



Alternativas de uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para edificaciones urbanas en una cuenca de la ciudad de Manizales

Alternatives for the use of Sustainable Urban Drainage Systems for urban buildings in a basin of the city of Manizales

Freddy Anderson Chacón Rosales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

Febrero 2023

Alternativas de uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para edificaciones urbanas en una cuenca de la ciudad de Manizales

Freddy Anderson Chacón Rosales

Directora:

M.Sc. Joan Nathalie Suárez Hincapié

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Línea de investigación

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

Febrero 2023

Dedicatoria

“A Dios que me permitió realizar esta investigación, a mi madre María Ibely Rosales Ledesma que siempre está para mí incondicionalmente, a mi hermana Lina Paola Marín Rosales que me entiende y ayuda permanentemente, a mi familia y amigos que siempre me dan ánimos para seguir adelante y saben entender mi ausencia, a la ingeniera Joan Nathalie Suárez Hincapié, mi directora que me ha brindado su ayuda, conocimiento, amistad y creyó en mi para emprender esta investigación, a todos los profesionales que ayudaron de una u otra manera para solucionar los inconvenientes presentados y a todas las entidades públicas y privadas que brindaron su colaboración para que el proyecto acabará en feliz término. A todos ustedes va dedicada esta investigación y ojalá en el futuro, nuestras ciudades logren tener drenajes sostenibles que permitan el desarrollo económico y la convivencia armónica entre las comunidades y el ambiente.

Agradecimientos

La investigación no habría sido posible sin la ayuda de muchas personas que han colaborado con este proyecto para que llegue a su culminación, a los cuales espero no olvidar y estaré agradecido siempre. Agradezco a dos mujeres pilares de mi vida; mi mamá que es la persona más influyente de mi vida me enseñó muchas cosas, sobre todo a no desistir y siempre seguir adelante con humildad, coraje y mucho amor y a mi hermana que me ayudó siempre con amor y cariño, a la cual trato de darle una guía y un gran ejemplo.

A mi directora agradezco porque siempre confió en mis capacidades, me guió con su conocimiento y dedicación para terminar la investigación de manera adecuada y cumplir con la meta. A Sofía Paz, una mujer excepcional, que me brindó su apoyo y ayuda en cada momento, me enseñó lo importante de seguir tus sueños e ir hacia adelante así sea confuso, por creer y confiar en mí.

A todos los profesionales gracias por su valiosa contribución, fueron voz de guía y ánimo que aportaron consejos claves para desarrollar la investigación, en especial los ingenieros Angélica Betancourth Arias, Yully Alexandra Castrillón Ocampo y Sergio Andrés Gutiérrez Zarate que aguantaron mi insistencia y aceptaron diferentes reuniones para discutir aspectos técnicos y conceptuales que me ayudaron a solucionar inconvenientes del proyecto para lograr cumplir con los objetivos, y demás expertos que participaron en el juicio de valoración como María Valentina Solórzano Gómez, Fernando Mejía Fernández, José Antonio Caballero que siendo de otro país como Argentina no dudo en brindar una mano y a Federico Pinzón que siempre que he necesitado de su ayuda ha estado para colaborar, dar ánimos e impulsarme a continuar, sus aportes fueron fundamentales.

Agradezco a las entidades Aguas de Manizales S.A. E.S.P., y a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales en especial a los ingenieros Cristian Camilo Quintero Ramírez y Mateo Álzate Jaramillo por su empatía, colaboración y suministro de información sustancial para la investigación, a la asistente de maestrías y doctorado en Ing. Civil Luisa Valentina Díaz por estar siempre pendiente de nosotros como estudiantes, entendernos y guiarnos con los procesos y trámites académicos.

A todo el grupo profesional y humano de Manizales + Innovadora, muchas gracias por brindar oportunidades relevantes a los estudiantes de posgrado de diferentes universidades públicas y privadas y permitirme participar en la convocatoria de la Beca, ser afortunado de ganarla y vivir esta bonita experiencia.

A todos mis compañeros de trabajo, colegas y amigos en especial a Manuel Alejandro Vergara Moreno, Andrés Dosman Pena y Alejandro Ordoñez Renza que me soportaron todo este tiempo, tuvieron tolerancia en los momentos de crisis, aportaron ideas a este trabajo investigativo y fueron una voz de ánimo y aliento en este caminar, muchas gracias.

Por último, a todas las personas que confiaron y aportaron a este proyecto académico de una u otra manera, les agradezco infinito, mis más sinceros agradecimientos.

Contenido

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tablas	12
Resumen.....	16
Abstract.....	17
1 Introducción	18
2 Planteamiento del problema.....	22
3 Justificación	26
4 Objetivos.....	29
4.1 Objetivo general	29
4.2 Objetivos específicos.....	29
5 Antecedentes.....	30
6 Marco de referencia	34
6.1 Hidrología Urbana	34
6.2 Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).....	37
6.3 Descripción del modelo SWMM.....	62
6.4 Marco jurídico	63
7 Metodología.....	65
7.1 Tipo de investigación.....	65
7.2 Técnicas de investigación.....	66
7.3 Flujograma metodológico.....	67
7.4 Área de estudio	68

7.5	Construcción del modelo hidrodinámico.....	69
7.6	Evaluación de alternativas SUDS.....	76
7.7	Implementación de alternativas SUDS.....	81
8	Análisis de resultados	83
8.1	Diagnostico preliminar cuenca de estudio.....	83
8.2	Modelación hidrodinámica SWMM.....	84
8.3	Datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño	90
8.4	Calibración y validación.....	98
8.5	Análisis hidráulico.....	105
8.6	Priorización de criterios.....	167
8.7	Alternativas “SUDS” seleccionadas.....	171
9	Productos.....	186
10	Conclusiones	187
11	Recomendaciones.....	192
12	Bibliografía.....	195
13	Anexos.....	207
13.1	Flujogramas metodológicos	207
13.2	Alternativas de selección SUDS	213
13.3	Dimensionamiento de las alternativas SUDS	219
13.4	Artículo presentado en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México 2021	241

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Afectación de la infiltración y escorrentía a causa de la impermeabilización del suelo</i>	23
Figura 2 <i>Inundaciones en Manizales, paradero de buses en Villa pilar (Izquierda) y Avenida Kevin Ángel a la altura del barrio La Asunción (Derecha)</i>	24
Figura 3 <i>Causas y efectos del funcionamiento inadecuado de los sistemas de drenaje</i> ...	25
Figura 4 <i>Eventos de inundación ocurridos en Manizales (anuales)</i>	26
Figura 5 <i>Impactos del desarrollo urbano en una cuenca natural</i>	39
Figura 6 <i>Ejemplos de sistemas urbanos de drenaje sostenible para desarrollos urbanos</i>	40
Figura 7 <i>Ejemplo de superficie permeable con infiltración total</i>	46
Figura 8 <i>Estructuras básicas de los techos verdes</i>	49
Figura 9 <i>Pozos y zanjas de infiltración</i>	51
Figura 10 <i>Depósito de infiltración</i>	52
Figura 11 <i>Drenes filtrantes</i>	53
Figura 12 <i>Franjas filtrantes</i>	55
Figura 13 <i>Zonas de bioretención</i>	56
Figura 14 <i>Alcorques inundables</i>	57
Figura 15 <i>Flujograma metodológico</i>	67
Figura 16 <i>Zona noroeste de la cuenca Olivares (zona de estudio)</i>	68
Figura 17 <i>Cuenca urbana de estudio</i>	69
Figura 18 <i>Estaciones cercanas a la cuenca de estudio</i>	72
Figura 19 <i>Modelo de jerarquía</i>	77
Figura 20 <i>Matriz par de comparación de criterios</i>	78

Figura 21 <i>Priorización general de alternativas</i>	81
Figura 22 <i>Áreas aferentes de la zona de estudio</i>	85
Figura 23 <i>Alcantarillado existente</i>	87
Figura 24 <i>Porcentaje de tubería respecto a su diámetro expresado en pulgadas</i>	88
Figura 25 <i>Porcentaje de tubería en concreto respecto a su diámetro</i>	89
Figura 26 <i>Porcentaje de tubería PVC respecto a su diámetro</i>	89
Figura 27 <i>Isoyetas para la cuenca experimental meses de abril (2017-2021) y julio (2015-2021)</i>	94
Figura 28 <i>Traslado de sensor de medición de caudal</i>	95
Figura 29 <i>Hietogramas e hidrogramas de los eventos de calibración y validación</i>	97
Figura 30 <i>Modelación hidrodinámica en SWMM</i>	99
Figura 31 <i>Hidrograma observado vs simulado para la calibración y validación</i>	102
Figura 32 <i>Hietogramas de diseño</i>	104
Figura 33 <i>Hidrograma de salida - cámara 04001D</i>	106
Figura 34 <i>Nodos con inundación en la cuenca de estudio minuto 20</i>	108
Figura 35 <i>Capacidad de los conductos en la cuenca de estudio minuto 20</i>	111
Figura 36 <i>Velocidad máxima en los conductos de la cuenca de estudio minuto 20</i>	114
Figura 37 <i>Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector alto</i>	117
Figura 38 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 1</i>	119
Figura 39 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 2</i>	121
Figura 40 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 3</i>	124
Figura 41 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 4</i>	127
Figura 42 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 5</i>	130

Figura 43 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 6</i>	132
Figura 44 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 7</i>	135
Figura 45 <i>Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector medio ...</i>	137
Figura 46 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 8</i>	139
Figura 47 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 9</i>	142
Figura 48 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 10</i>	145
Figura 49 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 11</i>	147
Figura 50 <i>Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector bajo</i>	150
Figura 51 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 12</i>	152
Figura 52 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 13</i>	155
Figura 53 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 14</i>	158
Figura 54 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 15</i>	160
Figura 55 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 16</i>	163
Figura 56 <i>Perfiles de alcantarillado tramo 17</i>	165
Figura 57 <i>Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 100 años</i>	172
Figura 58 <i>Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 100 años</i>	174
Figura 59 <i>Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 50 años</i>	175
Figura 60 <i>Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 50 años</i>	176
Figura 61 <i>Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 25 años</i>	177
Figura 62 <i>Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 25 años</i>	178

Figura 63 <i>Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 10 años</i>	179
Figura 64 <i>Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 10 años</i>	181
Figura 65 <i>Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 5 años</i>	182
Figura 66 <i>Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 5 años</i>	183
Figura 67 <i>Flujograma metodológico discretización</i>	207
Figura 68 <i>Flujograma metodológico sistema de drenaje pluvial</i>	208
Figura 69 <i>Flujograma metodológico datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño</i>	209
Figura 70 <i>Flujograma metodológico calibración y validación</i>	212
Figura 71 <i>Flujograma metodológico implementación de SUDS</i>	219
Figura 72 <i>Diagrama esquemático de una estructura de un alcorque inundable</i>	224
Figura 73 <i>Diagrama esquemático de una estructura de pavimento permeable sin infiltración</i>	228
Figura 74 <i>Esquema general de tanque de detención superficial y enterrado</i>	232
Figura 75 <i>Diagrama conceptual de estructuras LID</i>	238

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Clasificación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible de acuerdo con el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción “GITECO”</i>	43
Tabla 2 <i>Sistemas principales de gestión de superficie de pavimentos permeables</i>	47
Tabla 3 <i>Ejemplos de pavimentos permeables</i>	48
Tabla 4 <i>Clasificación general de los techos verdes</i>	50
Tabla 5 <i>Cunetas verdes</i>	54
Tabla 6 <i>Clasificación de los tanques de almacenamiento de acuerdo con su ubicación</i> .	58
Tabla 7 <i>Ventajas y desventajas de la implementación de SUDS</i>	59
Tabla 8 <i>Legislación nacional para la implementación de SUDS</i>	64
Tabla 9 <i>Estaciones de interés para el área de estudio</i>	71
Tabla 10 <i>Valores referenciales del criterio de Nash - Sutcliffe</i>	75
Tabla 11 <i>Escala de comparación de Saaty</i>	78
Tabla 12 <i>Índice de aleatoriedad</i>	80
Tabla 13 <i>Registro de inundaciones en la cuenca experimental urbana por barrio</i>	83
Tabla 14 <i>Coeficientes de Manning para áreas permeables e impermeables</i>	86
Tabla 15 <i>Almacenamiento en depresión para áreas permeables e impermeables</i>	86
Tabla 16 <i>Características de material y longitud del alcantarillado</i>	88
Tabla 17 <i>Rangos de profundidad de las cámaras de inspección</i>	90
Tabla 18 <i>Registro de datos faltantes</i>	91
Tabla 19 <i>Clasificación de eventos como ligeros, moderados y fuertes</i>	95
Tabla 20 <i>Eventos para la calibración y validación</i>	96
Tabla 21 <i>Valores iniciales del modelo</i>	100

Tabla 22 <i>Resumen rango de variación de los parámetros de simulación</i>	101
Tabla 23 <i>Parámetros de simulación con mejor ajuste</i>	101
Tabla 24 <i>Índice de Nash-Sutcliffe</i>	102
Tabla 25 <i>Cantidad y porcentajes de cámaras inundadas</i>	106
Tabla 26 <i>Porcentaje de cámaras inundadas para diferentes intervalos de caudal</i>	107
Tabla 27 <i>Cantidad de conductos con capacidad mayor al 93% para diferentes periodos de retorno</i>	111
Tabla 28 <i>Porcentaje de conductos con velocidad mayor a 5 m/s</i>	114
Tabla 29 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 1</i>	118
Tabla 30 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 2</i>	121
Tabla 31 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 3</i>	124
Tabla 32 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 4</i>	126
Tabla 33 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 5</i>	129
Tabla 34 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 6</i>	132
Tabla 35 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 7</i>	135
Tabla 36 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 8</i>	139
Tabla 37 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 9</i>	142
Tabla 38 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 10</i>	144
Tabla 39 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 11</i>	147
Tabla 40 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 12</i>	152
Tabla 41 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 13</i>	154
Tabla 42 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 14</i>	157
Tabla 43 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 15</i>	160

Tabla 44 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 16</i>	162
Tabla 45 <i>Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 17</i>	165
Tabla 46 <i>Vector prioridad de criterios primarios</i>	168
Tabla 47 <i>Vector prioridad para cada grupo de criterios: criterios socio/ambientales (a), criterios técnicos (b) y criterios económicos (c)</i>	168
Tabla 48 <i>Priorización de alternativas</i>	170
Tabla 49 <i>Características principales de los SUDS simulados</i>	171
Tabla 50 <i>Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 100 años</i>	173
Tabla 51 <i>Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 50 años</i>	175
Tabla 52 <i>Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 25 años</i>	177
Tabla 53 <i>Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 10 años</i>	180
Tabla 54 <i>Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 5 años</i>	182
Tabla 55 <i>Tiempos de concentración cuenca de estudio</i>	210
Tabla 56 <i>Parámetros para estimación del tiempo de concentración</i>	211
Tabla 57 <i>Alternativas SUDS propuestas y evaluadas</i>	213
Tabla 58 <i>Descripción de criterios primarios y específicos de selección</i>	213
Tabla 59 <i>Priorización de criterios realizada por los expertos</i>	215
Tabla 60 <i>Priorización de criterios sociales y ambientales</i>	216

Tabla 61 <i>Priorización de criterios económicos</i>	216
Tabla 62 <i>Priorización de criterios técnicos</i>	217
Tabla 63 <i>Indices de consistencia de los diferentes criterios de priorización por cada experto</i>	217
Tabla 64 <i>Priorización general de alternativas SUDS</i>	218
Tabla 65 <i>Área y coeficiente de escorrentía del tramo 1</i>	221
Tabla 66 <i>Parámetros de diseño de alcorques inundables</i>	223
Tabla 67 <i>Predimensionamiento del alcorque permeable tipo</i>	227
Tabla 68 <i>Parámetros de diseño de pavimentos permeables</i>	228
Tabla 69 <i>Predimensionamiento del pavimentos permeables tipo</i>	231
Tabla 70 <i>Parámetros de diseño del tanque de detención (almacenamiento/regulación)</i>	235
Tabla 71 <i>Estimación del volumen del tanque de detención por varios métodos</i>	235
Tabla 72 <i>Recomendaciones para el uso de los métodos de estimación del volumen de detención preliminar</i>	236
Tabla 73 <i>Cantidad de SUDS ingresados al modelo de SWMM</i>	237
Tabla 74 <i>Combinación de SUDS ingresados al modelo de SWMM</i>	237
Tabla 75 <i>Parámetros ingresados al modelo SWMM para cada tipología SUDS</i>	239

Resumen

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son un conjunto de técnicas de gestión de agua pluvial que tienen como objetivo mantener o establecer las condiciones hidrológicas naturales de las zonas de estudio desde una perspectiva diferente a la convencional combinando aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales minimizando costos y mejorando el paisaje urbano. Esta investigación abordó la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS desde la necesidad de dar manejo al aumento de la escorrentía pluvial derivadas de las edificaciones urbanas en un sector de la ciudad de Manizales, a fin de plantear preliminarmente 3 alternativas diferentes que permitieran regular o disminuir dicha escorrentía pluvial y con ello mejorar las condiciones de funcionamiento del sistema de alcantarillado municipal, cumpliendo la normatividad vigente.

Para ello se realizó una revisión de información y la construcción de un modelo hidráulico que permitió conocer las condiciones existentes de la zona en estudio (impermeabilización) y su alcantarillado. Finalmente, de acuerdo con las condiciones obtenidas se determinó que las 3 alternativas de SUDS que permitieron regular o disminuir el agua de escorrentía superficial que entraba a la red de alcantarillado fueron los alcorques inundables, pavimentos permeables y tanques de detención; reduciendo para el tramo 1 de la cuenca de estudio los porcentajes de caudales pico para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años en el orden de 9, 13, 25, 68 y 88% respectivamente.

Palabras claves: *SUDS, drenaje, alcantarillado, escorrentía, impermeabilización y modelo hidráulico.*

Abstract

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) are a set of stormwater management techniques that aim to maintain or establish the natural hydrological conditions of the study areas from a different perspective than the conventional one, combining hydrological, environmental, and social aspects, minimizing costs and improving the urban landscape. This research approached the implementation of Sustainable Urban Drainage Systems SUDS from the need to manage the increase in stormwater runoff derived from urban buildings in a sector of the city of Manizales, in order to preliminarily propose 3 different alternatives that would allow regulating or reducing stormwater runoff and thus improve the operating conditions of the municipal sewage system, complying with current regulations.

For this purpose, a review of information and the construction of a hydraulic model were carried out to determine the existing conditions of the area under study (waterproofing) and its sewage system. Finally, according to the conditions obtained, it was determined that the 3 SUDS alternatives that made it possible to regulate or reduce the surface runoff water entering the sewerage network were floodable culverts, permeable pavements and detention tanks; reducing for section 1 of the study watershed the percentages of peak flows for the return periods of 100, 50, 25, 10 and 5 years in the order of 9, 13, 25, 68 and 88%, respectively.

Key words: SUDS, drainage, sewerage, runoff, waterproofing and hydraulic model.

1 Introducción

Tradicionalmente el manejo de la escorrentía se basa en que esta debe ser evacuada tan rápido como se genere, con el fin de evitar la problemática de inundaciones que se torna en relación con el empozamiento de grandes volúmenes de agua pluvial en zonas con poblaciones muy densas (J. A. Martínez, 2017). En este sentido, a través del tiempo las ciudades han implementado complejas redes de alcantarillado (tanto de tipo combinado como separado) para concentrar, transportar y evacuar el agua lluvia (Barbosa et al., 2012), sin embargo, estos sistemas se ven forzados a trabajar a capacidad máxima y en ciertas ocasiones a sobrecargarse y colapsar (J. A. Martínez, 2017), debido a que el crecimiento de las ciudades no se detiene y la impermeabilización del suelo natural tampoco.

Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, los alcantarillados pluviales de las zonas urbanas tienden a la reposición y ampliación constante de tubería con diámetros cada vez mayores, pero esto se ha convertido en una alternativa compleja, costosa e inefectiva para las ciudades fuertemente desarrolladas (Barbosa et al., 2012), ya que la instalación de las redes de drenaje pluvial implica generalmente la intervención de la malla vial, espacio público y/o privado construido y en algunos casos la necesidad de gestionar permisos ante entes públicos causando incrementos económicos y demoras administrativas trayendo consigo efectos negativos para la ciudad y sus pobladores. Adicional, estas medidas convencionales no buscan solucionar la problemática de raíz de los sistemas de drenaje actuales, sino retardar las consecuencias durante un tiempo limitado. Así, en los últimos años se ha incursionado en medidas alternas para el drenaje urbano como son los SUDS y a largo plazo se espera que resulten más costo-efectivas que las medidas tradicionales (Zhou, 2014).

Los SUDS se pueden definir como unas alternativas innovadoras para el manejo integral del drenaje urbano y así replicar en cierto grado las condiciones hidrológicas anteriores al proceso de urbanización (Fletcher et al., 2015), siendo suplementaria al sistema convencional. También, permiten regular o disminuir el agua de escorrentía superficial que entra a la red de alcantarillado, proveniente de edificaciones urbanas, vías, zonas de equipamientos y otros; además, ayuda a reducir el riesgo de que se presente una sobrecarga en el sistema colector, a minorar las concentraciones de contaminantes en la escorrentía protegiendo la calidad de agua del cuerpo receptor, a reducir caudales pico y velocidades de escorrentía, a disminuir la carga contaminante del agua, a promover la infiltración del agua pluvial y recarga de acuíferos, entre otras (Ahiablame et al., 2012; CIRIA C753, 2015).

Los SUDS son una herramienta relevante para gestionar la escorrentía superficial sosteniblemente, debido a que los procesos de desarrollo humano que involucran factores como la urbanización, el aumento de la población y la demanda de agua han afectado los regímenes hidrológicos naturales, cambiando los usos del suelo por medio de la impermeabilización, aumentando los caudales de escorrentía, las frecuencias de inundaciones y sobrecargando las redes de alcantarillado (Li et al., 2019).

