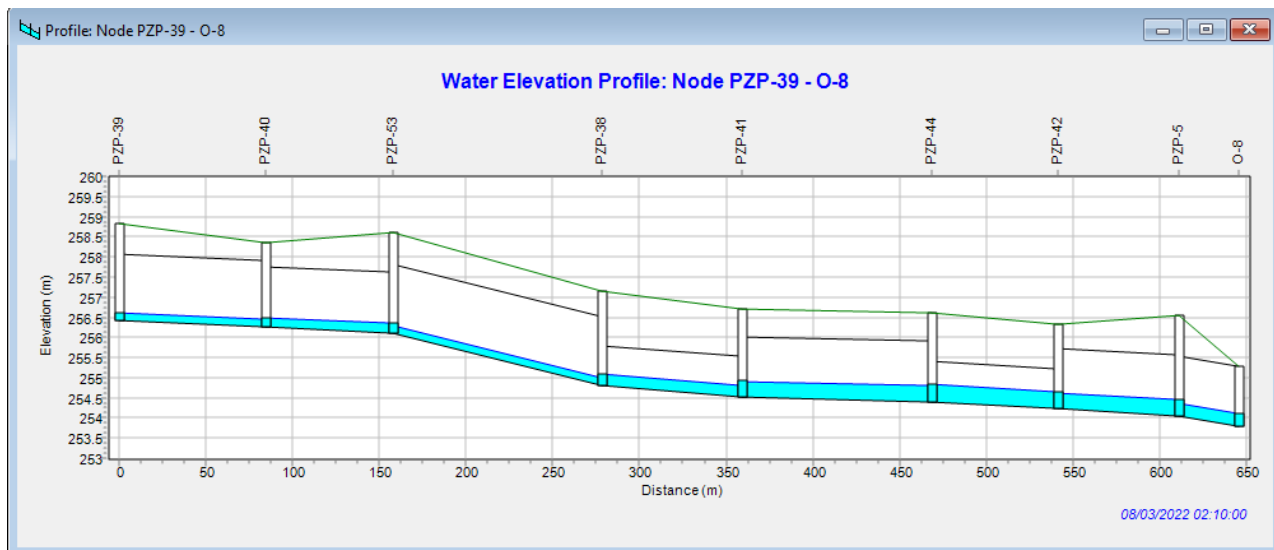


*Ilustración 19 Perfil de Elevación de agua en pozos PZP-39 a O-8. Fuente: Propia*

En la Ilustración 19 se observa el comportamiento que tiene el tramo PZP-39 a O-8 el cual es el tramo de descarga de todo el sistema de alcantarillado del municipio, se puede evidenciar que este llega a un 35% de su capacidad cuando se inicia la tormenta. Este empieza a vaciarse a las 7 horas de iniciar el análisis y se ve que descarga en su totalidad.

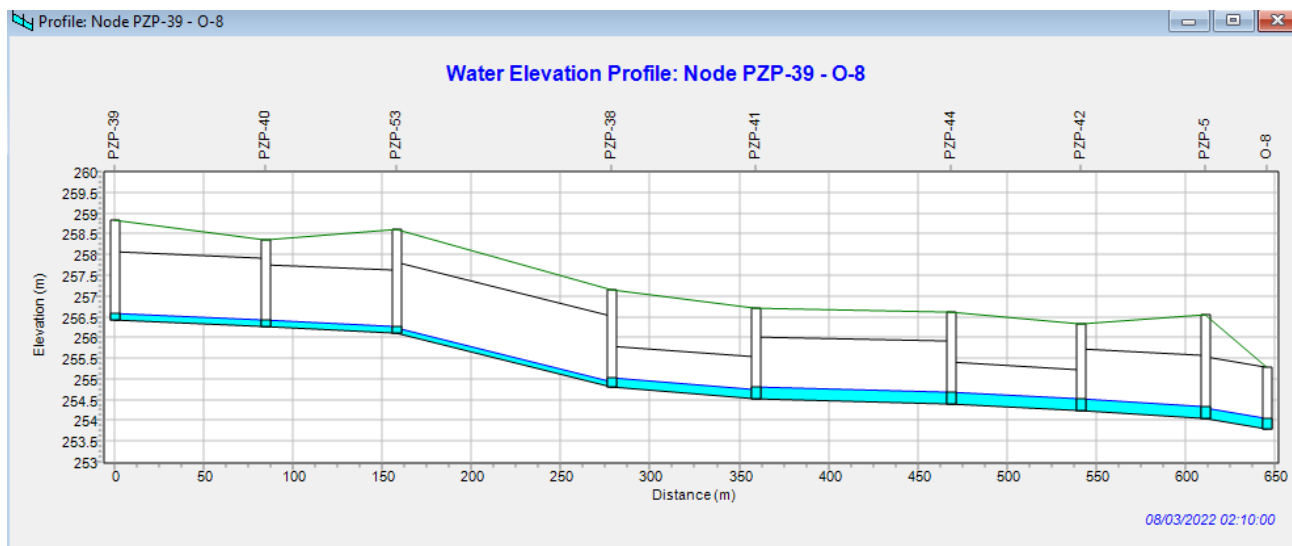


*Ilustración 20 Perfil de Elevación de agua en pozo PZP-14. Fuente: Propia*

## 13.2. MODELACIÓN DE SUDS

### 13.2.1. Pavimentos Permeables

Según el manual de la Universidad de los Andes, para implementar los pavimentos permeables el área de intervención debe tener ciertas características para que la implementación de estos sea de manera óptima, pues se recomienda que en las zonas en donde estos sean implementados no exista el tráfico pesado pues el peso de estos deteriora y desestabiliza el suelo y la estructura de los pavimentos.