En los últimos años en países desarrollados se ha aumentado la tendencia a implementar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS en los sistemas de drenaje municipales, ya que resultan una alternativa de solución sustancial para el manejo de la escorrentía superficial, los picos de caudales producidos durante los eventos intensos de la precipitación y mejorar la calidad del agua almacenada, lo que ayuda a un desarrollo sostenible (Trapote & Fernández, 2016). Por tal motivo, regiones de Estados Unidos, Australia, Reino Unido y Europa presentan una trayectoria importante en la investigación e implementación de estos sistemas de drenaje

urbano y han permitido la planificación y ejecución de estos en áreas urbanas (Chocat et al., 2007). Por ejemplo, en estados de Virginia y Carolina del Norte han implementado los SUDS para la regulación de los caudales picos y para la remoción de contaminantes y nutrientes; y en el Reino Unido los han empleado para la regulación hídrica (Molina et al., 2011). Por el contrario, en los países en vía de desarrollo la implementación de SUDS se encuentra en una fase primaria, recientemente estos sistemas de drenaje urbano empezaron a cobrar interés dentro de algunos sectores e instituciones de planificación y ordenamiento municipal (Chocat et al., 2007).

Así pues, desde la planificación urbana la construcción de metodologías propias de selección e implementación de SUDS abarcan un primer paso para comprender en la práctica la resiliencia de estas nuevas alternativas de drenaje urbano a los sistemas convencionales, así como los planes y programas de desarrollo particulares de cada ciudad (Sara Perales-Momparler et al., 2015). No obstante, la literatura internacional encontrada en guías y metodologías no deben ser entendidas como una reglamentación estricta sino desde una óptica ilustrativa, dado que cada ciudad en relación con los SUDS es única y presenta sus propias características y limitaciones (Mentens et al., 2006).

En el caso particular de la ciudad de Manizales, Colombia, que cuenta para el año 2020 con una población de 446 mil habitantes y aspira a convertirse en una futura Área Metropolitana Centro Sur, que junto con los municipios que la integrarán su población se ampliaría en un 34%, lo que equivaldrá a 602 mil habitantes. De este modo el municipio deberá buscar a través de convenios y alianzas motivar el desarrollo y crecimiento físico urbano de la ciudad y el buen vivir de todos los ciudadanos, además, priorizando la construcción de viviendas de interés prioritario VIP y las viviendas de interés social VIS (Alcaldía de Manizales, 2020).

En este sentido, Manizales se encuentra en un desarrollo constante de crecimiento como ciudad, impactando directamente la población y su entorno, pero los lineamientos del Plan de Desarrollo de Manizales 2020 – 2023 se direccionan en un enfoque sostenible para las nuevas generaciones, convirtiendo a la futura Área Metropolitana en un caso interesante para el análisis de usos de alternativas de SUDS y su futura aplicación, ya que según proyecciones actuales de crecimiento se estima que hay un déficit habitacional de 16.509 viviendas (Alcaldía de Manizales, 2020). Lo anterior implica, que la ciudad se verá en la necesidad de densificarse y expandirse aún más en los próximos años, impermeabilizando cada vez más el suelo natural.

Un antecedente reciente de investigación en la ciudad de Manizales hace referencia a la modelación de dos SUDS en cuencas de alta montaña para evaluar la reducción de los caudales picos de escorrentía a través de modelación hidrodinámica en el modelo de gestión Storm Water Management Model SWMM. Las alternativas propuestas fueron techos verdes y depósitos de lluvia, donde se encontró que la aplicación de estos permite reducir en un 25% el caudal pico (Rey, 2019).

En consecuencia, para seguir la línea de investigación y complementar los estudios anteriores de los SUDS aplicables a Manizales, el presente documento investigativo abordó los SUDS desde la óptica de los aumentos de la escorrentía pluvial derivados de las edificaciones urbanas, con el fin de plantear 3 alternativas diferentes que permitan regular o disminuir la escorrentía pluvial antes de que se descargue al sistema de alcantarillado municipal, cumpliendo con toda la normatividad local vigente.

2 Planteamiento del problema

A nivel mundial el modelo de desarrollo humano ha causado que las personas empiecen a migrar desde las áreas rurales hacia las ciudades, buscando comodidad, oportunidades y mejores condiciones de vida. Se estima que el 55% de la población mundial vive en las ciudades y se espera que para el 2050 aumente hasta el 68% (Naciones Unidas, 2018), esto ha generado que las ciudades se extiendan y afecten las cuencas naturales, principalmente por el cambio en el uso del suelo, la deforestación y la pérdida de servicios ecosistémicos, además sumado a la impermeabilización del suelo que se genera por el aumento en la construcción de nuevas edificaciones (residenciales, comerciales, institucionales e industriales) y de vías de comunicación.

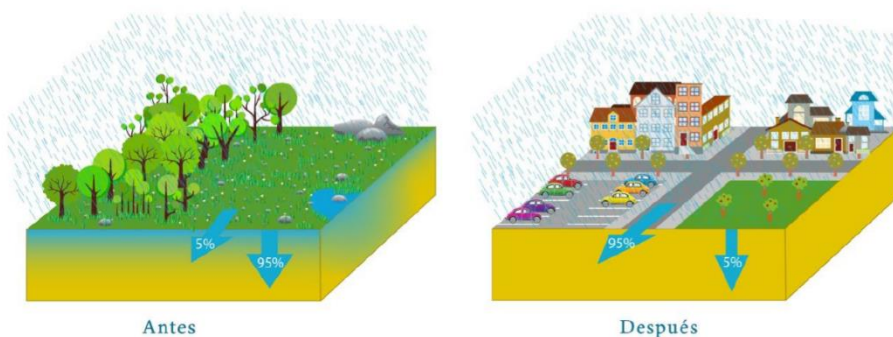
Por lo tanto, las cuencas naturales presentan una desnaturalización, ocasionando que el ciclo natural del agua se vea alterado porque se disminuye la infiltración en el suelo y se aumenta la escorrentía superficial gracias a que el agua corre rápidamente por las zonas apenas permeables de techados, escalones y pavimentos causando desastres de origen hídrico, debido a las pérdidas físicas, humanas y económicas que originan (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2018) (ver Figura 1).

De igual manera, se pierde riqueza paisajística, se impide la recarga de acuíferos que sirven de reserva de agua para el consumo humano, se genera el efecto isla de calor, haciendo que las temperaturas en temporadas secas se acrecienten en el interior de las poblaciones, y se contamine el agua lluvia al precipitarse, ya que purifica el aire recogiendo las partículas contaminadas y va acumulando una carga contaminante importante al escurrir por la ciudad, debido al arrastre de sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos (J. Rodríguez et al., 2008), lo que ocasionaría un perjuicio a medio o largo plazo de las zonas

receptoras de agua pluvial, asociadas a alteraciones de ecosistemas completos, afectaciones a los servicios de la comunidad como perturbación del tráfico, daños materiales, pérdidas de comodidad, entre otras.

Figura 1

Afectación de la infiltración y escorrentía a causa de la impermeabilización del suelo



Nota: Adaptado de HidrologíaSostenible, n.d.

Como consecuencia de lo anterior, se han buscado estrategias para dar solución a los problemas de funcionamiento de los sistemas de drenaje convencional y los esfuerzos se han centrado principalmente en la construcción de tanques de tormenta y aumento de los diámetros de las redes; No obstante, estas soluciones son muy válidas pero costosas, y solo aportan remedios parciales al problema global; al mismo tiempo, pensar que la implementación masiva de este tipo de sistemas podrá hacer frente al futuro crecimiento urbano y al aumento del volumen de aguas lluvias es un error (J. Rodríguez et al., 2008).

Como se ha mencionado anteriormente, la ciudad de Manizales se encuentra en constante crecimiento lo que ocasiona afectaciones directas en la impermeabilización de los suelos naturales debido a los requerimientos urbanísticos, ya que la mayoría de la población se encuentra en el área urbana, con un 93% del asentamiento (Secretaría de Planeación Municipal

de Manizales, 2017). En esta ciudad se han implementado los sistemas de drenaje convencional de tipo combinado para el manejo del agua lluvia, el sistema funciona a gravedad y cuenta con 516,73 km de alcantarillado combinado y 9 km de alcantarillado pluvial (Aguas de Manizales, 2019), además, de 240 box Culvert y 3 canales abiertos (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Las autoridades que planifican la ciudad de Manizales tienen proyectado continuar con su desarrollo urbano, lo cual es proporcional a la impermeabilización del suelo, cambiando las condiciones naturales de la cuenca y afectando el ciclo hidrológico; sin embargo, deberá proyectarse un manejo adecuado de las aguas pluviales provenientes de las edificaciones urbanas (vías, parques, parqueaderos, andenes, urbanizaciones, otros) para prevenir condiciones que actualmente se reflejan, como son el aumento del volumen de agua de escorrentía y las inundaciones (ver Figura 2) que generan entre otros, problemas de movilidad, disminución de la calidad de vida de la población por pérdidas humanas y económicas y afectan la inversión público-privada de diferentes organizaciones en la ciudad.

Figura 2

Inundaciones en Manizales, paradero de buses en Villa pilar (Izquierda) y Avenida Kevin Ángel a la altura del barrio La Asunción (Derecha)

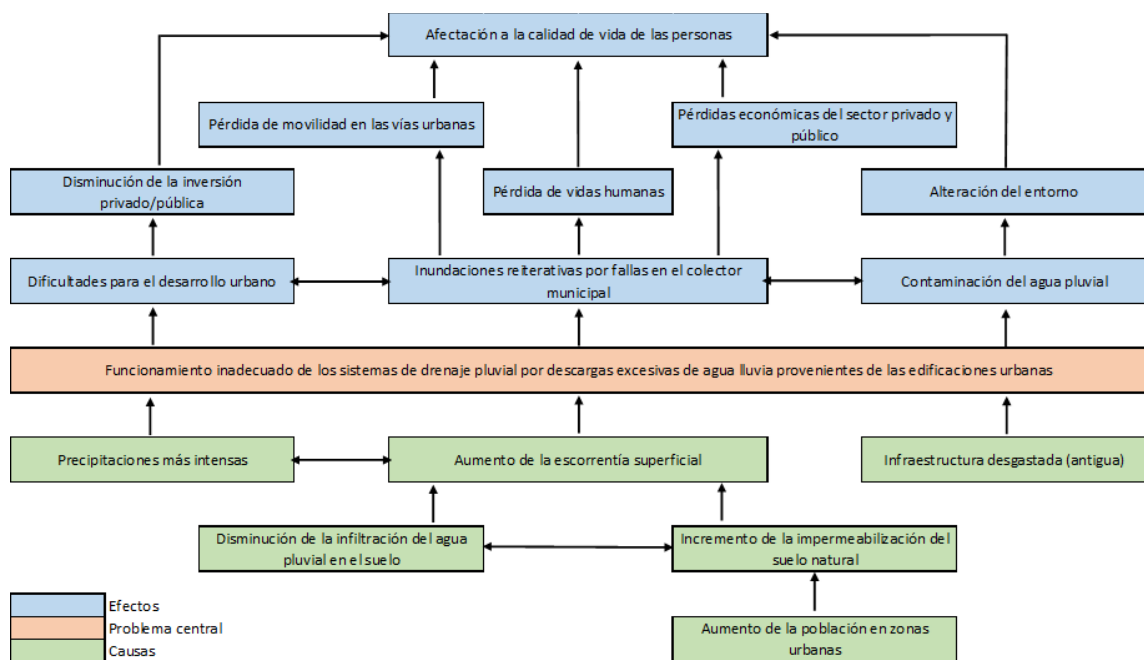


Nota: Adaptado de La Patria, 2017, 2018.

Para resumir los aspectos mencionados anteriormente, en la Figura 3 se presenta un árbol de problemas donde se visualizan las causas que permiten definir e identificar la naturaleza y contexto de la problemática de esta investigación.

Figura 3

Causas y efectos del funcionamiento inadecuado de los sistemas de drenaje



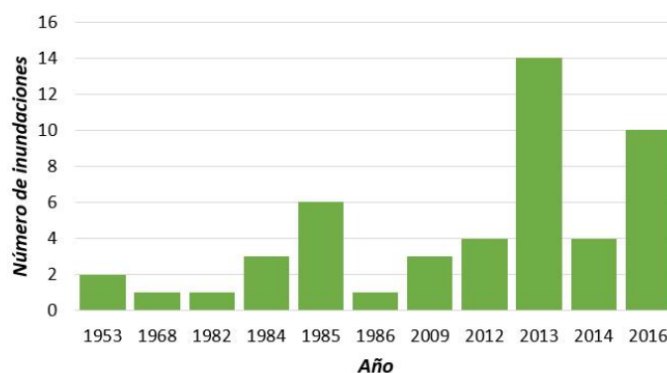
Aunado a lo anterior, que afecta directamente al ser humano y sus dinámicas de urbanización, si se sigue con el enfoque de impermeabilización masiva del suelo y sistemas de drenaje convencionales se puede alterar de manera irreversible funciones ecológicas y causar pérdida de los ecosistemas, además de afectar negativamente a entidades no humanas, en esa interacción sociedad-naturaleza y a su vez la sostenibilidad de las poblaciones. Por lo cual, la expansión urbana sin un planteamiento sostenible puede traer serias implicaciones para la planeación urbana en temas como la protección de áreas ambientales, inundaciones o islas de calor urbanas, por mencionar algunas.

3 Justificación

El uso de alternativas de SUDS para el manejo adecuado e integral del agua lluvia se propone en primera instancia debido a que la problemática del aumento de los volúmenes de escorrentía superficiales en las poblaciones son reales, latentes y se evidencia con el incremento de las frecuencias de inundaciones que se presentan en las ciudades, como Manizales, donde el drenaje pluvial del centro urbano ha exhibido inconvenientes en su funcionamiento, reflejado en los registros de inundaciones pluviales que han ocurrido en la ciudad a través del tiempo. Entre 1953 y 2016 se presentaron 48 eventos de inundación (ver Figura 4) (Rey, 2019).

Figura 4

Eventos de inundación ocurridos en Manizales (anuales)



Nota: Adaptado de Rey, 2019.

De acuerdo con Rey (2019) los barrios o zonas más afectados son: Avenida Kevin Ángel, a la altura de la entrada a Villahermosa, Colón (carrera 18 con calle 25), Bosques del Norte (Bengala), Solferino, Alcázares, El Carmen, San Sebastián y Centro (Avenida del Centro entre calles 23 y 24), San José, Fátima, Las Colinas, Campoamor, Minitas, San Antonio, La Sultana, Arboleda (sector el Triángulo), Los Alcázares (Asturias), Malhabar, Persia y Belén. También, la investigación indica que los casos de inundación examinados son en su mayoría debido a las

altas velocidades de flujo condicionadas por la topografía, además, de existir zonas de la ciudad donde la causa se vincula con problemas de capacidad hidráulica, mostrando déficit en el funcionamiento del sistema. Estas se ubican en la zona céntrica de la localidad (comuna San José y Cumanday), donde el 69% de las redes de drenaje fueron instaladas entre los años 1930 y 1961 y la zona presenta las densidades poblacionales más altas de la ciudad con un valor de 269 hab/ha y 247 hab/ha, respectivamente (Arteaga, 2015).

Este proyecto propone encontrar alternativas sostenibles, integrales y eficaces, diferente a la estrategia tradicional de ampliación y reposición de las redes convencionales de alcantarillado para solucionar los problemas de funcionamiento de los sistemas en torno con el manejo del agua lluvia. La implementación masiva de soluciones convencionales son remedios parciales e ineficaces a través del tiempo a la problemática global de las ciudades frente a las dinámicas actuales y futuras para el desarrollo, la expansión, el crecimiento urbano y el aumento de la escorrentía; Así mismo, este tipo de soluciones puede considerarse como un error, al ser complejas y demasiado costosas; donde solo se trasladaría el problema (Barbosa et al., 2012; J. Rodríguez et al., 2008). Esto afecta a las comunidades, su entorno y evita o minimiza el desarrollo de las ciudades.

Por otra parte, el riesgo climático que exhibe Colombia muestra la urgencia de incorporar a los procesos de planificación urbana una concepción de resiliencia que entiendan las dinámicas particulares del ciclo hidrológico, la fisiografía y los patrones de asentamientos humanos, ya que se vuelven fundamentales para la formulación de estrategias de prevención y gestión del riesgo de inundaciones. De igual manera, se contribuye a reconocer los peligros del crecimiento demográfico, la urbanización descontrolada y tomar decisiones colectivas frente a los drenajes

pluviales, mediante procesos de planificación participativa con visión integral (Sedano et al., 2012).

Por lo tanto, esta investigación se fundamenta en establecer alternativas de uso de SUDS aplicables al contexto estudiado, que sirvan para mitigar los picos de caudales que producen inundaciones en las ciudades, atenúen en cierto grado los eventos climáticos que cada vez son más extremos, en vista de que el cambio climático permite asegurar con un nivel de seguridad del 90% que en el departamento de Caldas se podría presentar un aumento en la cantidad de precipitación y en la duración de los periodos húmedos (Ocampo et al., 2020), además ayuden al funcionamiento de los sistemas de drenaje convencionales existentes, y así minimizar los impactos ambientales, sociales y económicos que traen las inundaciones y la reposición o cambio de la infraestructura existente. De la misma manera, sirvan al bienestar ecosistémico y social de la comunidad, con la creación de espacios más agradables visualmente, mayores inversiones para el desarrollo, entre otras.

Esta investigación servirá de guía o base metodológica para otros estudios en sectores o ciudades diferentes del territorio colombiano, que de forma similar presenten inconvenientes con el sistema de drenaje pluvial existente, debido al aumento de los volúmenes de escorrentía y bajos tiempos de concentración que generan problemas de inundaciones a causa del desarrollo urbano, el crecimiento poblacional y la impermeabilización de su suelo natural. Además, los eventos climáticos extremos son cada vez más frecuentes, donde para Manizales se espera aumento en la precipitación de un 21% para los años comprendidos entre 2011 y 2040 (Gobernacion de Caldas et al., 2019), y aunado a lo anterior la infraestructura de drenaje es insuficiente porque se cumplió la vida útil para la cual fue diseñada.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Establecer alternativas de uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que atenúen el aporte de agua de escorrentía superficial derivado de edificaciones urbanas al sistema de alcantarillado existente en una cuenca de la ciudad de Manizales

4.2 Objetivos específicos

- Elaborar un diagnóstico preliminar de una cuenca urbana seleccionada en la ciudad de Manizales, en relación con la impermeabilización de su suelo natural y las condiciones hidráulicas del sistema de drenaje actual.
- Definir tres alternativas de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) aplicables a zonas con edificaciones urbanas y ubicadas en la cuenca de estudio.
- Modelar hidráulicamente la cuenca de estudio mediante el programa de gestión de aguas pluviales SWMM para validar las tres alternativas analizadas de SUDS.

5 Antecedentes

Uno de los problemas medioambientales que generan mayor impacto son los procesos de crecimiento y expansión de las ciudades, puesto que ocasionan una serie de cambios y alteraciones de las condiciones naturales, por ejemplo, en lo relacionado con el drenaje y la gestión de las aguas lluvias que, debido al aumento en los caudales de escorrentía como respuesta de la variación en las intensidades de lluvias, ponen en evidencia la limitada capacidad de los colectores existentes, ocasionando inundaciones y pérdidas económicas para las comunidades. Por lo tanto, en diferentes países se promueve una mejora en la proyección urbanística considerando necesario la implementación de nuevos sistemas de gestión que logren tratar estos problemas con una perspectiva diferente a la convencional.

Por esto, en países como Estados Unidos y Australia, actualmente la legislación en materia de drenaje urbano se enfoca en el problema de las inundaciones y la contaminación difusa (incluye sedimentos, nutrientes, metales pesados, entre otros componentes) lo que los conduce al desarrollo de nuevas leyes, normativas y ordenanzas para implementar nuevas técnicas que combinan aspectos hidrológicos, ambientales, económicos y sociales, logrando como resultado modelos de desarrollo sostenibles y amigables con el ambiente (Medina et al., 2018a).

En Australia, los drenajes urbanos se plantearon como un enfoque de planificación e ingeniería para toda la cuenca de la cual hace parte, con el fin de gestionar el agua lluvia de manera sostenible, armónica y adaptable a las condiciones de esta, permitiendo reducir la frecuencia de inundaciones y la contaminación del agua pluvial logrando así minimizar la degradación del medio ambiente y proteger las cuencas que ha sido impermeabilizadas en alguna medida (Roy et al., 2008). Estados Unidos y Canadá promueve la interacción de los procesos

naturales con el entorno urbano para gestionar el agua lluvia y así preservar y recrear los ecosistemas, de la misma forma que se enfatiza en la conservación y el uso de características naturales en combinación con controles hidrológicos a pequeña escala para reducir los impactos negativos de la urbanización, incluyen medidas estructurales y no estructurales que sirven para mantener las condiciones iniciales previo al desarrollo (Dietz, 2007; Elliott & Trowsdale, 2007).

El uso de las diferentes técnicas de SUDS se ha extendido en países del centro y norte de Europa, con sistemas de drenaje que se orientan en mantener la salud pública, proteger los recursos hídricos de la contaminación y preservar la diversidad biológica y los recursos naturales para las necesidades futuras (Butler & Parkinson, 1997), pero cabe resaltar que las implementaciones de estos varían de acuerdo con los países en donde se desarrollen. Por ejemplo, en Lyon (Francia) durante el planeamiento del parque tecnológico *Porte des Alpes en St. Priest (200 ha)* se adoptaron técnicas SUDS para dar respuesta a las diferentes condicionantes del lugar, entre ellos la falta de una salida natural de drenaje. Medina et al. (2018), menciona que se conjugaron soluciones como cunetas verdes, drenes filtrantes, estanques de retención y depósitos de infiltración que constituyeron el punto final del sistema.

En Dinamarca, el parque nombrado Rabalder es un espacio que protege una zona urbana de las inundaciones resultantes de lluvias repentinas y puede contener 23,000 m³ de agua de lluvia gracias a su sistema de drenaje sostenible original diseñado por la compañía Nordarch, que incluye dos funciones: La primera, combatir el exceso de agua en la ciudad de Roskilde, y la segunda, brindar un espacio recreativo exclusivo para los patinadores (Martínez, 2013). Del mismo modo, Estados Unidos en el año 2010 con el proyecto del Aeropuerto Internacional Stewart de Nueva York, instaló cerca de 24,000 m² de asfalto permeable en la zona de

estacionamientos, con el objetivo de ampliar la capacidad existente y promover la infiltración del agua de lluvia (Department of Environmental Conservation, 2010).