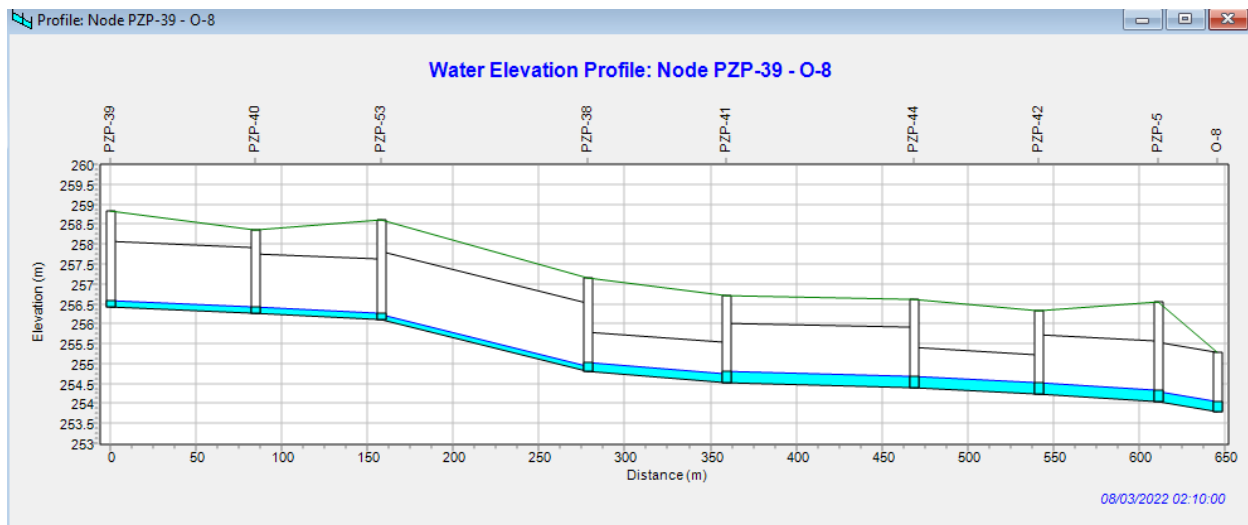


*Ilustración 21 Perfil de agua de PZP-39 a O-8. Fuente: Propia*

### 13.2.2. Zanjas De Infiltración

Se propone implementar este sistema de drenaje en las siguientes redes de flujo: desde el PZP-31 a O-7, como se observa en el perfil. Esta muestra que a las 2 horas de iniciada la tormenta es donde se presente el punto de flujo más alto, es decir el caudal pico producido el fenómeno de la precipitación. En comparación con el sistema actual este inicia su vaciado a las 6 horas de iniciado el análisis, esto se podrá evidenciar más adelante en las gráficas de la comparación de los sistemas.

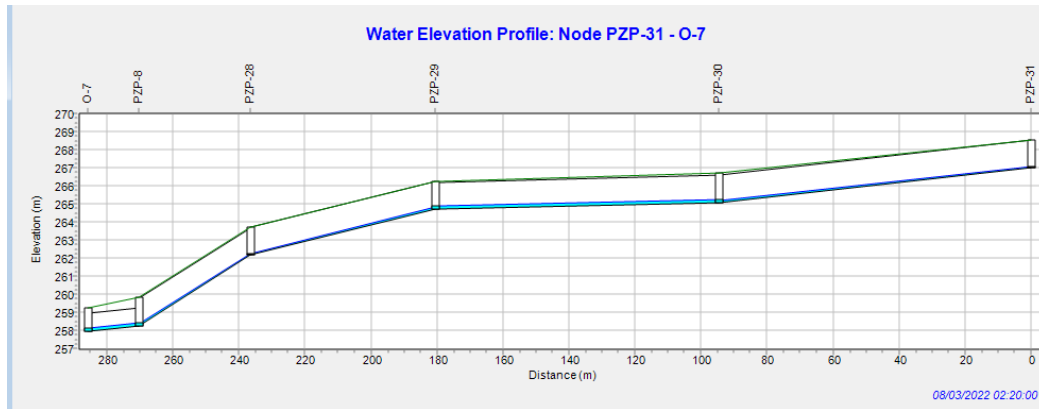


*Ilustración 22 Perfil de agua de PZP-31 a O-7. Fuente: Propia*

### 13.2.3. Zonas De Bio- Retención

Esta tipología se propone implementar en la parte central de municipio de Paratebueno, ubicándose en la red perteneciente a PZP-23 a O-4, pues en esta zona en específico se sitúa el parque principal, en donde la vegetación es una de las características más importantes para este sistema, puesto que se debe cubrir con una parte vegetante y otra filtrante. Las zonas de bio- retención se planea implementar en el PZP-22.

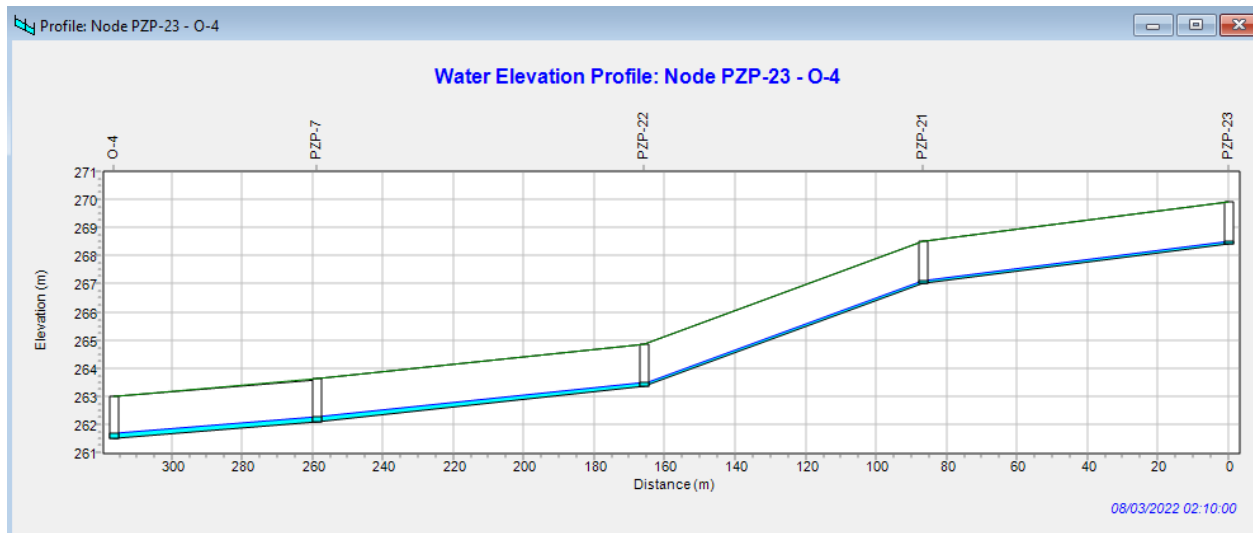
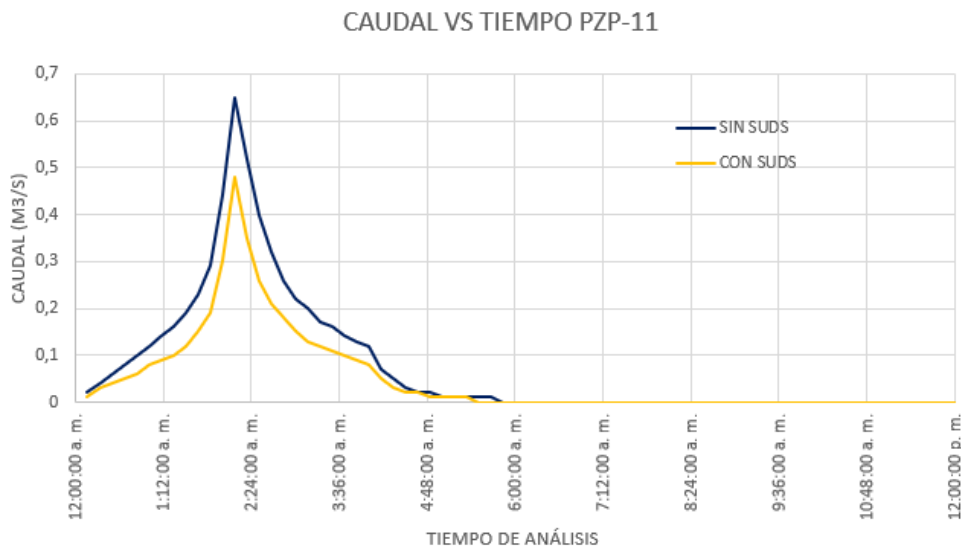