En Colombia, el primer estudio en cuanto al tema de los SUDS fue un documento base para la Alcaldía Mayor de Bogotá (2011) donde se evaluó la “Factibilidad técnica, ambiental, económica y financiera para el desarrollo de la infraestructura de acueducto y alcantarillado sanitario y sistema de drenaje pluvial del borde norte de la ciudad de Bogotá” para el Plan de Ordenamiento Zona Norte POZN, documento que da soporte como parte de la solución para el manejo de la esorrentía pluvial, y donde describe las diferentes tipologías de SUDS, sus beneficios, diseños conceptuales, lineamientos y demás obras o intervenciones requeridas para el desarrollo del proyecto en todos sus aspectos (Garzón & Trivales, 2020).

Martínez (2013) en su estudio realizado planteó los sistemas urbanos de drenaje sostenible “SUDS” como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira, seleccionando como mejor alternativa los tanques de detención y, validándolos mediante la implementación y simulación de un modelo hidráulico, le fue posible verificar el funcionamiento del sistema, con la ventaja de simular el flujo tanto en la red como en el depósito de forma conjunta e interactiva, determinando el volumen necesario para un evento específico y comprobando la funcionalidad de los demás elementos que conforman el sistema, incluida la entrega regulada a la red existente.

Por otra parte, Martínez (2017) propuso una metodología para determinar el potencial de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en áreas residenciales de la ciudad de Bogotá, a partir de análisis de sistemas de información geográfica (SIG) y concluye que las tipologías más frecuentes de implementación en uso de suelo residencial (sin incluir

tanques de almacenamiento) para ambas condiciones (con y sin prácticas de infiltración) fueron: alcorques inundables, zonas de bio-retención y soakaways.

Camargo & Lozada (2018) realizaron un estudio para el diseño de un drenaje sostenible en la ciudad de Bogotá localizado en la Autopista norte con calle 127. Se proyectó la implementación de un tren de SUDS a fin de lograr un almacenamiento de 103.70 m³ de agua de escorrentía para reducir en solo ese punto un 30.93% del volumen calculado para el área de estudio que es de 335.21 m³. Se concluye que el volumen de agua de escorrentía que manejará las tipologías de SUDS es alto y sería conducida a través de estas estructuras, evitando que en eventos naturales de precipitaciones con altos picos de lluvia las inundaciones se volvieran a presentar.

Para el caso específico de la ciudad de Manizales, Rey (2019) plantea una propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente mediante el uso de una simulación hidráulica, encontrando que las cisternas simuladas de capacidad de 10,000 L presentaron un mejor desempeño con un almacenamiento total o en su gran mayoría de la escorrentía correspondiente, de manera que retardan el ingreso de esta a la red hasta su liberación o posterior reúso. Mientras que en la modelación mostró que, aunque disminuyen el caudal pico para algunos casos hasta en 25% no logran una disminución importante de este. Por otra parte, en el mismo estudio, los techos verdes presentaron un buen desempeño de manera que en todos los casos se logró retener el flujo de salida, logrando almacenar toda la lluvia, lo que demuestra que este SUDS tiene el mejor comportamiento en mitigar la inundación, logrando disminuciones superiores al 25% del caudal pico (requisito RAS) en la mayoría de los casos.

6 Marco de referencia

6.1 Hidrología Urbana

Desde la prehistoria muchas ciudades del mundo fueron desarrolladas en la cercanía de un río, ya que la red hidrográfica natural también conocida como una red multiflujo por excelencia, era la portadora de numerosos recursos utilizados por la humanidad (agua, alimentos, materiales de construcción, entre otros.), la cual permitía el transporte de bienes, personas y la evacuación de desechos de grandes ejes de circulación a fin de atravesar el relieve y la selva. Con el paso del tiempo, la manera de como evolucionaron las ciudades desde la cercanía del río hasta las altas cotas trajo como consecuencia grandes riesgos de inundaciones, fue entonces cuando el hombre comenzó a imaginar nuevas técnicas que le permitieron tener control de su entorno. Inicialmente, para afrontar las inundaciones se construyeron diques a lo largo del río y solo fue a partir del siglo XVI que se comenzaron a regularizar y cubrir los riachuelos urbanos, convertidos en alcantarillas que servían tanto para las aguas lluvias como para las aguas negras, de tal manera que la ciudad “enterró” el agua (Chocat, 1997; Torres, 2004).

En la segunda mitad del siglo XX, el crecimiento acelerado de la población generó graves déficits de infraestructura urbana para el drenaje de las aguas lluvias, causando relevantes problemas de inundación en numerosas comunidades, lo cual impulsó una nueva disciplina denominada hidrología urbana que es el conjunto de relaciones entre el desarrollo de ciudad y la parte urbana del ciclo del agua, donde se toma los conceptos de la hidráulica y la hidrología para la aplicación en el medio urbano: estudio de la lluvia, la transformación lluvia-escorrentía y el comportamiento hidráulico del alcantarillado. Asimismo, es la disciplina técnico-científica del medio ambiente que tiene como objetivo el estudio del agua y de sus relaciones con las diferentes interacciones en la zona urbana (Gómez, 2007; Torres, 2004).

El concepto de hidrología urbana es de gran importancia, debido a que es cada vez más inherente al desarrollo urbano, al aumento de la población y a los cambios de uso del suelo. La urbanización que se puede presentar en una cuenca natural modifica su respuesta hidrológica frente a un determinado evento de lluvia, lo que genera alteraciones en las redes de drenaje natural. Las soluciones implementadas convencionalmente de construcción de colectores enterrados que tienen como finalidad evacuar el agua pluvial de la manera más eficiente y rápida posible de la ciudad, han afectado directamente la hidrología de la cuenca y ocasionado que se incremente el volumen de escorrentía y el caudal máximo, del mismo modo que se disminuya el tiempo de respuesta por el aumento de las velocidades de escurrimiento (modificación del hidrograma), donde se genera problemas de funcionamiento de los sistemas y posteriormente aumento de la frecuencia de inundaciones (Fresno et al., 2005; Gómez, 2007; Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007; Sañudo et al., 2012).

Por lo tanto, el desarrollo urbano provoca un cambio significativo en los patrones de escorrentía en relación con los volúmenes de flujo máximo y velocidades de escorrentía, debido a los impactos que ocasiona la distribución urbana y la impermeabilización de sus superficies (Gómez, 2007; Huong & Pathirana, 2013; Leopold, 1968). Por ejemplo, desde el siglo XX se ha investigado los impactos que genera la transformación de las cuencas naturales en relación con la hidrología y el aumento de las inundaciones. Leopold (1968) estudió una parte de la cuenca de Brandywine Creek en Pensilvania, con lo que mostró el efecto de la urbanización en el volumen y el pico de la inundación. De la misma forma, el estudio menciona que el volumen de escorrentía se rige principalmente por características de infiltración y está relacionado con la pendiente del terreno, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, por tanto, se ve directamente influenciado por el porcentaje de superficie transformada a zonas duras (techos, vías, otros).

También, se menciona que las alteraciones en el uso del suelo generado por la urbanización son los que más afectan los cambios en la hidrología de un área específica. Sin embargo, en la investigación se indica que lo anterior puede ser compensado para que la descarga aguas abajo se mantenga en cualquier grado deseado dentro del rango que existía antes de la urbanización y evitar problemas en torno al recurso hídrico.

Otro estudio realizado por Huong & Pathirana (2013) en la ciudad de Can Tho - Vietnam, exhibe que los cambios locales impulsados por la urbanización (crecimiento urbano e impermeabilización) y el impacto climático a gran escala (clima menos predecible, lluvias inciertas y mayores probabilidades de fuertes lluvias de tormenta) influyen significativamente en el panorama de las futuras inundaciones en la ciudad. Además, la investigación muestra que la solución para el problema de las inundaciones no está relacionada con un futuro lejano, sino que tiene que ver con la situación actual de la población, indicando que el sistema de drenaje urbano existente no es el adecuado, falta cobertura del sistema en la ciudad y que las medidas correctivas deberían de empezar en este punto. De aquí parte la idea de que es extremadamente importante la planificación urbana, con lo cual, se deberá tener en cuenta en las soluciones planteadas los cambios previstos en el futuro en cuanto al cambio climático y el crecimiento urbano. Esto exige que los nuevos diseños sean innovadores y que combinen las alternativas de solución tradicionales con las no estándar, como pueden ser los SUDS, representando un área extremadamente importante para futuras investigaciones.

6.2 *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*

Para controlar las posibles inundaciones, se dio lugar a los sistemas de drenaje convencionales en zonas urbanizables, conocidos porque se aplican en la mayoría de las ciudades y tienen como objetivo evacuar la escorrentía hacia un medio receptor en pequeños intervalos de tiempo. Dichos sistemas convencionales, pueden presentar problemas, ya que son poco flexibles. Estos inconvenientes pueden ser clasificados en tres categorías: cantidad, calidad y servicio. Los problemas de cantidad, por ejemplo, como las inundaciones, llegan a ser los más perceptibles, ya que su incidencia es visible y notable en el momento que se producen, lo que genera una alteración en el ciclo natural del agua produciendo mayores volúmenes de escorrentía y caudales de punta, por lo tanto, es necesario recogerla, transportarla y verterla al entorno natural en puntos concretos (Castro et al., 2005; G. Martínez, 2013c; L. Rodríguez, 2011).

En la última década, regiones o países como Europa, América del Norte, Australia y Japón, han planteado un enfoque alternativo o compensatorio de drenaje de agua lluvia que ha hecho que estos problemas se vean reducidos, compensando o mitigando el impacto de la urbanización sobre el ciclo hidrológico. En la actualidad, existe una gran diversidad de técnicas compensatorias en el drenaje de lluvia. Asimismo, técnicas complementarias que dirigen el escurrimiento de agua a las áreas verdes con suficiente capacidad de infiltración (G. Martínez, 2013c).

La problemática que se vive actualmente en las ciudades respecto a la gestión del agua pluvial, desde una perspectiva diferente a la convencional, ha concentrado a los investigadores a realizar una búsqueda continua de alternativas de uso que ayuden a que su manejo sea más eficiente y que combinen aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales, puesto que el

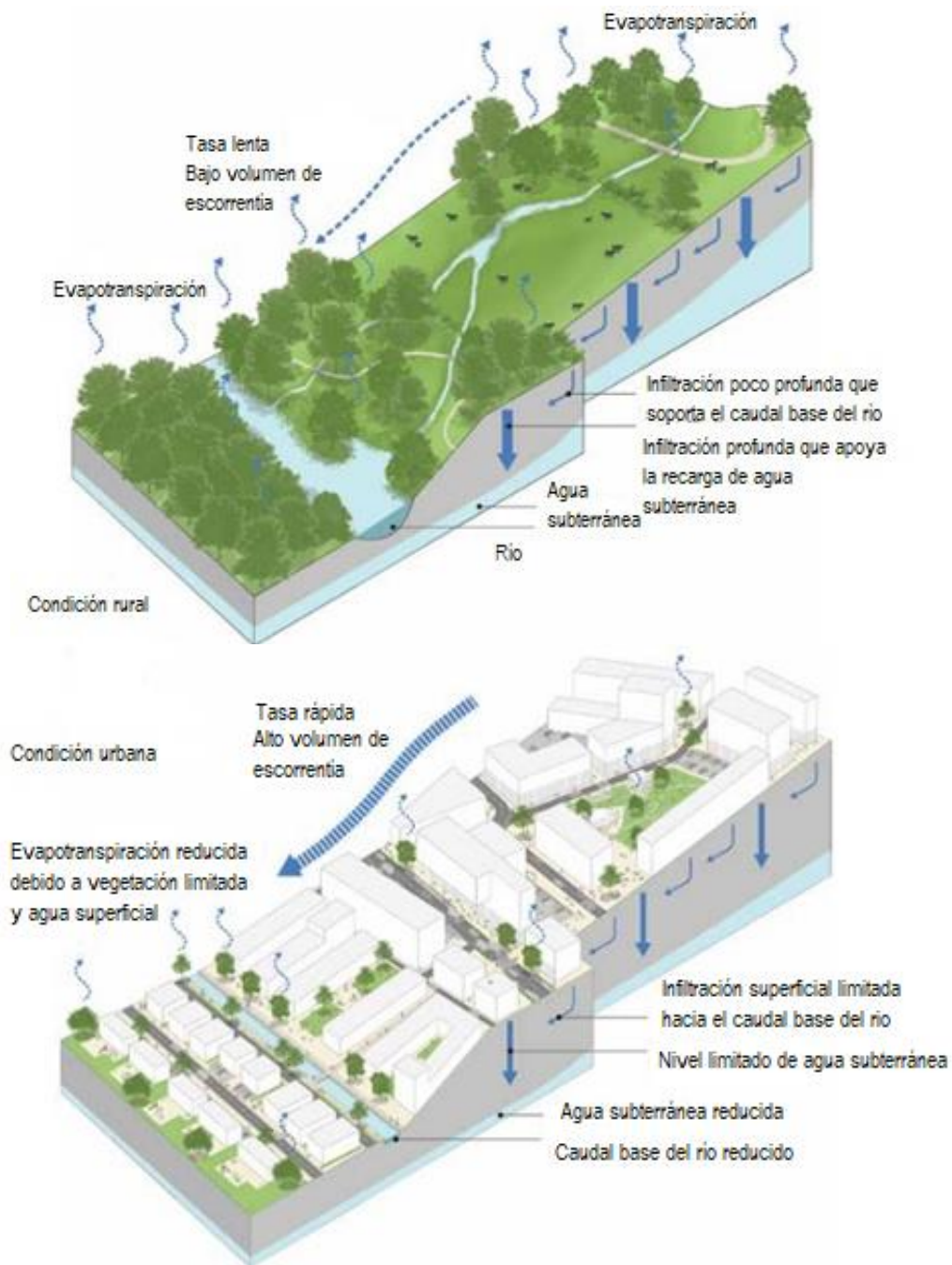
problema de ingeniería es de gran relevancia para la población a la que beneficia (CIRIA C753, 2015; Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007; Santos & Cubides, 2018).

Es así que, dentro del movimiento global de investigación del agua pluvial se ha generado una línea de estudio que abarca una serie de alternativas de solución para complementar y mejorar el drenaje convencional de las ciudades “SUDS”, estos en su filosofía tratan de reproducir de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo al desarrollo urbano, donde su objetivo es minimizar los impactos de la urbanización en cuanto a cantidad y calidad de la escorrentía (en origen, durante su transporte y en destino), de igual manera, buscan maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental.

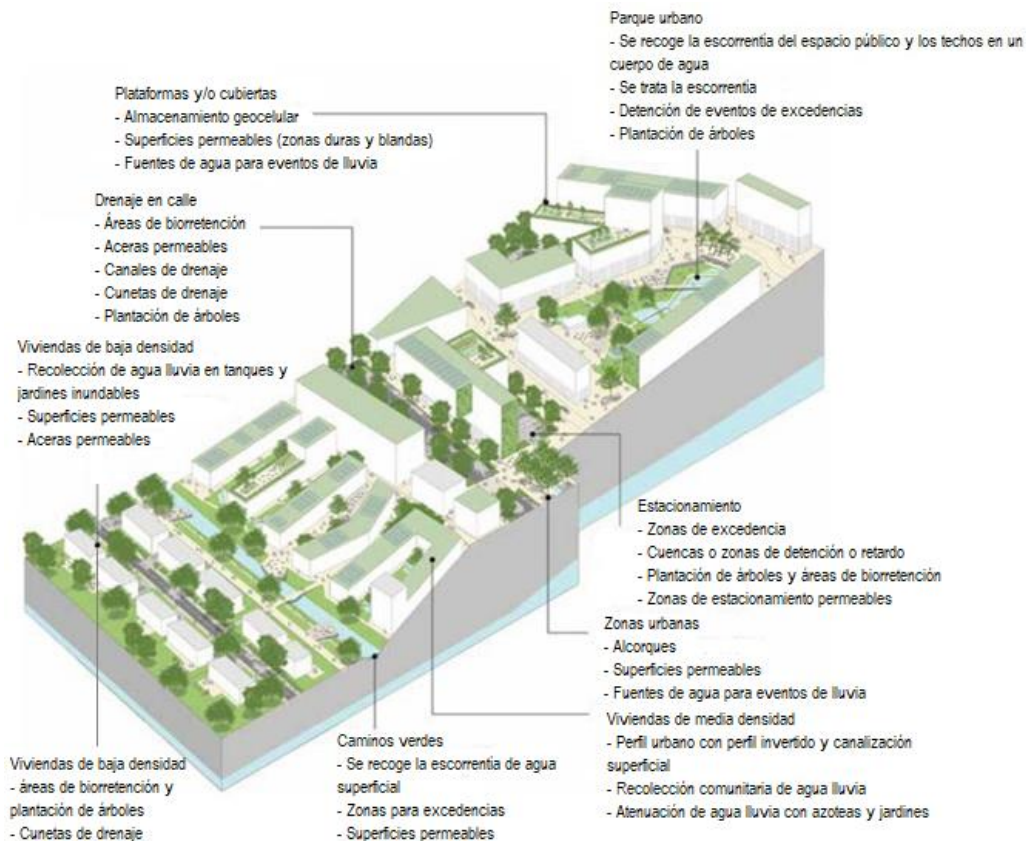
Por todo lo expuesto, se puede entender que la misión de los SUDS es generar alternativas de solución basadas en la naturaleza que permitan captar, filtrar, retener, transportar, almacenar e infiltrar al terreno el agua, de tal forma que esta no se vea afectada y permita eliminar de forma natural una parte de la carga contaminante que haya podido adquirir por procesos de escorrentía urbana previa (ver Figura 5 y Figura 6) (CIRIA C753, 2015; Fresno et al., 2005; Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007; Sañudo et al., 2012; Trapote Jaume, 2016). Con un buen planteamiento, diseño, construcción y mantenimiento, los SUDS pueden mitigar los efectos adversos, ya que pretenden tratar el agua pluvial de la manera más natural y aprovecharla, sin contaminarla ni convertirla en agua residual, con el fin de completar la labor realizada por los sistemas de drenaje convencionales y mejorar la eficiencia de estos (L. Rodríguez, 2011; Sañudo et al., 2012).

Figura 5

Impactos del desarrollo urbano en una cuenca natural



Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

Figura 6*Ejemplos de sistemas urbanos de drenaje sostenible para desarrollos urbanos*

Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

Algunas denominaciones para los Sistemas de Drenaje Sostenible son las siguientes

(Fresno et al., 2005; Santos & Cubides, 2018):

- SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems).
- BMPs (Best Management Practices).
- MPC (Mejores Prácticas de Control).
- BPAs (Buenas Prácticas Ambientales).
- TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible).
- LID (Low Impact Development).
- WSUD (Water Sensitive Urban Design).
- Diseño Urbano Sensible al Agua.

Adicionalmente, los objetivos de los SUDS abarcan, entre otros, los siguientes aspectos (CIRIA C753, 2015; Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007; Sañudo et al., 2012):

- Proteger a las personas y los bienes del aumento del riesgo de inundación resultante del desarrollo urbano.
- Proteger la calidad de las aguas subterráneas y superficiales de las escorrentías contaminadas producto del desarrollo.
- Proteger los regímenes de caudal natural (y, por lo tanto, la morfología y la ecología asociada) en ríos, lagos y arroyos.
- Apoyar los hábitats naturales locales y los ecosistemas asociados, fomentando una mayor biodiversidad y vinculando hábitats.
- Mejorar la humedad del suelo y reponer los niveles de aguas subterráneas agotadas.
- Proporcionar a la sociedad un valioso suministro de agua.
- Crear lugares atractivos donde la gente quiere vivir, trabajar y divertirse, a través de la integración del agua y los espacios verdes con el entorno construido.
- Mejorar la comprensión de las personas sobre cómo se gestiona y utiliza la escorrentía producto del desarrollo, y los beneficios de enfoques más sostenibles.
- Apoyar el desarrollo urbano con la creación de alternativas de uso que sean más capaces de hacer frente a los cambios en el clima.
- Entregar infraestructura rentable que utiliza menos recursos naturales y tenga una huella de carbono más pequeña que el drenaje convencional.
- Proteger los sistemas naturales, mejorando el ciclo del agua en entornos urbanos.
- Integrar el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje: maximizar el servicio al ciudadano mejorando el paisaje con la integración de cursos y/o láminas de agua en el entorno.
- Proteger la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas.
- Reducir volúmenes de escorrentía y caudales punta procedentes de zonas urbanizadas mediante elementos de retención y minimizando áreas impermeables.
- Incrementar el valor añadido minimizando costes de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno.

El enfoque de los SUDS para gestionar la escorrentía de aguas superficiales debe basarse en puntos clave como los que se enuncian a continuación, con el fin de maximizar los beneficios finales de su implementación (CIRIA C753, 2015):

- Utilizar la escorrentía de aguas superficiales como un recurso.
- Administrar el agua lluvia cerca de donde cae (en la fuente).
- Gestionar la escorrentía en la superficie (sobre el suelo).
- Permitir que el agua lluvia se infiltre en el suelo.
- Promover la evapotranspiración.
- Reducir y almacenar el volumen de escorrentía superficial para imitar las condiciones de escorrentía natural y sus volúmenes.
- Reducir la contaminación de la escorrentía, a través de la prevención de la contaminación y mediante el control de la escorrentía en la fuente.
- Tratar la escorrentía para reducir el riesgo de contaminantes urbanos que causan contaminación ambiental.

De igual manera CIRIA C753 (2015) indica que, dependiendo de las características del sitio y los requisitos locales, estos pueden ser utilizados en combinación y en diferentes grados.

Para los SUDS no existe un consenso universal donde se defina la clasificación de las diferentes tipologías, sin embargo, los sistemas urbanos de drenaje sostenible pueden encaminarse hacia medidas estructurales y no estructurales (Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007). Bajo esta perspectiva, los SUDS se pueden ordenar o categorizar de la siguiente manera (ver Tabla 1) (Fresno et al., 2005):

Tabla 1

Clasificación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible de acuerdo con el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción “GITECO”

Clasificación	Definición	Alternativa/tipología
Medidas preventivas	Consideraciones a nivel de planeamiento que minimizan o evitan que se produzcan los problemas asociados a la escorrentía superficial. Estos inconvenientes son derivados de la cantidad y la calidad de las aguas pluviales producto de la impermeabilización de las cuencas y el tránsito de la escorrentía por la ciudad.	Legislación Educación Programación económica
Sistemas de infiltración o control de origen	Permiten la recepción directa del agua pluvial y su infiltración. Estos sistemas pueden estar conectados con otros, y cerrar el ciclo del agua agrupando la superficie con el sustrato permeable.	Superficies permeables Pavimentos permeables Techos verdes Pozos y zanjas de infiltración Depósitos de infiltración
Sistemas de transporte permeable	Su función es transportar el agua lluvia con una serie de ventajas hacia otros sistemas de tratamiento o lugar de vertido correspondiente.	Drenes filtrantes o drenes franceses Cunetas verdes Franjas filtrantes
Sistemas de tratamiento pasivo	Permiten almacenar y regular el agua lluvia durante un periodo de tiempo definido al final de la red, donde se propicia el tratamiento adecuado del agua.	Depósitos de detención Tanques de retención Humedales artificiales

Tal y como se muestra en la Tabla 1, y de acuerdo con CIRIA C696 (2007), existen tres procesos que pueden ser utilizados para la gestión del agua de escorrentía que son la infiltración, transporte y captación del agua, los cuales se encuentran categorizados a fin de generar una amplia gama de soluciones en donde cada opción tiene características únicas que permite el control del agua lluvia, control de inundaciones, conservación del agua, entre otras (L. Rodríguez, 2011).

A continuación, se presenta la categorización de los procesos consignados en la Tabla 1.

6.2.1 Medidas preventivas

L. Rodríguez (2011) expresa que la regla principal de las buenas prácticas de drenaje sostenible involucra la concientización de los ciudadanos y la participación de los entes ambientales y organizaciones en todos los aspectos relacionados con la limpieza de la ciudad, la reducción de contaminantes y la purificación de la escorrentía. Es decir, este sistema obedece a cualquier consideración que evite o mitigue los problemas asociados a la gestión del agua de escorrentía superficial. Además, también asegura que para realizar dichas medidas de prevención es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Minimizar la escorrentía superficial de la ciudad.
- Drenar hacia las zonas verdes en vez de derivar el agua al alcantarillado.
- Recoger las aguas pluviales para un uso posterior como riego, cisternas, lavadoras, entre otras.
- Reducir el uso de herbicidas y fungicidas en las zonas comunes de recreación.
- Concienciación de fuentes contaminantes.

6.2.2 Sistemas de infiltración o control de origen

Los sistemas de infiltración facilitan la descarga de agua de escorrentía al suelo y en última instancia al agua subterránea a fin de reducir las tasas y los volúmenes de los escurrimientos, que a su vez favorece el proceso de recarga subterránea y flujo base a través del tiempo. El éxito de estos, depende de la capacidad de infiltración de los suelos y de la profundidad del agua subterránea (CIRIA C753, 2015).

Como parte del proceso de definición de los sistemas de infiltración se tienen algunas consideraciones, las cuales deben ser evaluadas antes de determinar el grado en el que se puede utilizar la infiltración en un sitio (CIRIA C753, 2015):

- Tipo de suelo y capacidad de infiltración.
- Riesgo de inestabilidad del suelo, hundimiento o levantamiento debido a la infiltración.
- Riesgo de inestabilidad de la pendiente debido a la infiltración.
- Riesgo de contaminación del agua subterránea por la movilización de contaminantes existentes.
- Riesgo de contaminación por infiltración de aguas superficiales contaminadas de escorrentía del sitio.
- Riesgo de inundación de agua subterránea debido a la infiltración.
- Riesgo de fuga de agua subterránea hacia las alcantarillas, sótanos, túneles, u otras estructuras debido a la infiltración en el sitio.

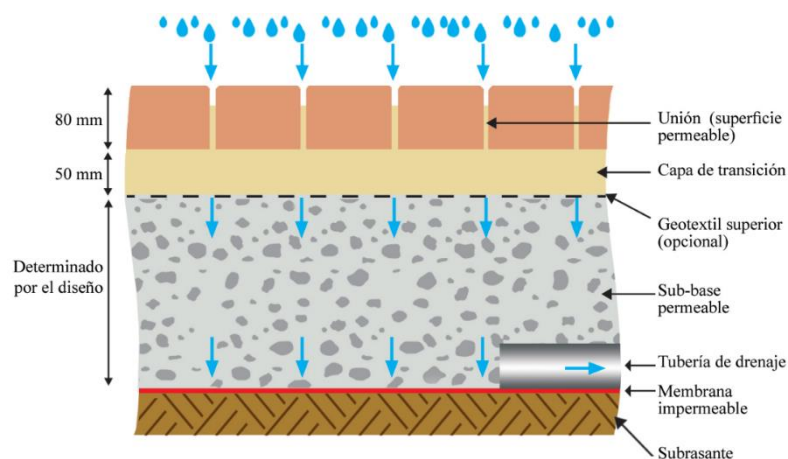
El proceso de infiltración se puede llevar a cabo mediante el uso de los siguientes SUDS:

- **Superficies permeables**

Son sistemas constituidos por un volumen de material permeable situado bajo una superficie que permite el paso del agua en una capa subyacente que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de almacenamiento, en donde es transportada y posteriormente puede ser reutilizada o evacuada en aguas superficiales. Las distintas capas permeables son las encargadas de retener las partículas de diversos tamaños, aceites y grasas, todas las capas deben tener permeabilidades crecientes, desde la superficie hasta la subbase. Algunos ejemplos de este tipo de sistema pueden ser: césped, césped reforzado, grava, pavimento (ver Figura 7) (Castro et al., 2005; CIRIA C523, 2001; Pratt, 2003).

Figura 7

Ejemplo de superficie permeable con infiltración total



Nota: Adaptado de Cárdenas et al., 2016.

- **Pavimentos permeables**

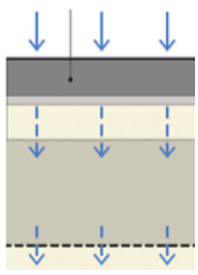
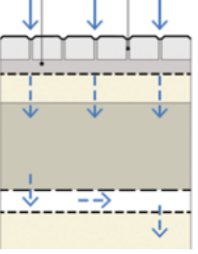
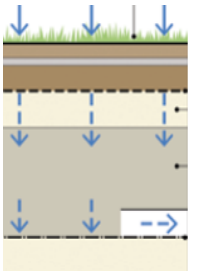
Los pavimentos permeables son un medio eficiente de tratar la escorrentía de agua superficial cerca de su fuente interceptando la escorrentía, reduciendo el volumen y la frecuencia de la escorrentía, y proporcionando un medio de tratamiento (CIRIA C753, 2015). Estos tienen como objetivo principal reemplazar el pavimento convencional por un tipo de pavimento que permita drenar el agua hacia el subsuelo, de manera que la escorrentía no se acumule en la superficie. Dicho sistema se encuentra conformado por cuatro capas principales; En primer lugar, se tiene la capa superficial que puede estar conformada por concreto poroso, grava porosa, adoquines entre lazados o adoquines de rejillas de concreto. En segundo lugar, se ubica la capa de nivelación compuesta típicamente por arena y un material permeable, cuya función es estabilizar la capa superior. La tercera capa corresponde a la capa de almacenamiento, que está compuesta por un material granular a través del cual se detiene la escorrentía. Finalmente,

encontramos una capa filtrante que contiene un relleno (arena o piedra triturada), por medio del cual se infiltra el agua que atraviesa las capas superiores (CIIA, 2017).

Existen tres sistemas principales de gestión del agua debajo de la superficie de los pavimentos permeables que se presentan a continuación Tabla 2.

Tabla 2

Sistemas principales de gestión de superficie de pavimentos permeables

Descripción	
<p>A Sistema en el que toda la lluvia pasa a la subestructura en donde puede almacenarse temporalmente y desde ahí infiltrarse al suelo por debajo. Normalmente, no genera una descarga del sistema a un alcantarillado. Sin embargo, es posible que se requiera un desbordamiento de emergencia a fin de atender eventos que excedan el diseño o que permita que el sistema se vuelva menos eficiente, es decir, que reduzca las tasas de infiltración durante su vida útil.</p>	
<p>B Sistema en donde la proporción de lluvia excede la capacidad de los subsuelos y fluye hacia el sistema de drenaje receptor, esto puede ocurrir por drenaje directo o por transporte a través de tuberías perforadas dentro o debajo de ella. Al evitar la acumulación de agua por encima de la subrasante, se reducen los riesgos para la estabilidad del suelo.</p>	
<p>C Sistema en donde no hay infiltración, es decir, el sistema está generalmente cubierto por una membrana impermeable y flexible en donde una vez se ha filtrado el agua se transporta al emisario a través de tuberías perforadas o desagües de aleta. Este sistema podrá ser utilizado en las siguientes situaciones: Suelos con baja permeabilidad y resistencia. El agua se va a recolectar y utilizar. El agua subterránea subyacente es sensible y requiere protección. El nivel de freático está a 1 m de la subbase. El sitio está contaminado y los riesgos de movilizar contaminantes deben minimizarse.</p>	

Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

El diseño de pavimentos permeables se basa en las cargas de tráfico esperadas y la apariencia visual que se requiere. Además, debe de cumplir con los requisitos relevantes para los sistemas de infiltración con respecto a la estabilidad del terreno, la profundidad del agua y la protección de aguas subterráneas (CIRIA C753, 2015). En el Reino Unido, se han utilizado tipos específicos de pavimentos permeables para superficies con tráfico pesado de cargas por eje en carretera. En USA, hay ejemplos de usos exitosos de pavimentos permeables en carreteras estatales, y actualmente están considerando el uso de diseño de concreto permeable para pavimentos de mucho tráfico (Wanielista & Chopra, 2007).

En la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos pavimentos permeables:

Tabla 3

Ejemplos de pavimentos permeables

Clasificación	
Pavimentos permeables de tipo concreto poroso.	
Pavimentos permeables tipo adoquines entrelazados.	
Pavimentos permeables de tipo mezcla asfáltica porosa.	

Nota: Imágenes adaptadas de CIIA, 2017.

- **Techos verdes**

Los techos verdes se encuentran conformados por múltiples mantos, que se instalan en la cubierta de las edificaciones con diferentes propósitos como la de captar agua lluvia con el fin de reducir los volúmenes de escorrentía, generar hábitat para diferentes especies, o simplemente otorgarle un valor estético (ver Figura 8). La estructura que conforman los techos impermeables son dos; la capa impermeable que es la base de cualquier techo verde que también funciona como membrana anti-raíces y la capa de drenaje, que es la encargada de eliminar el exceso de agua de la cubierta, estas comercialmente tienen forma de celdas y orificios por los que se evacúa el agua (Cecilia & Ávila, 2012; CIRIA C66, 2007).

Figura 8

Estructuras básicas de los techos verdes



Nota: Adaptado de Rudas, 2019.

Los techos verdes se pueden clasificar de diversas formas, según el espesor del sustrato, su propósito o la tecnología empleada para la construcción. Los diferentes tipos de techos verdes se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4*Clasificación general de los techos verdes*

Clasificación	Descripción
Según el espesor del sustrato o medio de crecimiento	Techos verdes extensivos Techos verdes intensivos Techos verdes semi intensivos
Según su propósito	Techos verdes biodiversos o ecológicos especializados Techos transitables o ajardinados Techos verdes huerta Techos verdes autorregulados
Según la tecnología de construcción empleada	Tipo multicapa monolítico Tipo multicapa elevados Tipo receptáculo Tipo monocapa Aeropónicos

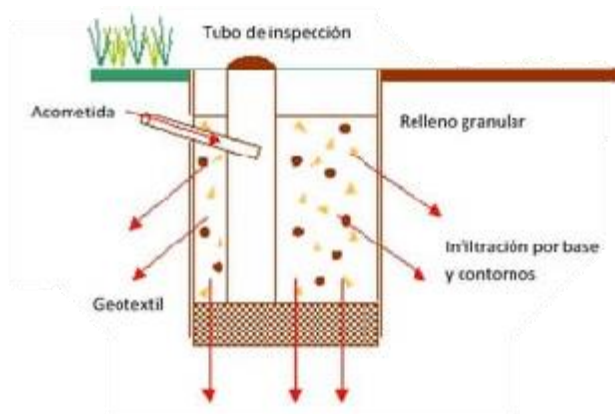
Nota: Adaptado de Cecilia & Ávila, 2012.

- **Pozos y Zanjas de infiltración**

Son estructuras de infiltración poco profundas (1 a 3 m), cuadradas o circulares, revestidos con anillos, y relleno con material granular, el cual cumple la función de filtro de sedimentos y partículas gruesas (ver Figura 9). Este tipo de sistema permite la intercepción y detención temporal del flujo de agua escorrentía proveniente de un evento de lluvia. Además, permite el almacenamiento del agua en los intersticios del material granular a fin de infiltrar en el suelo circundante el volumen acumulado a través del fondo de la estructura. En algunos casos, las limitaciones físicas del suelo intervenido, el tamaño disponible para su implementación o la calidad del agua interceptada restringe la capacidad de infiltración de la estructura. Por lo tanto, es necesario involucrar estructuras complementarias que permitan evacuar adecuadamente el volumen remanente de agua que no fue drenado a través del suelo (Castro et al., 2005; CHIA, 2017).

Figura 9

Pozos y zanjas de infiltración



Nota: Adaptado de Momparler, 2008.

La elección del tipo de materiales utilizados y la capacidad de absorción del suelo son las principales características que se consideran en el diseño. Además, se debe incluir zonas de monitoreo donde se pueda observar o medir el nivel del agua en el sistema. La vida útil y el rendimiento eficaz se encuentran relacionados con la frecuencia de mantenimiento y la cantidad de sedimentos en el sistema.

- **Depósitos de infiltración**

Son zonas de embalse superficial de forma convexa por una cóncava donde se almacena el agua hasta su infiltración promoviendo así la transformación de un flujo superficial en subterráneo y adicionalmente, eliminando contaminantes mediante los procesos de filtración, absorción y transformación biológica (ver Figura 10) (Castro et al., 2005; Sara Perales-Momparler & Andrés-Doménech, 2007).

Figura 10

Depósito de infiltración



Nota. Adaptado de Momparler, 2008.

6.2.3 *Sistemas de transporte permeable*

Son sistemas de tipo lineal cuya misión principal es la de transportar el agua pluvial hacia otros sistemas de tratamiento mayor o a los lugares de vertido correspondientes. Suelen estar ubicados en las zonas laterales de los caminos, siendo ellos mismos los puntos de recogida del agua de escorrentía urbana aportando en su camino una serie de ventajas (Rodríguez et al., 2008).

El proceso de transporte permeable se puede llevar a cabo mediante el uso de los siguientes SUSD:

- **Drenes filtrantes**

Son zanjas poco profundas llenas de piedra/grava (ver Figura 11) que crean un almacenamiento subsuperficial para la atenuación, la conducción y la filtración de la escorrentía de las aguas superficiales; dependiendo de la idoneidad de los suelos subyacentes y de la protección que ofrecen las aguas subterráneas pueden permitir la infiltración. Estos drenes cuentan con diferentes tipos de superficies y tienen un aspecto estético sugestivo en los desarrollos urbanos, están idealizados para recibir la afluencia lateral de una superficie

impermeable que haya sido penetrada mediante una franja filtrante con vegetación o algún equivalente (CIRIA C753, 2015).

Figura 11

Drenes filtrantes



Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

- **Cunetas verdes**




Son canales naturalizados capaces de almacenar y transportar superficialmente la escorrentía (S Perales-Momparler et al., 2008). Son de fondo plano y poco profundos, cuando se incorporan al diseño de un sitio pueden mejorar el paisaje natural y proporcionar beneficios estéticos y de diversidad biológica (CIRIA C753, 2015).

Estos canales pueden reemplazar las tuberías convencionales como un medio de conducción y consisten en depresiones del terreno con un rango de pendientes longitudinales que permiten la circulación del agua. Esta tipología se caracteriza por tener franjas de césped como estructura anexa a ambos lados. También, suele implementarse en zonas de espacio público dado que se requiere de un área considerable para que el agua sea transportada apropiadamente. Existen diferentes tipos de cunetas que son implementadas de acuerdo con las condiciones del lugar y el interés particular de quien desarrolle el sistema. La cuneta convencional es aquella que puede ser implementada de manera más sencilla y permite la infiltración natural hacia el suelo

permeable. La cuneta seca es aquella que permanece gran parte del tiempo en estado seco y cuenta con reservorio en la parte inferior de la cuneta a fin de facilitar la infiltración y retención de volumen adicional de escorrentía, de tal forma que en la superficie no se mantenga una lámina profunda de agua. La cuneta húmeda consiste en un canal que impide la infiltración (natural o con reservorio), con el fin de conservar una lámina de agua casi permanente en el sistema y para lograrlo se implementa un recubrimiento impermeable en el suelo (CIIA, 2017; CIRIA C753, 2015). En la Tabla 5 se presentan algunos ejemplos de cunetas verdes:

Tabla 5

Cunetas verdes

Modelo	
Cuneta convencional	
Cuneta seca	
Cuneta húmeda	

Nota: Imágenes adaptadas de CIRIA C753, 2015.

- **Franjas filtrantes**

Son franjas de hierba u otra vegetación, uniformemente graduadas y con pendiente suave. Son las encargadas de propiciar la sedimentación de las partículas y contaminantes arrastrados por el agua, tratan y gestionan el agua de escorrentía mediante procesos, físicos, químicos y biológicos (Castro et al., 2005; S Perales-Momparler et al., 2008). La escorrentía se diseña a fin de que fluya en forma de lámina a través de la banda filtrante a velocidades lo suficientemente bajas para reducir de manera eficaz los niveles de partículas contaminantes mediante la eliminación de sedimentos y materiales orgánicos (ver Figura 12).

Figura 12

Franjas filtrantes



Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

6.2.4 Sistemas de tratamiento pasivos

Se consideran sistemas de tratamiento pasivo a aquellos situados al final de la red para prolongar la estancia de las aguas pluviales por un periodo de tiempo, antes de su vertido al medio receptor, que permita proporcionar el tratamiento adecuado a las mismas (J. Rodríguez et al., 2008).

- **Zonas de bio-retención**

Son depresiones paisajísticas poco profundas que pueden reducir las tasas y volúmenes de escorrentía para tratar la contaminación mediante el uso de suelos artificiales y vegetación. Tiene como objetivo gestionar y tratar la escorrentía, promoviendo la detención, infiltración y transporte de la escorrentía. Dichas zonas de bio-retención pueden implementarse en varios espacios y contextos que incluyen separadores viales, andenes, áreas de uso residencial, parqueaderos, zonas recreativas y áreas comerciales (CIRIA C753, 2015) (ver Figura 13)

Figura 13

Zonas de bioretención



Nota: Adaptado de CIRIA C753, 2015.

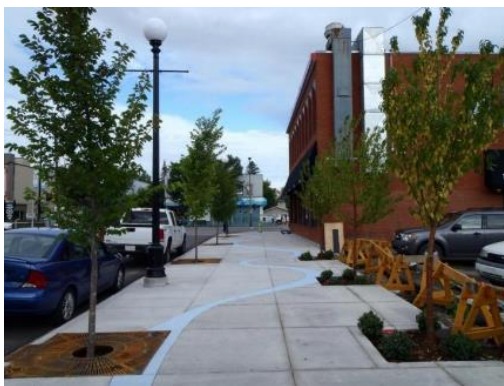
- **Alcorques**

Son esencialmente sistemas de bio-retención con árboles en su interior (ver Figura 14), para mejorar su capacidad y rendimiento. Estos sistemas son adecuados para zonas altamente urbanizables, donde hay poco espacio disponible para su instalación debido a que se compone de una caja de concreto prefabricada, incluye un sistema de drenaje para dirigir la escorrentía fuera del alcorque compuesto por una tubería perforada subterránea, una tubería de rebose, se incluye un árbol o un arbusto, una rejilla para proteger el árbol, disipadores de energía y una zona

disponible para almacenamiento temporal de agua. Además, tiene como objetivo incrementar la habilidad del árbol para reducir la escorrentía y proveer condiciones para que éste pueda soportar problemas asociados a las inundaciones y la interacción con estructuras circundantes. Los alcorques disponen de suelos modificados que se encuentran en capacidad de almacenar la escorrentía, permitir la expansión de las raíces, canalizar y dirigir la escorrentía al alcorque. Así mismo, se pueden diferenciar tres tipos de alcorques inundables; el primero, la salida se da a través de una tubería de rebose, en el segundo, se hace uso de un sistema de drenaje para la evacuación del agua y en el último, se promueve la infiltración profunda y recarga de aguas subterráneas (CIIA, 2017; CIRIA C753, 2015).

Figura 14

Alcorques inundables



Nota: Adaptado de CIIA, 2017.

- **Tanques de almacenamiento**

Los tanques de almacenamiento son estructuras rígidas en forma de prismas, utilizados para crear un espacio vacío para el almacenamiento temporal de las aguas superficiales antes de su infiltración. El agua almacenada es posteriormente evacuada mediante una liberación controlada o utilizada en actividades que no requieren calidad de agua. El diseño de estas

estructuras puede variar de acuerdo con el objetivo para el cual está planteado, por lo tanto, existen múltiples métodos y la posibilidad de ubicarlos de manera superficial o subterránea (ver Tabla 6) (CIIA, 2017; CIRIA C753, 2015).

Tabla 6

Clasificación de los tanques de almacenamiento de acuerdo con su ubicación

Clasificación	Descripción
Tanque superficial	<p>Se encuentra diseñado a fin de reusar el agua pluvial acumulada, por lo tanto, es necesario implementar una bomba de succión, la cual puede ser de flotador o estacionaria. Este tipo de tanque posee dos zonas importantes de almacenamiento, las cuales se encuentran delimitadas por un volumen específico.</p> <p>Consta de una zona de almacenamiento mínimo, la cual corresponde a un volumen remanente de agua que no se reutiliza para garantizar la buena operación de la bomba.</p> <p>Tiene una zona de detención que otorga la capacidad del tanque ante eventos muy fuertes de lluvia (volumen del tanque es ocupado en su totalidad) activando dos componentes: el primero, la estructura de rebose que es la encargada de evacuar el agua adicional en el momento en que el nivel del tanque sobrepasa el volumen de almacenamiento. El segundo elemento es la tubería conectada al sistema de alcantarillado que se utiliza para desalojar el exceso de agua acumulada y prevenir la saturación del agua para no afectar la operación del tanque (CIIA, 2017).</p>
Tanque subterráneo	<p>Este tipo de tanque posee un diseño más complejo, generalmente se ubica debajo de las grandes vías, fábricas de producción y es el encargado de recibir la escorrentía local de las vías, caminos y edificios del área de drenaje. Al igual que en el tanque superficial, en este diseño se observan bombas de succión y las tuberías de entrada, reúso, excesos y salida de agua. La estructura de almacenamiento suele formarse utilizando uno de los siguientes métodos (CIIA, 2017; CIRIA C753, 2015):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de almacenamiento geocelular • Estructuras de arco corrugado de plástico • Tubos de hormigón y plástico de gran tamaño • Tubos de acero corrugado • Tramos de alcantarilla y depósitos de hormigón prefabricado • Tanques de plástico reforzados con fibra de vidrio • Estructuras híbridas con muros de tierra reforzada y paneles de hormigón en la cubierta

Nota: Los tanques de almacenamiento superficiales son instalados por encima del suelo y en general se emplean para las viviendas residenciales, por lo cual, pueden ser prefabricados y de materiales plásticos. Los tanques de almacenamiento subterráneos son instalados bajo suelo, es decir, enterrados permitiendo su combinación con el entorno, como estacionamientos y parques en las ciudades.