*Ilustración 23 Perfil de agua de PZP-23 a O-4. Fuente: Propia*

## 14. RESULTADOS

### 14.1. ZONAS DE BIORETENCIÓN

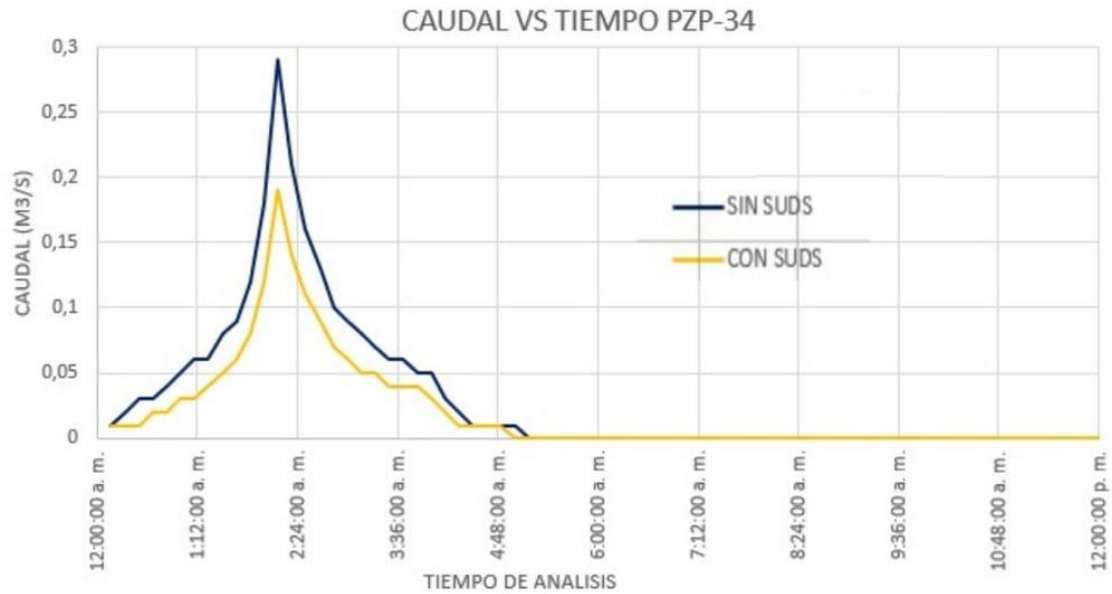
La zona de bio-retención, ubicadas en el parque principal como se estableció en el punto 10.4, muestra un cambio significativo en la descarga del caudal que recibe esta área, en la Gráfica 4 se observa la comparación de los dos caudales picos, en el sistema de alcantarillado convencional de  $0,65 \frac{m^3}{s}$  y con la implementación de las zonas de bioretención nos arroja un caudal pico de  $0,48 \frac{m^3}{s}$ . También se evidencia que el sistema se desocupa alrededor de las 6 horas de iniciado el estudio.



*Gráfica 4 Comparación sistemas de drenaje zonas de Bio retención. Fuente: Propia*

#### 14.2. ZANJAS DE INFILTRACIÓN

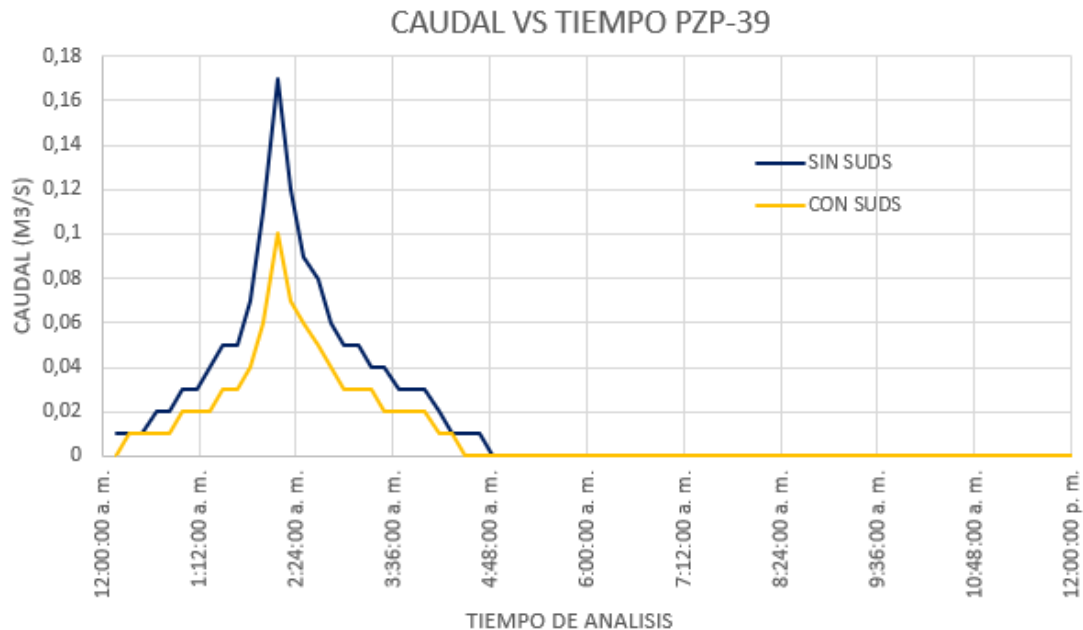
En el pozo PZP-34 se propone las zanjas filtrantes; en la Gráfica 5 se puede observar el caudal pico que se presenta en los dos escenarios el actual y la propuesta de los SUDS, el primero arroja un caudal pico de  $0,29 \frac{m^3}{s}$  y el segundo  $0,14 \frac{m^3}{s}$  teniendo una reducción en el caudal aproximada de 51,7%.



Gráfica 5 Comparación sistemas de drenaje zanjas de infiltración. Fuente: Propia

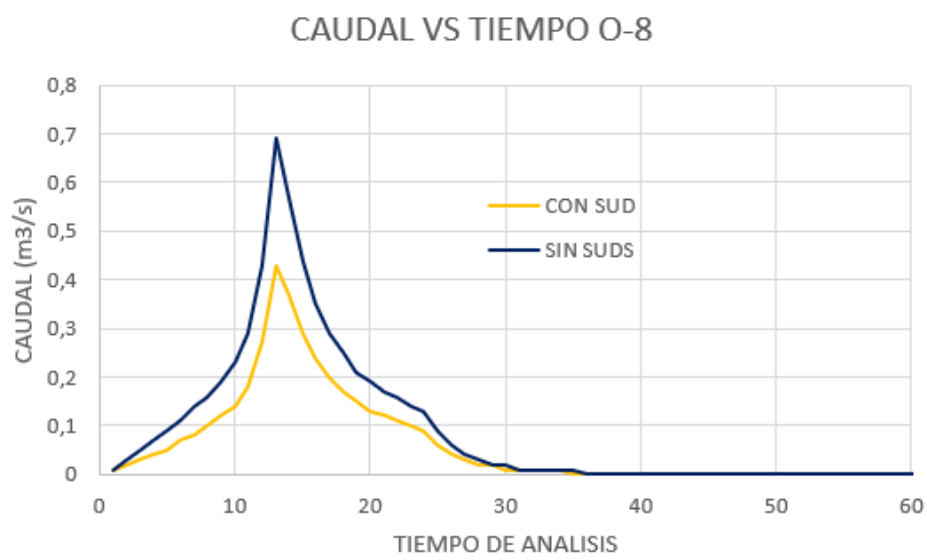
#### 14.3. PAVIMENTO PERMEABLE

En la Gráfica 6 se observa el comportamiento que tiene el pozo PZP-39 en la actualidad y con los SUDS. Se observa que existe un pico de caudal a las 2:20 horas de iniciada la tormenta, y en el caso de la condición actual del sistema tiene un caudal de  $0,17 \frac{m^3}{s}$  y con la implementación de los SUSDS el caudal de este pozo es de  $0,07 \frac{m^3}{s}$ ; al comparar estos dos resultados se ve una disminución aproximada del 42%.



Gráfica 6 Comparación sistemas de drenaje pavimento permeable. Fuente: Propia

El pozo O-8 es el punto de drenaje de todo el sistema de alcantarillado del municipio, es por tanto importante conocer el comportamiento de este pozo, debido a que al llegar toda el agua recolectada por el sistema se puede evidenciar de manera significativa si la implementación de los sistemas de drenaje sostenibles cumple con los requerimientos de la zona. Se evidencia una disminución en el caudal pico de 37,8%