6.2.5 *Ventajas y desventajas de los SUDS*

En la Tabla 7 se establecen las ventajas y las desventajas teóricas de cada SUDS, con el fin de proporcionar un panorama general de las propiedades que dispone cada uno.

Tabla 7

Ventajas y desventajas de la implementación de SUDS

Tipo de SUDS	Ventajas	Desventajas
Pavimentos permeables	<p>Reducen los picos de caudal disminuyendo el riesgo de inundación aguas abajo.</p> <p>Reducción de los efectos de la contaminación en el agua de escorrentía.</p> <p>Pueden ser usados en zonas de alta densidad poblacional.</p> <p>Gran flexibilidad en diseño y tipos.</p> <p>Permiten un doble uso del espacio, por lo que no es significativa su ocupación en suelo.</p> <p>Eliminan el encharcamiento superficial.</p>	<p>No pueden utilizarse donde haya arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos.</p> <p>Por ahora, no se usan en carreteras con tráfico elevado.</p> <p>A largo plazo, si no hay buen mantenimiento, existe riesgo de crecimiento de malas hierbas y de obstrucciones.</p> <p>Limitados a áreas con una tasa de infiltración según diseño.</p>
Techos verdes	<p>Útil para aplicar en zonas urbanizadas.</p> <p>No ocupan área adicional.</p> <p>Proporcionan aislamiento térmico y absorción acústica.</p> <p>Convierten áreas impermeables en espacios públicos.</p>	<p>Altos costos.</p> <p>La adaptación depende de la capacidad estructural de la edificación.</p> <p>Condiciones climáticas limitan el tiempo de vida de las plantas.</p>

Tipo de SUDS	Ventajas	Desventajas
Pozos y Zanjas de infiltración	<p>Atenúan de forma significativa el volumen de agua de escorrentía y el caudal pico.</p> <p>Se integran fácilmente en el paisaje.</p>	<p>Se pueden obstruir con facilidad, por lo que no se recomiendan localizarlos en suelos particulados finos (aquellos constituidos por limos o arcillas).</p> <p>Las acumulaciones de contaminantes y las obstrucciones son difíciles de ver.</p> <p>La tasa histórica de fracaso es alta debido a los mantenimientos deficientes, el mal emplazamiento o la presencia de grandes cantidades de desechos a la entrada.</p> <p>Limitados a pequeñas áreas drenantes.</p>
Depósitos de infiltración	<p>Reduce notablemente el volumen de escorrentía.</p> <p>Puede ser muy eficaz en la eliminación de contaminantes por filtración.</p> <p>Contribuye a la recarga de las aguas subterráneas y el aumento del flujo base.</p> <p>Sencillo y rentable de construir.</p> <p>Las variaciones en su rendimiento son fácilmente visibles.</p>	<p>Nivel de fracaso potencialmente alto debido a la inadecuada ubicación, mal diseño o la falta de mantenimiento, especialmente si no se incorpora un pretratamiento adecuado.</p> <p>Se necesitan estudios geotécnicos completos para confirmar la idoneidad para la infiltración.</p> <p>No son apropiados para el drenaje de zonas donde se concentran altas cargas de contaminantes en las aguas de escorrentía.</p> <p>Requieren de un área grande y plana.</p>
Drenes filtrantes	<p>Reducen los niveles de contaminantes en la escorrentía.</p> <p>Favorecen los procesos de absorción y biodegradación.</p>	<p>No son adecuadas en lugares inclinados.</p> <p>No son convenientes en lugares donde el agua entrante tenga una alta carga de contaminación y haya un acuífero cerca.</p> <p>No atenúan de forma significativa el volumen de agua de escorrentía ni el caudal pico.</p>

Tipo de SUDS	Ventajas	Desventajas
Cunetas verdes	<p>Útiles para pendientes pronunciadas. Protegen los cuerpos receptores de agua frente a eventos de extrema precipitación.</p> <p>Reducen la velocidad de flujo.</p> <p>Aumenta la remoción de sólidos en el sistema.</p>	<p>No es adecuado para zonas con altas pendientes.</p> <p>No es óptimo en las zonas de aparcamiento en carretera.</p> <p>Riesgos de bloqueos en la conexión de las tuberías.</p> <p>Limitadas a pequeñas áreas de drenaje.</p>
Franjas filtrantes	<p>Estimula la evaporación y puede promover la infiltración.</p> <p>Fácil de construir a bajo costo.</p> <p>Puede ser diseñado para proporcionar beneficios estéticos.</p>	<p>No hay reducción significativa de los flujos de eventos extremos.</p> <p>Es necesaria una gran área.</p> <p>No es adecuado para el drenaje de escorrentía o punto de acceso donde el riesgo de contaminación de aguas subterráneas es alto y se impide la infiltración.</p>
Zonas de bio-retención	<p>Beneficios en el manejo de escorrentía, calidad del agua y paisajismo.</p> <p>Pueden ser implementados en una gran variedad de espacios.</p> <p>Favorecen la creación del hábitat.</p> <p>Mejoran las condiciones visuales de las zonas o sitios en los que se encuentran ubicados.</p> <p>Alta eficiencia en la remoción de contaminantes.</p>	<p>Requieren un mantenimiento constante.</p> <p>Están limitadas a pequeñas áreas de drenaje.</p>
Alcorques	<p>Interceptan las precipitaciones.</p> <p>Permiten que el agua se evapore de la superficie de las hojas.</p> <p>Disipan la energía de la escorrentía de la lluvia.</p> <p>Facilitan la infiltración y la recarga de aguas subterráneas.</p> <p>Proporcionan sombra.</p> <p>Pueden reducir las temperaturas de escorrentía.</p> <p>Proporcionan beneficios de amenidad y biodiversidad.</p> <p>Puede ser utilizado como una estructura de pretratamiento para otras tipologías.</p>	<p>Bajo desempeño en zonas de pendientes muy altas o grandes áreas de drenaje.</p> <p>Limitados a pequeñas áreas de drenaje.</p> <p>Requieren constante mantenimiento.</p> <p>El tipo de árbol debe ser acorde a la capacidad y resistencia de la estructura.</p>

Tipo de SUDS	Ventajas	Desventajas
Tanques de almacenamiento	<p>Elevado volumen de almacenamiento. Su potencial para la instalación debajo de carreteras y aparcamientos, zonas de recreación y otros espacios públicos abiertos.</p> <p>Reduce el volumen de escorrentía a través del aprovechamiento de agua pluvial.</p> <p>Reduce los caudales picos de descarga.</p> <p>Promueve una fuente adicional de agua.</p>	<p>Su eficiencia en cuanto a la remoción de contaminantes está limitada al pretratamiento que se le dé antes del ingreso al tanque.</p> <p>Su desempeño está limitado por la cantidad de agua recolectada.</p>

Es relevante mencionar que todas las alternativas SUDS son sensibles y se ven afectadas directamente por el comportamiento de las comunidades donde se implementan, a causa de que estas alternativas no convencionales requieren de condiciones apropiadas de funcionamiento y de mantenimiento constante. Por lo cual, es importante crear en simultaneo medidas no estructurales para educar y controlar aspectos relacionados con el manejo de los residuos sólidos, zonas de implementación, prevención de daños, deterioro de la infraestructura, entre otros.

6.3 Descripción del modelo SWMM

El Storm Water Management Model (modelo de gestión de aguas pluviales) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que busca modelar el comportamiento del sistema de almacenamiento temporal, es empleado para el análisis del drenaje urbano, diseño y dimensionamiento de la red de alcantarillado, el diseño del control de inundaciones pluviales, la evaluación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), entre otros. Además, ayuda a simular la escorrentía y las cargas contaminantes sobre las subcuencas y posteriormente transportar el flujo por la red en régimen no permanente hasta el punto de salida (Rey, 2019; Rossman, 2015).

SWMM conceptualiza el sistema de drenaje urbano por diferentes capas que transportan el flujo entre ellas. La primera capa es la atmosférica que ingresa con la capa de terreno recibiendo la precipitación, esta capa calcula las pérdidas de precipitación, de las cuales las pérdidas por infiltración se envían a la capa de aguas subterráneas y la escorrentía se envía a la capa de transporte; por último la capa de transporte puede recibir también la capa de aguas subterráneas, caudales de aguas residuales o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario (Rey, 2019).

El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas, en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores.

Así mismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal durante la simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo. La versatilidad de este modelo de simulación y su condición de libre distribución y código abierto le ha permitido convertirse en uno de los más empleados en muchos países, como Estados Unidos, Canadá, Australia y en Europa, con el fin de abordar numerosos estudios centrados en el análisis de la problemática de la cantidad y la calidad de agua (G. Martínez, 2013).

6.4 Marco jurídico

La Tabla 8 muestra la recopilación de los decretos, resoluciones y normas a nivel nacional aplicables al diseño y la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS en Colombia.

Tabla 8

Legislación nacional para la implementación de SUDS

Normativa	Descripción
Artículo 79 - Constitución política de Colombia	“Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectar. 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”.
Artículo 80 – Constitución política de Colombia	“El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”.
Resolución 0799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por medio de esta se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, en el cual se resalta el Artículo 44 que modifica el artículo 153 de la Resolución 0330 de 2017, el cual establece que “Para nuevos desarrollos urbanos, donde se modifique la cobertura del suelo, se deben generar estrategias con el fin de mitigar el efecto de la impermeabilización de las áreas en el aumento de los caudales de escorrentía. Se requiere diseñar sistemas urbanos de drenaje sostenible, con el objeto de reducir mínimo en un 30% el caudal pico del hidrograma de creciente de diseño, a fin de evitar sobrecargas de los sistemas pluviales y posteriores de inundación, para ello, adicionalmente, se debe hacer un análisis de las condiciones de escorrentía antes y después del proyecto versus la capacidad del flujo de los cuerpos receptores, ya sea el sistema de alcantarillado de drenaje o cuerpos naturales. Cuando se utilicen estructuras de retención, se deben implementar sistemas de cribado y sedimentación, prever la facilidad del mantenimiento manual o mecánico, la accesibilidad y medios para transportar los desechos a los sitios finales de disposición, de acuerdo con su composición y la normatividad vigente”.

7 Metodología

7.1 Tipo de investigación

La investigación contempló el uso de variables cuantitativas, analizadas a través del uso de herramientas propias de los sistemas de información geográfica (SIG) y software de modelación hidráulica (SWMM), con el fin de identificar el cambio que sufrieron dichas variables en los diferentes escenarios planteados. Esta investigación se enmarca como correlacional (Hernández et al., 2014), debido a que el estudio tuvo como finalidad determinar la relación que existe entre la implementación de los SUDS y el adecuado funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenaje existentes en la cuenca urbana seleccionada de la ciudad de Manizales, en procura de la reducción de los volúmenes de agua de escorrentía superficial de las edificaciones urbanas y cumpliendo con la normatividad vigente, además, de contribuir con la disminución del desbordamiento del agua pluvial del sistema de drenaje y evitar posibles inundaciones.

De acuerdo con el enfoque del tipo de investigación propuesto, la unidad de análisis hizo referencia a las edificaciones existentes y terrenos naturales pertenecientes a la cuenca objeto de estudio dado que: 1) es una unidad mínima fundamental donde es posible observar múltiples aspectos relacionados con las subcuencas y los sistemas colectores de agua pluvial; 2) ofrece la posibilidad de asociar la información espacial con la construcción del modelo hidrodinámico, permitiendo crear una base de datos de fácil manejo, modificable y exportable.

En cuanto a la población objetivo esta fue definida por la totalidad de las edificaciones, las vías y las zonas naturales de la cuenca urbana seleccionada. Además, en términos de las técnicas que se emplearon para levantar la información de manera secundaria y acotarlas al área de influencia, la población objeto de estudio se convirtió en una unidad de observación básica,

para la obtención de planos topográficos, usos de suelo, planos urbanísticos, catastros, datos climatológicos, eventos de inundación, entre otros.

7.2 Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación utilizadas incluyeron la recopilación y análisis de datos secundarios, fundamentadas en información disponible recolectada por otras personas y organizaciones públicas o privadas. Lo anterior, permitió seleccionar la cuenca urbana objeto de estudio, identificar el sistema de drenaje actual y realizar la modelación hidrodinámica de la condición existente por medio de SWMM, definir las propuestas de uso de SUDS y validar las alternativas planteadas (modelación hidráulica SWMM). Por lo tanto, la información recolectada fue de tipo:

Histórica: Información asociada con impermeabilización del suelo natural, eventos de inundación y fallas del sistema de drenaje actual.

Topográfica: Información topográfica existente, relacionada con modelos digitales de elevación, curvas de nivel y planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Urbanística: Información referente a mapas de divisiones político-administrativas de los barrios, comunas y perímetro urbano, mapas de uso del suelo y coberturas de la ciudad y mapas de las edificaciones existentes, incluyendo zonas blandas (Alcaldía de Manizales, Empresa Aguas de Manizales y Universidad Nacional de Colombia sede Manizales).

Catastros: Catastros de las redes de la Empresa de Servicios Públicos de la ciudad de Manizales E.S.P., (Empresa Aguas de Manizales).

Climatológica: Series de precipitaciones y de caudal de las estaciones ubicadas en el área urbana de la ciudad de Manizales y dentro de la cuenca de estudio. Se consultó principalmente el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de

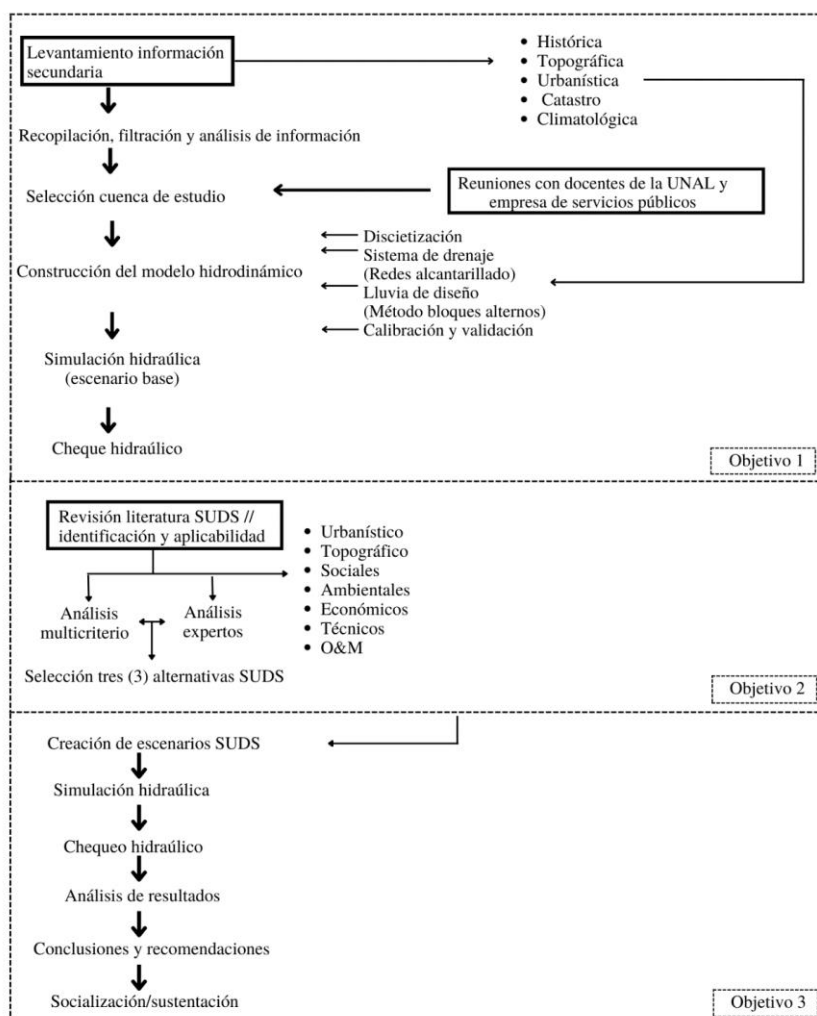
Colombia sede Manizales; Y en el SIMAC (Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas), el cual es manejado, operado y coordinado por este instituto.

7.3 Flujograma metodológico

Este diagrama muestra el resumen de la metodología propuesta en este proyecto de investigación, con el fin de entender la secuencia seguida a lo largo del proceso para cumplir con los objetivos definidos, el cual se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Flujograma metodológico



7.4 Área de estudio

En el desarrollo de la investigación se escogió el área de estudio y se tuvieron en cuenta para este fin diferentes criterios, entre ellos que en la zona elegida no se hayan realizado o se estén ejecutando investigaciones similares a la propuesta para contribuir y abarcar diferentes lugares de la ciudad de Manizales. También, se tuvo en cuenta el acceso a la información relacionada con la topografía, climatología y catastros de redes, para ello se involucró diferentes sectores con la participación de algunos docentes de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y personal de la empresa de servicios públicos del municipio. Finalmente, de acuerdo con los registros obtenidos se seleccionó un sector hidráulico definido y delimitado por Aguas de Manizales, el cual se trata de la subcuenca urbana de la quebrada El Triunfo, ubicado en la Cuenca Olivares de la ciudad de Manizales Caldas – Colombia (Ver Figura 16):

Figura 16

Zona noroeste de la cuenca Olivares (zona de estudio)

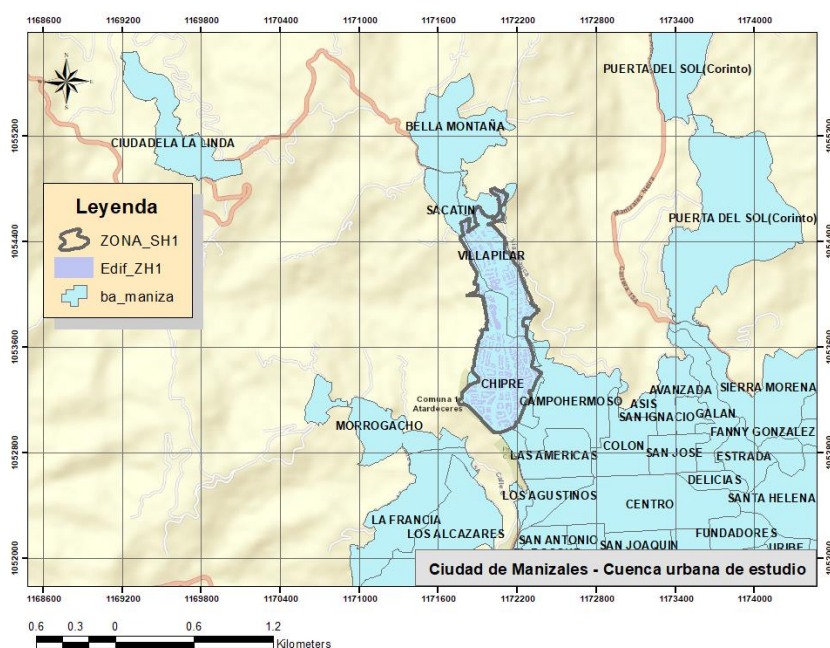


Nota: Adaptado de Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (UNAL), 2018.

La cuenca seleccionada se localiza en la cordillera central de la región Andina de Colombia, en la parte noroeste del casco urbano del municipio de Manizales (ver Figura 17). Cuenta con un área aproximada de 60.32 hectáreas, donde el agua de escorrentía pluvial descarga a la quebrada El Triunfo a través del alcantarillado existente y está conformada por los barrios Chipre, Villa Pilar y una pequeña parte de Sacatín, también limitando en gran parte con una franja natural que no realiza aportes de agua de escorrentía y el barrio Campohermoso.

Figura 17

Cuenca urbana de estudio



7.5 Construcción del modelo hidrodinámico

7.5.1 Discretización

Inicialmente, se tuvo en cuenta la información recolectada anteriormente relacionada con catastro de redes, imágenes satelitales y curvas de nivel, los cuales se combinaron con los

sistemas de información geográfica (Global Mapper y Arcgis versiones académicas y de prueba gratuita) para procesar y tratar la información (creación de base de datos SIG), permitiendo no solamente delimitar manualmente las subcuencas del área de estudio, sino obtener datos relevantes para el modelo hidrodinámico relacionados con áreas, anchos, pendientes y zonas permeables e impermeables, además de estimar parámetros necesarios para el modelo.

Las subcuencas de la zona de estudio se definieron teniendo en cuenta lo siguiente: 1) se diferenció entre edificaciones, vías y zonas blandas; 2) se delimitó a partir de la red de drenaje pluvial (sumideros y cámaras de inspección) y las direcciones de flujo superficial, de tal manera que la escorrentía del área seleccionada se dirija a la cámara de inspección más cercana aguas abajo; 3) se delimitó en lo posible subcuencas uniformes; 4) Se trató en lo posible no combinar grandes zonas blandas con duras. En el anexo 13.1.1 se presenta el esquema de conexión de las diferentes fases realizadas para la obtención de la capa terreno del modelo hidrodinámico.

7.5.2 Sistema de drenaje pluvial

El sistema de drenaje pluvial se obtuvo a partir del catastro suministrado por Aguas de Manizales, donde se identificó anomalías y se efectuó los ajustes pertinentes. Para los colectores se revisaron las características de las tuberías relacionadas con material, longitud, diámetro, nombres (ID) y desnivel de conexión de cámaras de entrada y salida del tramo (tubería o alcantarilla). Para las cámaras de inspección se revisaron los valores de cotas terreno (rasante) y fondo (bateas) existentes en los atributos de las capas entregadas del catastro. En el anexo 13.1.2 se presenta el esquema de conexión de las diferentes fases realizadas para la obtención de la capa de transporte del modelo hidrodinámico.

7.5.3 Datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño

Inicialmente se identificaron las estaciones cercanas a la zona de estudio y se solicitó la información a las entidades pertinentes (Instituto de Estudios Ambientales - IDEA de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas - SIMAC), una vez obtenidos los registros se revisaron y analizaron los datos suministrados teniendo en cuenta la validez y calidad de estos. Finalmente, se descartaron las series con información faltantes y se procesaron los datos obtenidos.

Se seleccionaron seis estaciones de monitoreo en la zona de interés distribuidas a sus alrededores (ver Figura 18), donde dos de estas se encuentran ubicadas dentro de la cuenca, en la parte baja y alta de la zona, la primera corresponde a una hidrometeorológica (quebrada El Triunfo) y la segunda es una meteorológica (Observatorio Vulcanológico y Sismológico Manizales – Barrio Chipre). En la Tabla 9 se muestran datos descriptivos de las estaciones de influencia de la zona.

Tabla 9

Estaciones de interés para el área de estudio

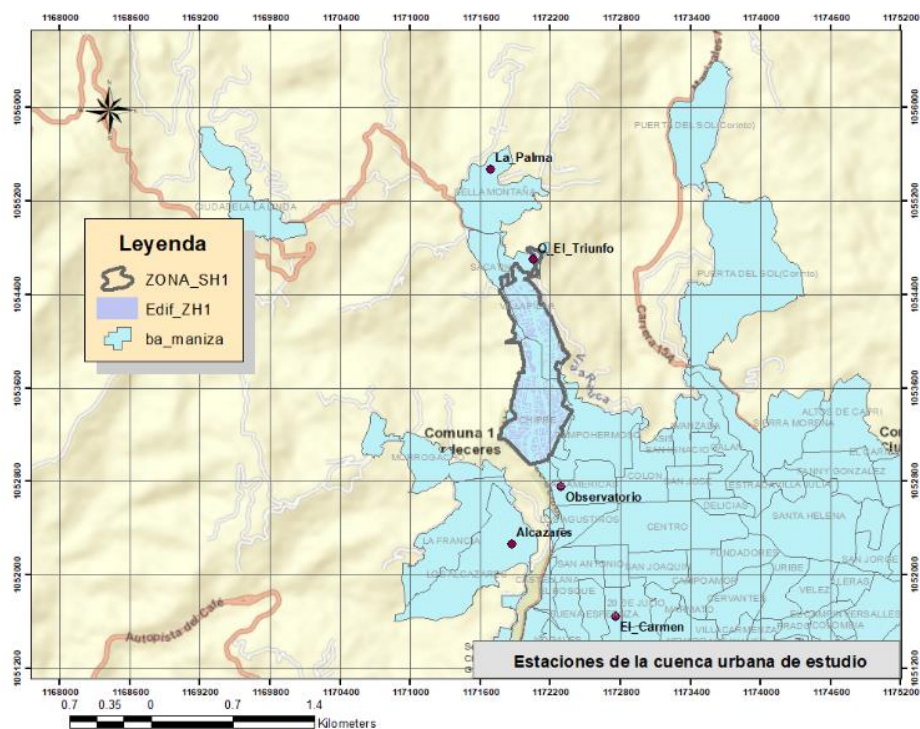
Estación	Código	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Ubicación
La palma	170010101010	M	5°5'45,4''	75°31'46,0''	1967	Hospital Geriátrico San Isidro
Alcázares	170010101013	M	5°3'60,0''	75°31'40,1''	2057	Instituto de Valoración de Manizales - INVAMA
El Carmen	170010101007	M	5°3'41,4''	75°31'11,2''	2112	Centro Integral de Servicios Comunitarios- El Carmen

Estación	Código	Tipo	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Ubicación
Liceo La Católica	170010301018	M	5°4'5,3''	75°30'38,3''	2150	Colegio Isabel La Católica Observatorio Vulcanológico y Sismológico Manizales - Barrio Chipre Conjunto Cerrado
Observatorio Vulcanológico	170010101004	M	5°4'17,2''	75°31'27,5''	2226	Mirador de Villa Pilar - Barrio Villa Pilar
Q. El Triunfo	100010302050	H	5°5'20,9''	75°31'34,3''	2046	

Nota: M: Meteorológica, H: Hidrometeorológica.

Figura 18

Estaciones cercanas a la cuenca de estudio



Para la calibración del modelo se tuvieron en cuenta los eventos de lluvia, los cuales se seleccionaron a partir de las isoyetas generadas y clasificación de los eventos de precipitación registrados en la estación y definidas por su mayor influencia en el área de estudio de acuerdo con lo establecido por (Linsley et al., 1977). Además, se identificaron los eventos mayores o iguales a 30 min, se eligieron las lluvias clasificadas como fuertes o moderadas y se verificó que los eventos seleccionados de la estación de lluvia coincidieran simultáneamente con eventos de la estación de caudal. Finalmente se seleccionaron los eventos para calibrar y validar.

La lluvia de diseño se realizó con el método de bloques alternos, utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia IDF. El hidrograma de diseño producido especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempos sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n\Delta t$ (Te Chow et al., 1994).

La curva IDF empleada es la correspondiente a la estación Agronómica Cenicafé (Pareja & Osorio, 1997), la cual se muestra a continuación en la Ecuación 1:

Ecuación 1

$$i = \frac{3.896 * T^{0,154}}{(t + 25)^{1,02}}$$

Donde:

I: Intensidad de la lluvia (mm/hr)

T: Periodo de retorno (años)

t: Tiempo de concentración (min)

La lluvia de diseño se estimó para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. El tiempo de duración de la lluvia se calculó a partir del uso de la mayor cantidad de ecuaciones empíricas, como se recomienda para pequeñas cuencas de montaña en la zona andina (Vélez &

Botero, 2010). En el anexo 13.1.3 se presenta el esquema de conexión de las diferentes fases realizadas para la obtención de la capa atmosférica del modelo hidrodinámico y la estimación y selección de los tiempos de concentración.

7.5.4 Calibración y validación

Con base en los eventos de lluvia seleccionados se procedió a realizar la calibración del modelo hidrodinámico mediante un proceso de ajuste manual de parámetros, donde se definió una función objetivo (eficiencia de Nash-Sutcliffe) que permitió estimar la incertidumbre de las series de caudales simulados respecto a los observados (Nash & Sutcliffe, 1970). El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología, mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación y se define como (ver Ecuación 2):

Ecuación 2

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

$Q_{sim,i}$: Caudal simulado

Q_i : Caudal observado

\bar{Q} : Caudal observado promedio

Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 10:

Tabla 10

Valores referenciales del criterio de Nash - Sutcliffe

E	Ajuste
<0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Nota: Adaptado de Molnar, 2011.

La calibración se realizó a partir de lo siguiente: 1) Se creó el modelo hidrodinámico (montaje en SWMM); 2) Se identificó las variables y parámetros iniciales a modificar; 3) Se ingresaron los datos; 4) Se corrió el modelo (simulación hidráulica); 5) Se realizó el análisis de sensibilidad; 6) Se realizó la comparación visual de hidrograma simulado con real; 6) Se estimó la eficiencia de Nash-Sutcliffe; 7) Se calibró; 8) Se validó.

En el anexo 13.1.4 se presenta el esquema de conexión de las diferentes fases realizadas en el ajuste del modelo, calibración y validación.

7.6 Evaluación de alternativas SUDS

A partir de la identificación de atributos morfométricos de la cuenca de estudio y caracterización detallada de la red de drenaje y utilizando el método AHP se realizó la valoración e identificación de uso de alternativas de SUDS.

El proceso de decisión para la selección de alternativas SUDS se desarrolló gracias a la colaboración de un panel de expertos junto con la valoración subjetiva de criterios y alternativas guiados por el Proceso Analítico Jerárquico, conocido por sus siglas en inglés como AHP, el cual tiene como objetivo principal priorizar alternativas. Una de las características principales de las metodologías multicriterio es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación y la particularidad de cada metodología multicriterio está en la forma de transformar las percepciones en una escala con el fin de poder comparar los elementos y establecer ordenes de prioridad como lo nombra Vidal et al., (2012).

7.6.1 Proceso analítico jerárquico (AHP)

Para la aplicación de la técnica AHP se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

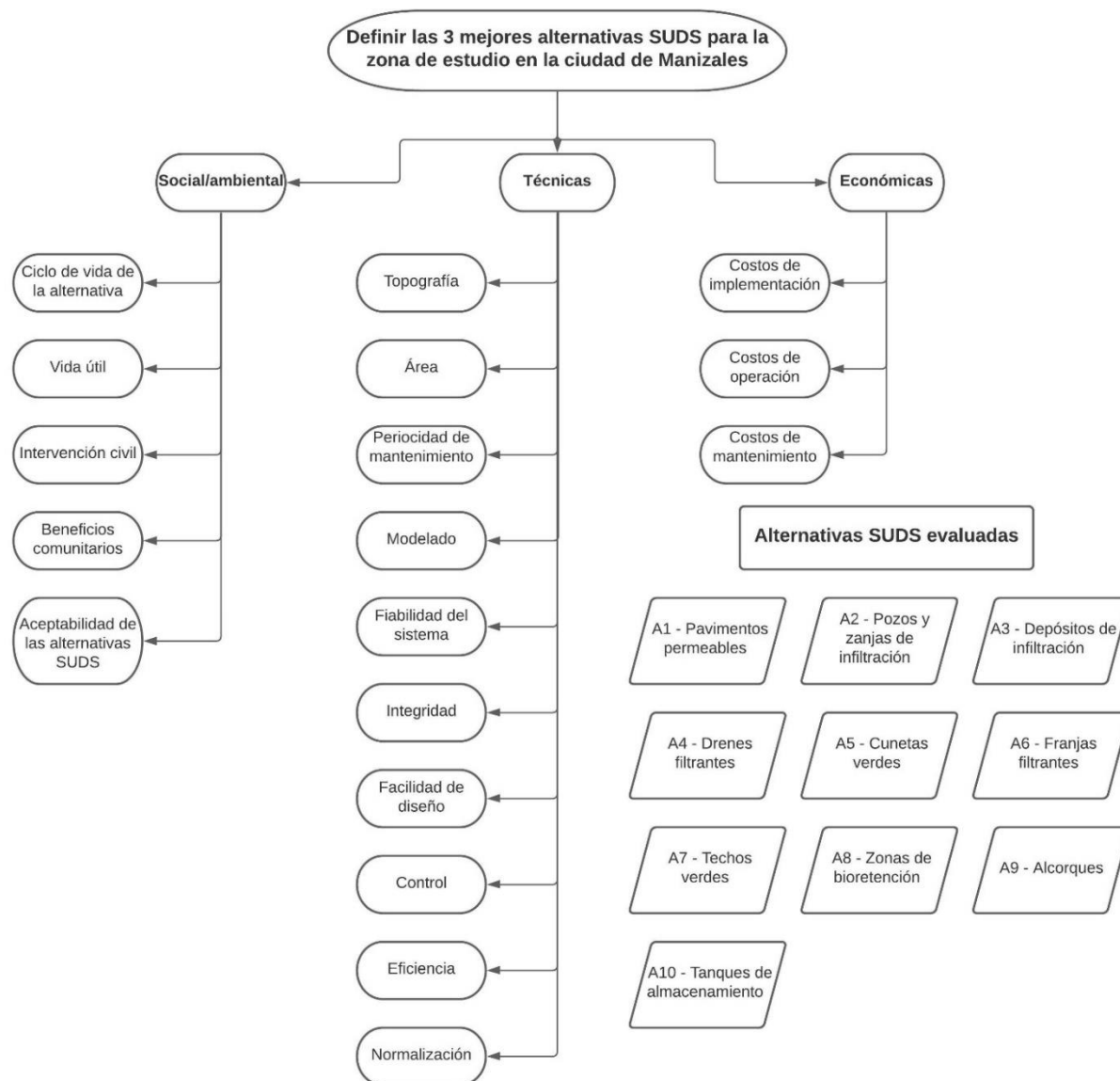
- Una lista de alternativas que se deseaba comparar obtenidas de diversas fuentes bibliográficas (ver anexos 13.2).
- Un conjunto de criterios, cualitativos y/o cuantitativos, con los cuales se buscó valorar o medir cada una de las alternativas (ver anexos 13.2)
- Un objetivo que reflejara el propósito y el alcance de la priorización.

Proceso jerárquico

Se estructuró el problema planteado en una jerarquía de criterios y alternativas, como se puede apreciar en la Figura 19.

Figura 19

Modelo de jerarquía



La Figura 19 presenta en primera instancia los tres criterios primarios o generales previamente definidos de acuerdo con diferentes revisiones bibliográficas, los cuales se componen de socioambientales, técnicos y económicos. Posteriormente, se dividió cada uno de

los criterios determinados en la etapa anterior hasta llegar a un nivel de especificación que permitiera el análisis y la comparación de las alternativas.

Priorización de criterios

Con un panel de expertos se realizó una comparación de criterios por pares, apoyados en la matriz de comparación presentada en la Figura 20, donde cada recuadro de la matriz se encontraba asociado a la comparación de un par de criterios.

Figura 20

Matriz par de comparación de criterios

	C1	C2	C..	.	Cn
C1					
C2					
.					
Cn					

Nota: Adaptado de Vidal et al., 2012.

La comparación de los criterios se efectuó de acuerdo con la escala de Saaty presentada en la Tabla 11.

Tabla 11

Escala de comparación de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	Igual importancia
3	Ligeramente más importante
5	Mucho más importante
7	Fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante

Nota: Adaptado de Vidal et al., 2012.

Una vez evaluado cada criterio se procedió a construir una matriz normalizada, donde cada elemento era igual al valor de la matriz de comparación, dividido entre el valor de la suma de los elementos de su columna correspondiente. Finalmente, el vector prioridad se obtuvo del promedio de las filas de la matriz normalizada.

Índice de consistencia

Para la identificación de inconsistencias se utilizó el indicador propuesto por Saaty (Ver Ecuación 3) presentado en Vidal et al., (2012), el cual tiene como función medir problemas de consistencia o incumplimiento del principio de transitividad partiendo de las matrices de comparación. Si el cociente de consistencia es mayor a 0.1, se concluye que la matriz analizada es inconsistente, por lo tanto, el vector prioridad obtenido no será válido.

Ecuación 3

$$C.C = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{1 - n} IA$$

Donde,

$C.C$: cociente de consistencia

$\lambda_{m\acute{a}x}$: máximo valor propio de la matriz de comparación

n : número de elementos a comparar

IA : índice aleatorio asociado a cada valor “n”

El cálculo de $\lambda_{m\acute{a}x}$ se efectuó multiplicando cada elemento del vector prioridad por su correspondiente suma de columna en la matriz de comparación y sumando los términos.

El índice aleatorio se obtuvo de acuerdo con los valores obtenidos por Silvia & Villegas, (2011) y consignados en la Tabla 12:

Tabla 12*Índice de aleatoriedad*

Número de elementos a comparar	Índice aleatorio (IA)
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Nota: Adaptado de Silvia & Villegas, 2011.

Calculo promedio de matrices de comparación

Como resultado de cada matriz realizada por los expertos y haciendo uso de la media aritmética (ver Ecuación 4) se procedió a realizar una única matriz agrupando todas las opiniones y valores obtenidos.

Ecuación 4

$$Media\ aritmética = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde,

n : número de elementos

x_i : valoraciones brindadas por los expertos

Selección de alternativas

Con el vector prioridad de los criterios obtenidos y la calificación de cada alternativa evaluada (que para este estudio fueron seleccionadas 10 alternativas) se obtuvo la prioridad de

cada una de las alternativas mediante la construcción de una matriz final como se presenta a continuación (ver Figura 21):

Figura 21

Priorización general de alternativas

Vector prioridad		C1	C2	C3	
Rotulo	%				
C1	15	A1	0.45	1.6	0.45
C2	40	A2	0.375	2	1.35
C3	45	A4	0.255	0.88	1.8
		An	--	--	--

La calificación de cada alternativa respecto a los criterios propuestos se realizó mediante el uso de una escala de valoración numérica del 1 al 5, donde 1 es deficiente y 5 es muy bueno. Seguidamente, la prioridad general resultó de la multiplicación de la matriz conformada por los vectores de prioridad de alternativas, con el vector de prioridad de criterios.

7.7 Implementación de alternativas SUDS

Para la implementación y validación de las alternativas SUDS se tuvo en cuenta principalmente la simulación base, donde se identificó los tramos críticos relacionados con el funcionamiento inadecuado del sistema de alcantarillado existente. Además, la elección del tramo para la implementación de las alternativas SUDS se seleccionó a partir de los siguientes parámetros: posibilidad de aplicación (espacio disponible y control en sitio o local), cámaras y conductos con sobrecargas (inundación) y zonas con superficies adecuadas (pendientes < 10%).

Así, las alternativas SUDS propuestas se incorporaron al modelo SWMM con la finalidad de realizar diferentes simulaciones hidráulicas que permitieron contrastar los resultados hidráulicos obtenidos con los de la simulación base y con ello verificar si efectivamente la

aplicación de los SUDS mitiga en cierto grado las inundaciones. De igual manera, se validó si las alternativas propuestas tienen la capacidad de mitigar el caudal pico por lo menos un 30%, de acuerdo con lo establecido en la normatividad vigente y así poder aplicarlas en nuevos proyectos urbanísticos, con el fin de contribuir al óptimo funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenaje existentes que han sido afectados por la impermeabilización de su suelo natural, debido al desarrollo urbano y las precipitaciones más severas.

En el anexo 13.3 se presenta el esquema de conexión de las diferentes fases realizadas para la implementación de las alternativas SUDS y el dimensionamiento preliminar de estas.

8 Análisis de resultados

8.1 Diagnóstico preliminar cuenca de estudio

En el lugar se han reportado catorce inundaciones desde el año 1953 hasta el año 2019, donde los barrios Chipre y Villa Pilar han sufrido entre seis y siete inundaciones respectivamente. Además, se identificó que el mismo evento puede causar inundación simultáneamente en los barrios, como es el caso del evento ocurrido el 2/10/1985, 30/03/2018 y 10/04/2019. En la Tabla 13 se muestran los datos registrados de las inundaciones.

Tabla 13

Registro de inundaciones en la cuenca experimental urbana por barrio

Fecha	Sector
28/11/1953 ^a	Chipre
3/04/1968 ^a	Chipre
2/10/1985 ^a	Chipre
2/10/1985 ^a	Villa Pilar
2/10/1985 ^a	Sacatín
15/10/1986 ^a	Chipre
16/01/2009 ^a	Villa Pilar
30/04/2016 ^a	Villa Pilar
1/03/2017 ^b	Villa Pilar
27/12/2017 ^c	Villa Pilar
30/03/2018 ^d	Chipre
30/03/2018 ^d	Villa Pilar
10/04/2019 ^e	Villa Pilar
10/04/2019 ^f	Chipre

Nota: Adaptado de Rey, 2019; b. La Patria, 2017; c. La Patria, 2017; d. BC Noticias, 2018; e. BC Noticias, 2019; f. Caldas al día, 2019.

8.2 Modelación hidrodinámica SWMM

8.2.1 Topografía

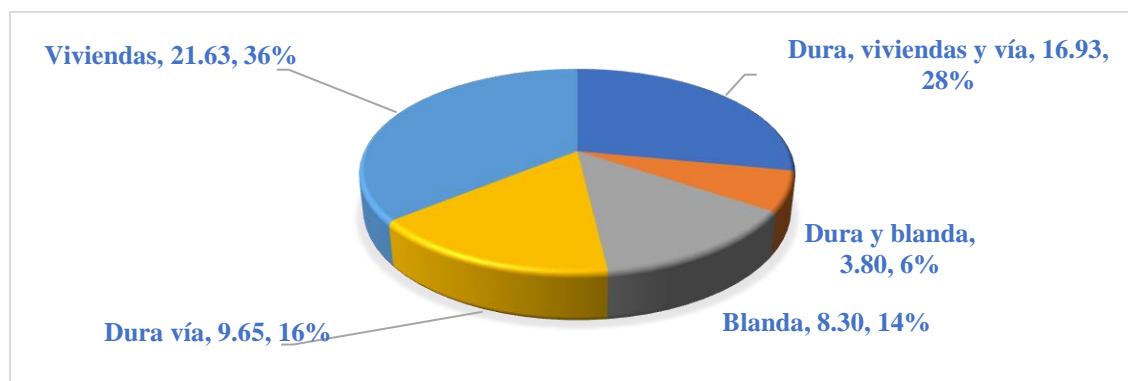
A partir de la información de curvas de nivel cada dos metros suministrada por la empresa de servicios públicos Aguas de Manizales y los resultados del modelo de elevación digital (DEM) construido, se permitió definir las pendientes promedio de las subcuencas en porcentaje, donde el rango oscila entre 7.58 y 2.59%. Asimismo, por medio del DEM se crearon los sentidos de flujo de la escorrentía que contribuyeron en la delimitación manual de las subcuencas.

8.2.2 Discretización

Se obtuvieron en total 610 subcuencas con áreas comprendidas entre 1.28 y 0.002 hectáreas, demarcando viviendas, separadores, vías, andenes y zonas verdes. A partir de las subcuencas se determinó que en la zona predominan las construcciones urbanas, alcanzando las superficies duras un 80%, comprendiendo principalmente vías y viviendas como se detalla en la Figura 22.

Figura 22

Áreas aferentes de la zona de estudio



Nota: Las áreas aferentes hacen referencia al tipo de cobertura presente en el suelo, es decir, qué grado de impermeabilidad presenta. Además, se muestra el porcentaje de cada tipo de cobertura.

Con la discretización anterior y teniendo en cuenta que la cuenca está significativamente urbanizada se definieron las propiedades del modelo referentes al suelo, con el fin de obtener la capa terreno.

8.2.3 Porcentaje de impermeabilización

Se definió a partir de las áreas aferentes, donde los valores iniciales del modelo fueron para zonas duras de viviendas y vías 90%, para zonas blandas y duras 50% y para zonas blandas no se consideró porcentaje impermeabilizado.