Gráfica 7 Comparación pozo de salida. Fuente: Propia

## 15. CONCLUSIONES

- Se da cumplimiento al proponer los sistemas de drenaje sostenible para el municipio de Paratebueno, en donde se busca mejorar la calidad del agua que se produce debido a las precipitaciones presentadas en la zona; todo esto con la información brindada por el IDEAM y EPC. Con esta información se realizó un procesamiento de datos de las tres estaciones trabajadas para así simplificar los datos a tratar, y generar por el método del simplificado del INVIAS las curvas IDF, estas con el fin de determinar los caudales de diseño a 3, 5, 10, 25 y 100 años.
- En la pre-selección de los SUDS se tuvieron en cuenta factores tales como, capacidad de mejoramiento de agua, amenidad, paisajismo, costos de mantenimiento, entre otros, para hacer una elección acertada de cuál de los SUDS daría mayor beneficio a la comunidad de Paratebueno, se seleccionaron 3 tipologías, las cuales predominan en su funcionabilidad, el mejoramiento de la calidad de agua. Cada uno de estos sistemas de drenaje, cuenta con unas restricciones de la zona donde van a ser implementadas, para garantizar el desempeño de estos, se seleccionó bajo las recomendaciones de The SUDS Manual los lugares donde darán mejor eficiencia los SUDS. Teniendo en cuenta el funcionamiento y la estructura de estos sistemas, se realizó el diseño hidráulico y estructural según los parámetros demandados por las zonas seleccionas y según lo estipulado en la NS- 166 Criterios Para Diseño Y Construcción De Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible.
- Se realizó la comparación de los sistemas de drenaje, el sistema actual que cuenta con alrededor de 72 pozos, tubería en PVC que varía entre 12 y 14 pulgadas a lo largo de la cabecera municipal, y los sistemas urbanos de drenaje sostenible entre los que fueron seleccionados siguiendo las recomendaciones de manual de diseño de la Universidad de los Andes, Zonas de

bio-retención, Zanjas filtrantes y Pavimentos permeables. Se realizó una modelación usando el software SWMM para el análisis y diseño de estos sistemas de drenaje, donde se observa, que al implementar los SUDS, ocurre una disminución en el caudal pico en un promedio del 45% en comparación con la situación actual de la zona.

- Para evaluar el mejoramiento de la calidad de agua se tienen en cuenta parámetros predeterminados en *The SUDS Manual (2015 p.p. 593-594)*, donde asignan un índice de contaminación (P.I.) según el uso del suelo y un índice de mitigación de contaminantes (P.M.I) dependiendo el SUDS. También se considera los contaminantes predominantes en Paratebueno, que son los hidrocarburos y la materia orgánica, puesto que en las calles se encuentran residuos de aceites y combustible producidos por los talleres mecánicos y fábricas, y también se encuentran residuos orgánicos producidos por la ganadería. (EPC, 2017). En ese orden de ideas, en la Tabla 28 se observan los índices correspondientes a cada zona y en la Tabla 29 para cada SUDS.

| Zona \ P.I. | Contaminantes Orgánicos | Contaminantes Hidrocarburos |
|-------------|-------------------------|-----------------------------|
| Residencial | 0,6                     | 0,1                         |
| Vías        | 0,6                     | 0,3                         |
| Parques     | 0,2                     | 0,05                        |

Tabla 28 Índice de Contaminación. Fuente: Adaptada de *The SUDS Manual*, 2015

| SUDS \ P.M.I.          | Contaminantes Orgánicos | Contaminantes Hidrocarburos |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Pavimentos Permeables  | 0,9                     | 0,9                         |
| Zanjas de Infiltración | 0,4                     | 0,6                         |
| Zona de bio-retención  | 0,5                     | 0,6                         |

Tabla 29 Índice de mitigación de polución. Fuente: *The SUDS Manual*, 2015

Así, teniendo estos valores, se calcula el Índice de Mitigación de cada SUDS y se determina si el riesgo de contaminación es bajo, medio o alto.