- **Coefficiente de Manning**

De acuerdo con la literatura, se determinaron para las zonas permeables e impermeables siguiendo los coeficientes iniciales de Manning presentados en la Tabla 14.

Tabla 14

Coefficientes de Manning para áreas permeables e impermeables

Uso del suelo	Coefficiente de rugosidad de Manning
Área impermeable	0.011 ^a
Asfalto	0.011 ^b
Matorrales	0.055 ^a
Pasto natural	0.130 ^b

Nota: a. (USDA-ARS, 2008, como se citó en Rey, 2019), b. EPA, 2005, 2015.

- **Almacenamiento en depresión**

Los almacenamientos en depresión inicial se establecieron de acuerdo con lo encontrado en la literatura y presentados en la Tabla 15.

Tabla 15

Almacenamiento en depresión para áreas permeables e impermeables

Uso del suelo	Almacenamiento en depresión (mm)
Superficie impermeable	1.25
Césped e hierba	2.50
Pasto y prados	5.00

Nota: Adaptado de EPA ,2005; 2015.

- **Número de curva**

Utilizando el método de número de curva se determinaron los valores de infiltración, definiendo para la zona una condición de humedad antecedente promedio AMC II y clasificado en el grupo C al ser una zona urbana muy impermeabilizada, donde los valores asignados inicialmente fueron de 98 para las áreas impermeables, 84 y 80 para zonas permeables como los espacios abiertos, entre ellos, los prados y parques (INVIAS, 2009).

- **Ancho de las subcuencas**

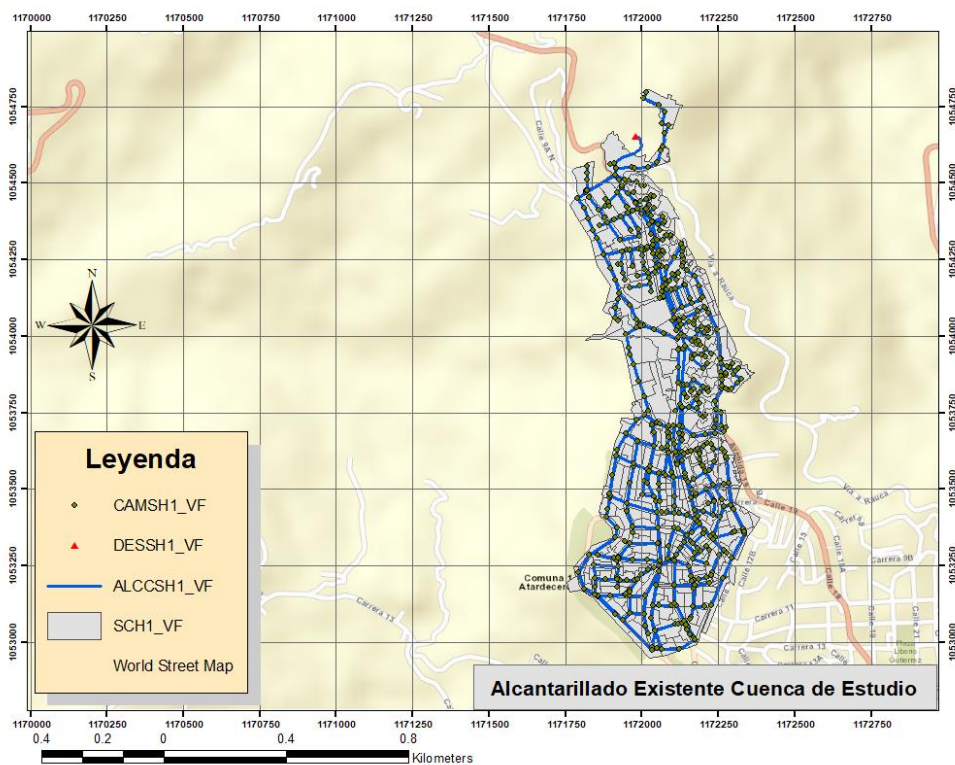
Se determinó a partir del área de las subcuencas, dividiendo estas por la distancia máxima de flujo superficial, considerando la longitud máxima como el punto más alejado de la descarga y la propia descarga (EPA, 2005), donde los valores se encuentran entre 144.22 y 0.31 m.

- **Sistema de drenaje**

Las redes del alcantarillado existentes fueron suministradas por la empresa de servicios públicos Aguas de Manizales, donde se analizó y verificó información relacionada con sumideros, cámaras de inspección, descole y colectores. El drenaje final discretizado se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Alcantarillado existente



En la Tabla 16 se muestra las características del tipo de material y longitud del sistema de alcantarillado existente. El sistema de drenaje presenta un total de tubería de 17458.58 m, donde el 11.33% corresponde a material tipo PVC y el 88.67% a concreto/hormigón.

Tabla 16

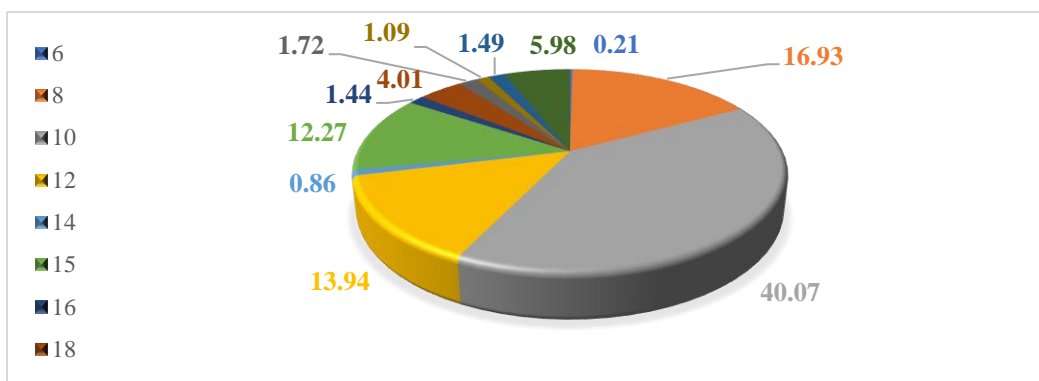
Características de material y longitud del alcantarillado

Material	Tipo	Longitud (m)
PVC	Tubería	1977.58
Concreto	Tubería	15481
Concreto	Box Culvert	190.22
Total		17648.8

Los diámetros de tubería instalados oscilan entre 6 y 36” como se muestra en la Figura 24, además se detalla la relación existente entre longitudes de tubería y su diámetro. La tubería que más se ha implementado es la de 10”, abarcando un 40.07% del total. La tubería menos instalada es la de 6”, donde es importante aclarar que no se tuvieron en cuenta acometidas.

Figura 24

Porcentaje de tubería respecto a su diámetro expresado en pulgadas

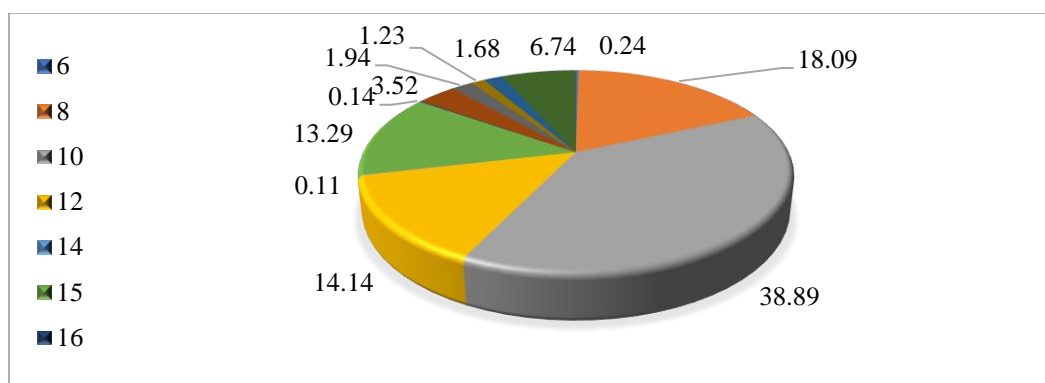


Nota: Se muestra el rango de diámetros presentes en el sistema de drenaje.

En las Figura 25 se muestran los porcentajes de tubería instalados respecto a su diámetro y material en concreto/hormigón, siguiendo la tendencia de que la tubería de 10” es la más instalada y en este caso la que menos se ha instalado es la de 14”.

Figura 25

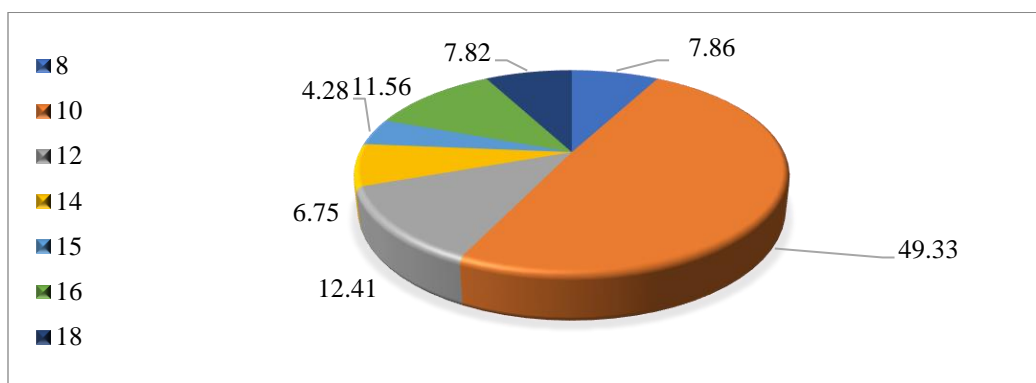
Porcentaje de tubería en concreto respecto a su diámetro



En las Figura 26 se muestran los porcentajes de tubería instalados respecto a su diámetro y material PVC, siguiendo la tendencia de que la tubería de 10” es la más instalada y la que menos se ha instalado es la de 15”. En este caso los diámetros de tubería oscilan entre 8 y 18”.

Figura 26

Porcentaje de tubería PVC respecto a su diámetro



En cuanto a las cámaras de inspección, se identificaron que las profundidades de instalación de tubería oscilan entre 0.6 y 15.1 m, donde el 94.23% de las cámaras se encuentran enterradas a una profundidad mayor a 1.2 m. En la Tabla 17 se muestran diferentes rangos de enterramiento de los pozos.

Tabla 17

Rangos de profundidad de las cámaras de inspección

Profundidad	N° de pozos	%
< 1,2	32	5.77
1,2 - 2	237	42.70
2 - 3	211	38.02
3 - 4	43	7.75
4 - 5	19	3.42
< 5	13	2.34

8.3 Datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño

De las seis estaciones identificadas se seleccionaron cinco para su posterior análisis (se descartó la estación Liceo La Católica porque no registró información para los años 2016 y 2017), el análisis de la información inició desde el año 2015 hasta el 2021, con el fin de que todas las estaciones comenzaran en el mismo periodo de tiempo (la estación El Triunfo se instaló en el año 2015). En la Tabla 18 se muestran los registros correspondientes a cada año.

Tabla 18

Registro de datos faltantes

Estación	Año							Datos faltantes
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Observación
La Palma	I ¹	C	C	C	I ²	C	C ²	1. Registros desde el día 2 hasta el 31 de junio. 2. Todo noviembre y diciembre; Registros desde el día 29 hasta el 31 de octubre.
Alcázares	C	I ¹	C	I ²	I ³	I ⁴	I ⁵	1. Registros desde el día 2 hasta el 31 de junio. 2. Registros desde el día 1 hasta el 12 de septiembre. 3. Todo noviembre y diciembre; Registros desde el día 29 hasta el 31 de octubre. 4. Registro el día 1 de enero; Registros desde el día 1 hasta el 9 de junio; Registros desde el día 6 hasta el 13 y del 15 hasta el 17 de noviembre; Registros desde el día 13 hasta el 17 de diciembre. 5. Registros desde el día 28 hasta el 31 de octubre; Todo noviembre y diciembre.
El Carmen	C	C	C	C	I ¹	I ²		1. Todo noviembre y diciembre; Registros desde el día 29 hasta el 31 de octubre. 2. Registro el día 1 de enero.
Liceo La Católica	I ¹	I ²	I ²	I ³	C	I ⁴	I ⁵	1. Registros desde el día 2 de febrero hasta el día 18 de noviembre. 2. Todo el año. 3. Registros desde el día 1 de enero hasta el día 26 de junio. 4. Registros desde el día 22 de junio hasta el 1 de julio.

Estación	Año							Datos faltantes
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Observación
								5. Registros desde el día 4 hasta el 26 de septiembre.
Observatorio Vulcanológico	C	C	I ¹	C	I ²	I ³	C	1. Registros desde el día 2 hasta el 31 de junio. 2. Todo noviembre y diciembre; Registros desde el día 29 hasta el 31 de octubre. 3. Registros del día 1 de enero; Registros desde el día 6 hasta el 13 y del 15 al 17 de noviembre; Registros desde el día 6 hasta el 13 y del 15 hasta el 17 de noviembre; Registros desde el día 13 hasta el 17 de diciembre.
Q El Triunfo	I ¹	C	I ²	C	I ³	C	I ⁴	1. Se registra datos a partir del 13 de mayo. 2. Registros del día 26 y 27 de marzo; Registros del día 3 y 4 de marzo; Registros del día 3 y 4 de octubre. 3. Registros desde el día 16 hasta el 20 y del 25 al 28 de febrero; Registros desde el día 1 hasta el 13 de marzo; Registro del día 9 de junio. 4. Registros desde el día 6 de agosto hasta el 2 de septiembre; Registros del día 14 de septiembre; Registros desde el día 26 hasta el 30 de septiembre; Todo diciembre.

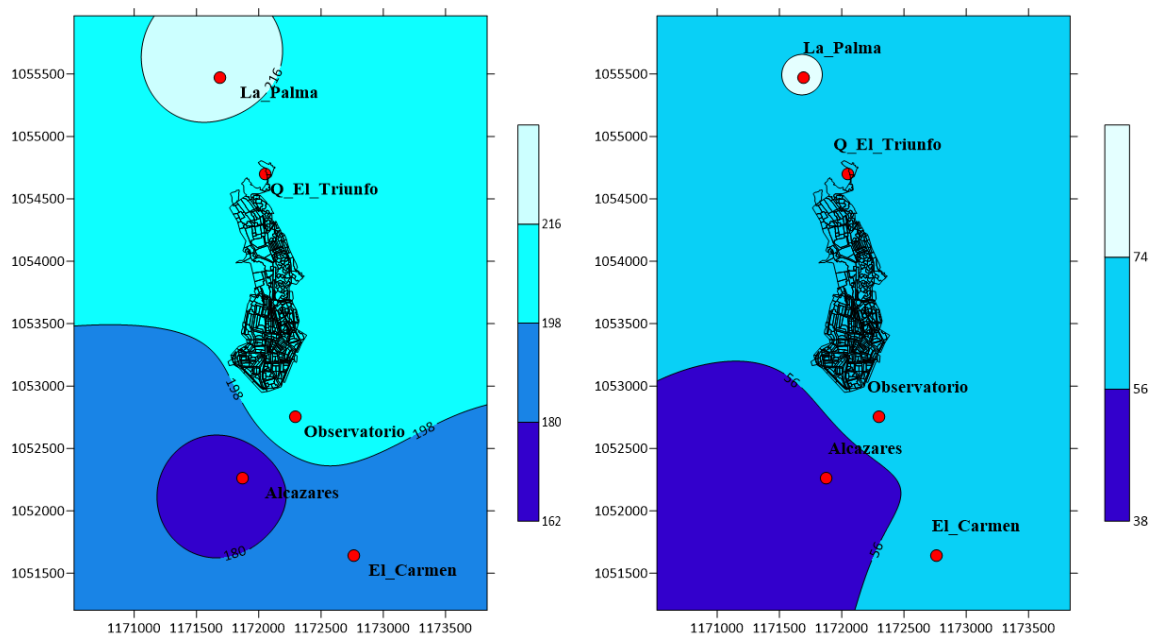
Nota: I: Incompleta; C: Completa.

En conformidad con la información anterior y, con el fin de definir los eventos de calibración y validación se realizaron dos isoyetas mensuales multianuales para identificar la influencia de las estaciones sobre el área de estudio (ver Figura 27). Asimismo, se seleccionaron dos meses con registro de datos diarios completos: para el mes de abril el tiempo analizado fue desde el año 2017 hasta 2021 y para el mes de julio desde el año 2015.

La precipitación máxima para el periodo analizado de siete años fue de 307.8 mm y la mínima de 8.8 mm, para el mes de abril y julio respectivamente. Se seleccionó la estación del Observatorio Vulcanológico para tomar los datos de precipitación, ya que evidenció una marcada influencia en la zona por su ubicación en la parte alta, propiciando el escurrimiento de agua precipitada en la cuenca experimental.

Figura 27

Isoyetas para la cuenca experimental meses de abril (2017-2021) y julio (2015-2021)



Nota: Izquierda los meses de abril (2017-2021) y derecha los meses de julio (2015-2021).

La estación Quebrada El Triunfo se seleccionó para tomar los datos de caudal, en vista de que es la única estación donde se mide este en la zona; Además, de acuerdo con información del catastro suministrada por Aguas de Manizales, la cuenca recolecta, transporta y vierte toda su agua pluvial a un solo punto de la quebrada El Triunfo, conformado por un tramo de alcantarillado y que cuenta con un Box Culvert. Para esta estación se identificó que el sensor de medición de caudal se cambió en diciembre de 2019 a un punto más cercano del nivel de agua y así evitar interferencia en la medición (Betancourth, 2019), el cambio se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Traslado de sensor de medición de caudal



Nota: Izquierda ubicación antigua, derecha ubicación actual Adaptado de Betancourth (2019).

Los eventos identificados fueron 1028 entre los años 2016 y 2021 y se clasificaron de acuerdo con los lineamientos planteados por Linsley et al., (1977) (Ligera: hasta 2.5 mm/h; Moderada: desde 2.5 hasta 7.6 mm/h; Fuerte: por encima de 7.6 mm/h) como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19

Clasificación de eventos como ligeros, moderados y fuertes

Años	Duración min	Intensidad mm/h	Clasificación Linsley, Kohler y Paulhus			Cantidad de eventos
			Ligera	Moderada	Fuerte	
2016	5-245	1.7-180	12	70	60	142
2017	5-420	1.4-163.2	33	112	63	208
2018	25-250	1.5-31.3	22	78	68	168
2019	5-510	1.4-60	20	102	46	168
2020	5-315	1.1-631.2	19	71	45	135
2021	5-207	1.3-290.4	17	99	91	207
Total, eventos						1028

Por lo anterior y teniendo en cuenta la incertidumbre en los datos de caudal anteriores al año 2019 y que después del 9 de junio de 2020 la medición muestra siempre un caudal base superior a 800 L/s, se decidió tomar los eventos para calibración y validación entre los meses de enero y mayo del 2020. Los eventos seleccionados presentaron una duración igual o mayor a 30 minutos, fueron simultáneos en las dos estaciones y su clasificación se consideró de tipo Fuerte o Moderada. También, se descartaron eventos que presentaran un caudal base. El resumen de los eventos elegidos se muestra en la Tabla 20 y los hietogramas con su correspondiente hidrograma se muestran en la Figura 29.