$$P.M.I. \text{ Pavimento Permeable} = 0,9 + 0,5 * 0,9$$

$$P.M.I. \text{ Pavimento Permeable} = 1,35$$

$$P.M.I. Zanja de Infiltración = 0,4 + 0,5 * 0,6$$

$$P.M.I. Zanja de Infiltración = 0,7$$

$$P.M.I. Zona de Bio – Retención = 0,5 + 0,5 * 0,6$$

$$P.M.I. Zona de Bio – Retención = 0,8$$

Con estos valores de Índice de Mitigación de contaminantes, se tiene en cuenta los rangos del riesgo de contaminación proporcionados por *The SUDS Manual* (2015 p. 572), donde el Pavimento Permeable tiene riesgo de contaminación medio, mientras que las zanjas de infiltración y Zona de bio-retención son de riesgo bajo. En cuanto a las zonas, los Índices de Contaminación para la parte residencial es de muy bajo riesgo y las carreteras son de bajo riesgo de contaminación. (The SUDS Manual, 2015 p. 568)

- Una de las finalidades del proyecto es optimizar el control de escorrentía, lo cual mejoró notablemente con la instalación de los SUDS, sin embargo, la finalidad principal, es mejorar la calidad de agua, puesto que los sistemas de drenaje cuentan con filtros que beneficiarían este propósito, aunque los SUDS más allá de aportar al sistema de drenaje convencional. son estructuras que contribuyen al embellecimiento de las áreas públicas, la creación de zonas de biodiversidad, entre otras, se debe contar con un tren de tratamiento lo bastante amplio para que su impacto sea altamente notable o apoyar este fin con una planta de tratamiento y así garantizar, que las aguas lluvias regresen al afluente sin mayores afectaciones a este.

## 16. REFERENCIAS

- 1) Alcaldía Mayor de Bogotá. Decreto 350 de 2020, D.C. (2020). Alcaldiabogota.gov.co. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=104168&dt=S>
- 2) Ballard, B., Wilson, S., Clarke, H., Illman, S., Scott, T., & Kellagher, R. (2015). The SUDS Manual (Primera Edición). CIRIA.
- 3) Caicedo A. (2020). Modelación De Dos Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible Para La Ciudad De Cali Estudio De Caso: Ciudadela Calida.
- 4) Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2017) Guía Técnica de Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Universidad de Los Andes. [https://issuu.com/sda2015/docs/gu\\_a\\_t\\_cnica\\_de\\_dise\\_o\\_y\\_construcci](https://issuu.com/sda2015/docs/gu_a_t_cnica_de_dise_o_y_construcci)
- 5) Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2009) NS-085 Criterios De Diseño De Sistemas De Alcantarillado.
- 6) Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2018) NS-166 Criterios Para Diseño Y Construcción De Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS)
- 7) Empresas de Servicios Públicos de Cundinamarca. (EPC). (2018). Proyecto Viabilizado Construcción Para La Optimización Del Sistema De Alcantarillado Del Municipio De Paratebueno Cundinamarca.
- 8) Green Blue Urban (2021). La Historia del Drenaje Urbano. <https://greenblue.com/es/la-historia-del-drenaje-urbano-y-la-necesidad-de-cambio/>
- 9) IDEAM- UNAL (2018), La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>

- 10) Municipio De Paratebueno. (2015). Mapa de Paratebueno.  
<https://mapas.cundinamarca.gov.co/documents/municipio-de-paratebueno/explore>
- 11) Rey D. (2020) Boletín Instituto de Estudios Ambientales D-IDEA-Sede Manizales. (n.d.).  
[https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines\\_ambientales/boletin164.pdf](https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin164.pdf)
- 12) Rodríguez J., Celemín P., Espitia P., Torres N. (2017) Evaluación del tren de SUDS en el Parque Metropolitano San Cristóbal Sur.  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/flexpaper/handle/1992/60900/12997.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=1>
- 13) Secretaría de Ambiente. Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS). (2020).  
<https://www.idiger.gov.co/documents/20182/855477/SUDS++2020.pdf/3f4ead30-f06c-4850-a48a-69abc5dd397b>

## **17. ANEXOS**