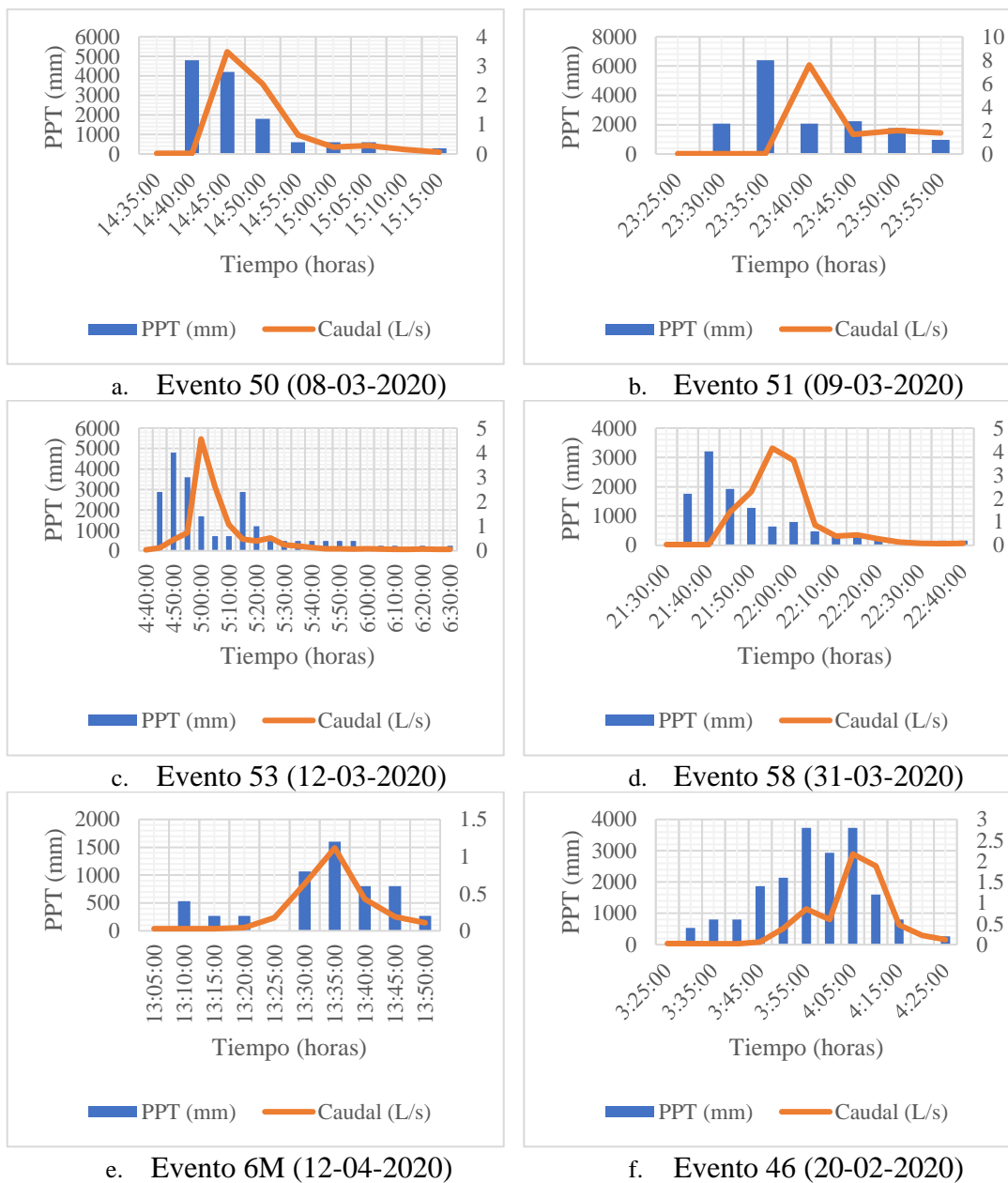
Tabla 20

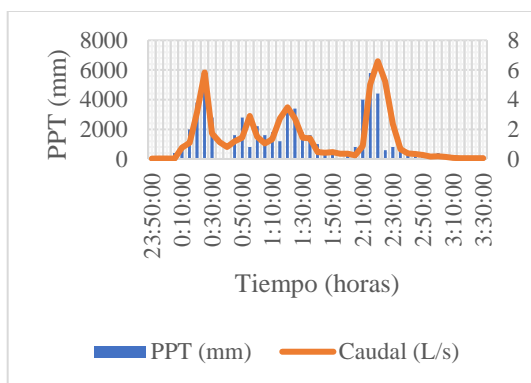
Eventos para la calibración y validación

Número	Fecha	Hora de inicio	Evento	PPT mm	Duración min	Intensidad mm/h
1	20/02/2020	3:25:00	46	14.4	60	14.40
2	8/03/2020	14:35:00	50	8.6	40	12.90
3	9/03/2020	23:25:00	51	19.4	30	38.80
4	12/03/2020	4:40:00	53	19	110	10.36
5	13/03/2020	0:00:00	54	59	220	16.09
6	31/03/2020	21:30:00	58	14.2	70	12.17
7	12/04/2020	13:05:00	6M	4.2	45	5.60
8	21/04/2020	0:20:00	60	21	70	18.00
9	12/05/2020	17:00:00	63	33.8	165	12.29

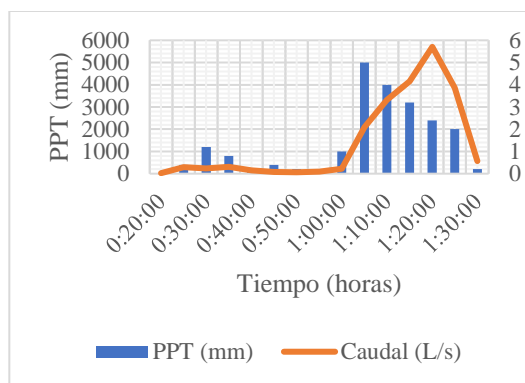
Figura 29

Hietogramas e hidrogramas de los eventos de calibración y validación

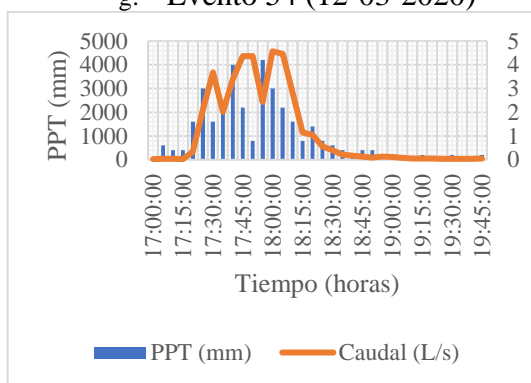




g. Evento 54 (12-03-2020)



h. Evento 60 (21-04-2020)



i. Evento 63 (12-05-2020)

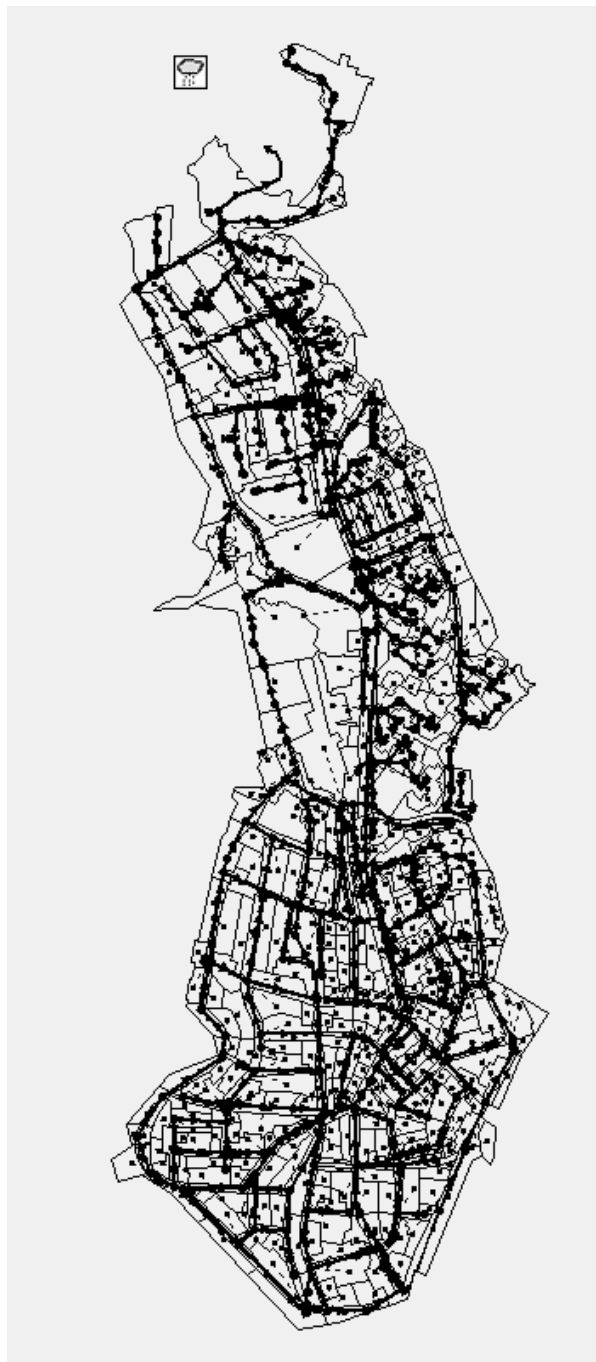
Nota: Se seleccionaron los eventos a, b y c para calibración y los eventos d, e, f, g, h y i para validación. Todos los eventos se clasifican como de tipo fuerte, excepto el evento e que se considera como moderado. Las gráficas muestran el caudal y la precipitación observados.

8.4 Calibración y validación

El modelo construido se muestra en la Figura 30 y los parámetros iniciales de simulación implementados en SWMM de capa terreno y transporte se muestran en la Tabla 21. Para la simulación se empleó la ecuación de onda dinámica (ecuación más completa), la cual permite representar el comportamiento de fenómenos tales como: remansos, flujo a presión, flujo inverso y distribuciones no ramificadas del sistema “mallados” (EPA, 2005). Así mismo, se usó un intervalo de tiempo reducido de 10 segundos para evitar errores de estabilidad del cálculo y la ecuación de tubería forzada que se implementó fue la de Darcy-Weisbach.

Figura 30

Modelación hidrodinámica en SWMM



Nota: La gráfica muestra la cuenca de estudio con su sistema de drenaje existente.

Tabla 21*Valores iniciales del modelo*

Parámetro	Rango o valor inicial
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas impermeables (adim) ¹	0.011
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas permeables (adim) ¹	0.130
Pendientes de las subcuencas (%) ²	2.59 – 7.58
Porcentaje del área impermeable (%) ²	0 – 90
Ancho (m) ²	0.31 – 144.22
Diámetro (m) ²	Igual
Coefficiente de Manning tubería (adim) ¹	0.015 – 0.010
CN (adim) ²	98 – 84 - 80
Almacenamiento superficial áreas impermeables (mm) ¹	1.25
Almacenamiento superficial áreas permeables (mm) ¹	2.5 - 5
Porcentaje del área impermeable sin almacenamiento superficial (%) ¹	10

Nota: 1. Parámetros que se considera espacialmente homogéneos, por lo que comparten el mismo valor independientemente de su posición geográfica. 2. Parámetro que varía el valor en cada subcuenca.

La Tabla 22 relaciona el rango de variación de cada parámetro seleccionado objeto de análisis, el número de corridas y el rango de variación. Se realizaron 124 simulaciones, incluyendo el análisis de sensibilidad para los parámetros de coeficiente de rugosidad de Manning áreas impermeables, coeficiente de rugosidad de Manning áreas permeables, pendientes de las subcuencas, porcentaje del área impermeable, ancho y CN, donde se identificó que el modelo es más sensible al coeficiente de Manning impermeable, pendiente, ancho y porcentaje de impermeabilidad.

Tabla 22

Resumen rango de variación de los parámetros de simulación

Parámetro	Número de corridas	Rango de variación
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas impermeables (adim)	25	0.009 – 0.050
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas permeables (adim)	16	0.050 – 0.150
Pendientes de las subcuencas (%)	21	2.59 – 75.8
Porcentaje del área impermeable (%)	6	- 50%
Ancho (m)	22	0.31 – 1586.42
Diámetro (m)	2	- 20%
Coefficiente de Manning tubería (adim)	13	0.009 – 0.021
CN (adim)	13	98 – 49
Almacenamiento superficial áreas impermeables (mm)	3	0.80 – 1.25
Almacenamiento superficial áreas permeables (mm)	3	2.5 – 7.6

En la Tabla 23 se puede apreciar la combinación de parámetros de mejor ajuste con los eventos de calibración.

Tabla 23

Parámetros de simulación con mejor ajuste

Parámetro	Rango de variación
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas impermeables (adim)	0.014 – 0.035
Coefficiente de rugosidad de Manning áreas permeables (adim)	0.035 – 0.075
Pendientes de las subcuencas (%)	12.95 – 37.9
Porcentaje del área impermeable (%)	- 50%
Ancho (m)	1.55 – 721.1
Diámetro (m)	- 10%
Coefficiente de Manning tubería (adim)	0.010 – 0.015
CN (adim)	58.8 - 39
Almacenamiento superficial áreas impermeables (mm)	0.80
Almacenamiento superficial áreas permeables (mm)	2.5 – 7.6

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos después de realizar la simulación con el modelo calibrado para cada uno de los eventos seleccionados (índice de Nash-Sutcliffe) y la Figura 31 enseña la comparación entre los hidrogramas observados y simulados.

Tabla 24

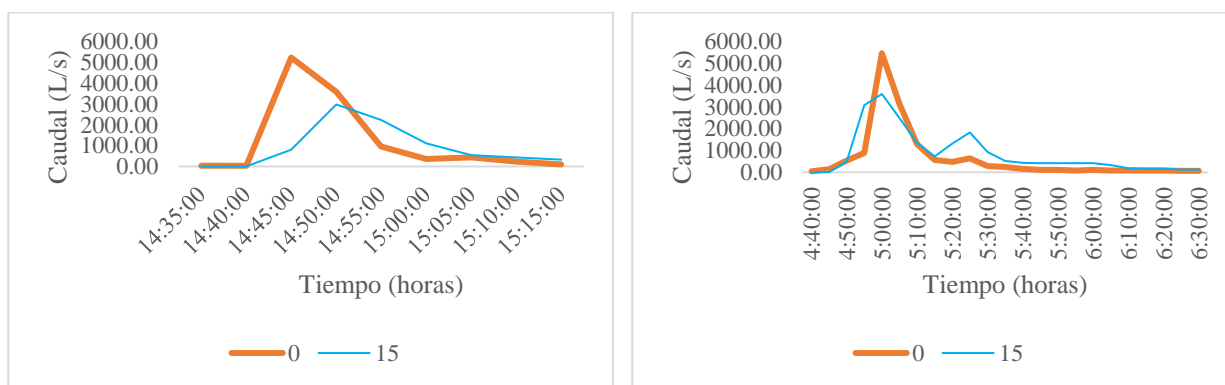
Índice de Nash-Sutcliffe

Lluvia	Simulación	NSE	Ajuste
50 ¹	1	0.21	Satisfactorio
53 ¹	3	0.65	Muy bueno
58 ¹	4	0.42	Bueno
46 ²	6	0.47	Bueno
51 ²	2	0.43	Bueno
54 ²	7	0.73	Muy bueno
6M ²	5	0.23	Satisfactorio
60 ²	8	0.76	Muy bueno
63 ²	9	0.78	Muy bueno

Nota: 1. Evento de calibración 2. Evento de validación.

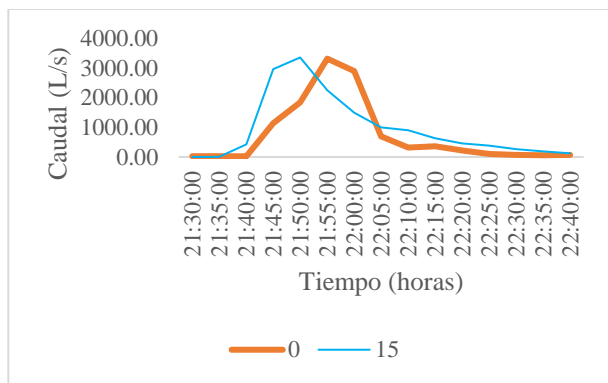
Figura 31

Hidrograma observado vs simulado para la calibración y validación

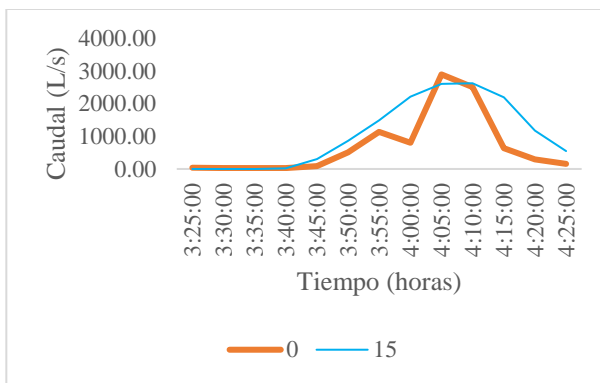


a. Evento 50 (08-03-2020).

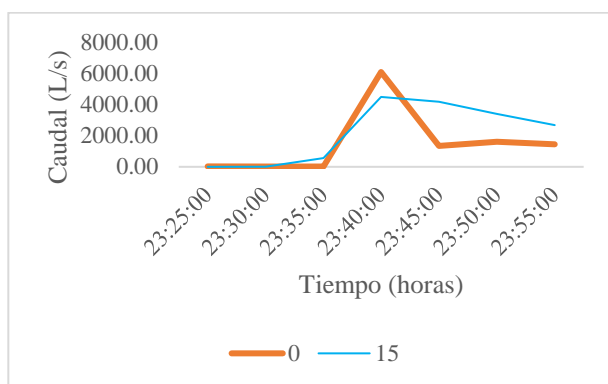
b. Evento 51 (09-03-2020).



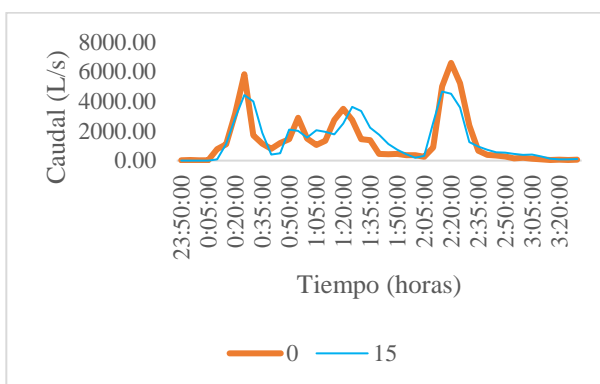
c. Evento 53 (12-03-2020).



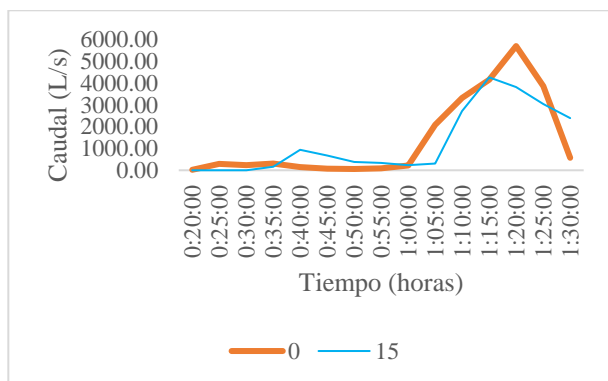
d. Evento 58 (31-03-2020).



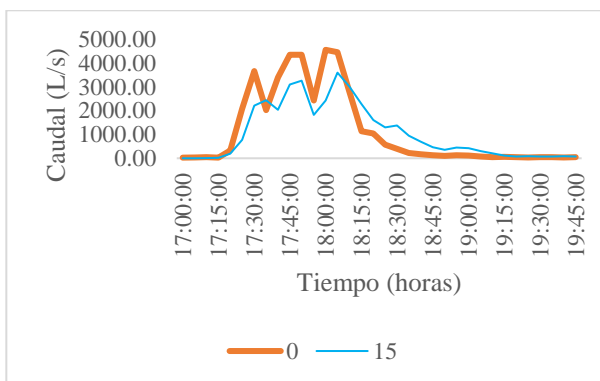
e. Evento 6M (12-04-2020).



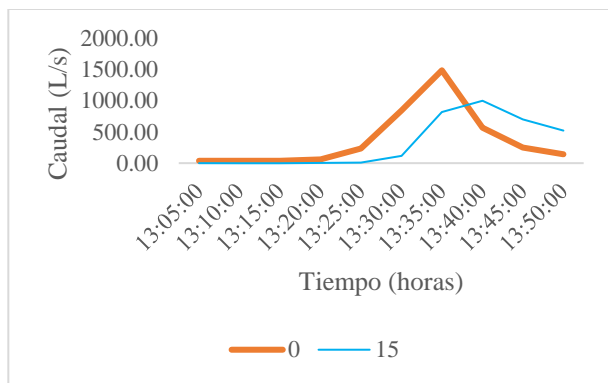
f. Evento 46 (20-02-2020).



g. Evento 54 (12-03-2020).



h. Evento 60 (21-04-2020).



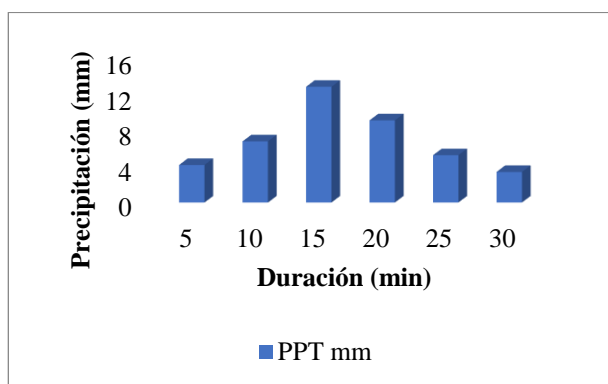
i. Evento 63 (12-05-2020).

Nota: 0 (curva naranja) corresponde al caudal observado y 15 (curva azul) al caudal simulado. Se muestra el ajuste de lo simulado respecto a lo observado.

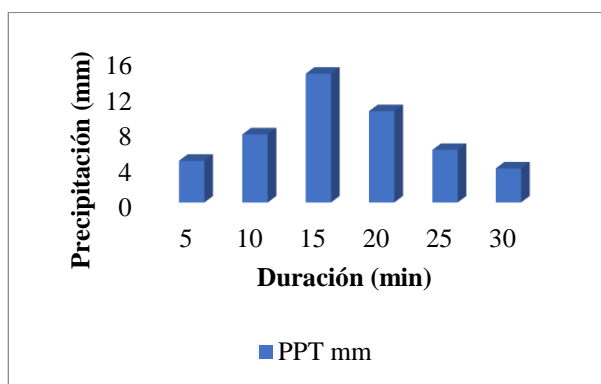
En la Figura 32 se muestran las lluvias de diseño proyectadas para un tiempo de concentración de 30 minutos y periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Figura 32

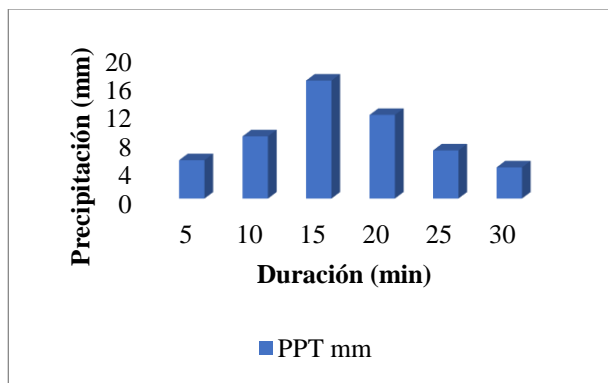
Hietogramas de diseño



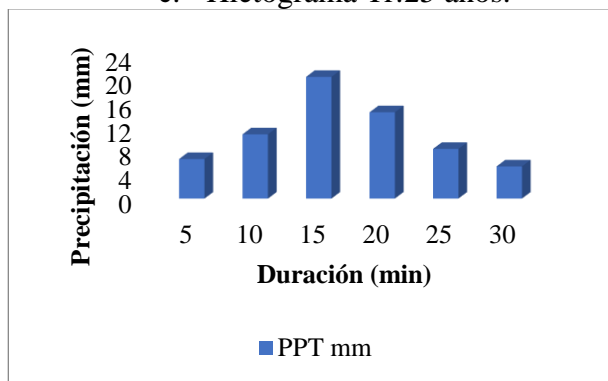
a. Hietograma Tr:5 años.



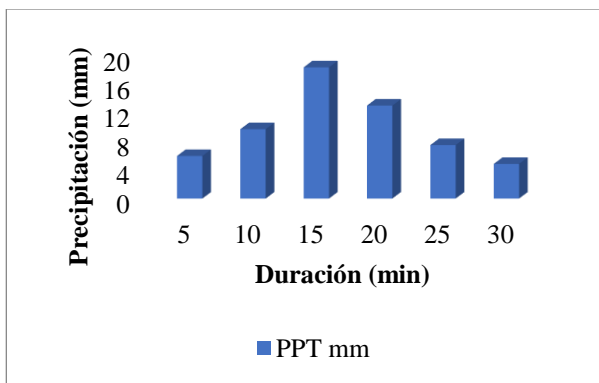
b. Hietograma Tr:10 años.



c. Hietograma Tr:25 años.



e. Hietograma Tr:100 años.



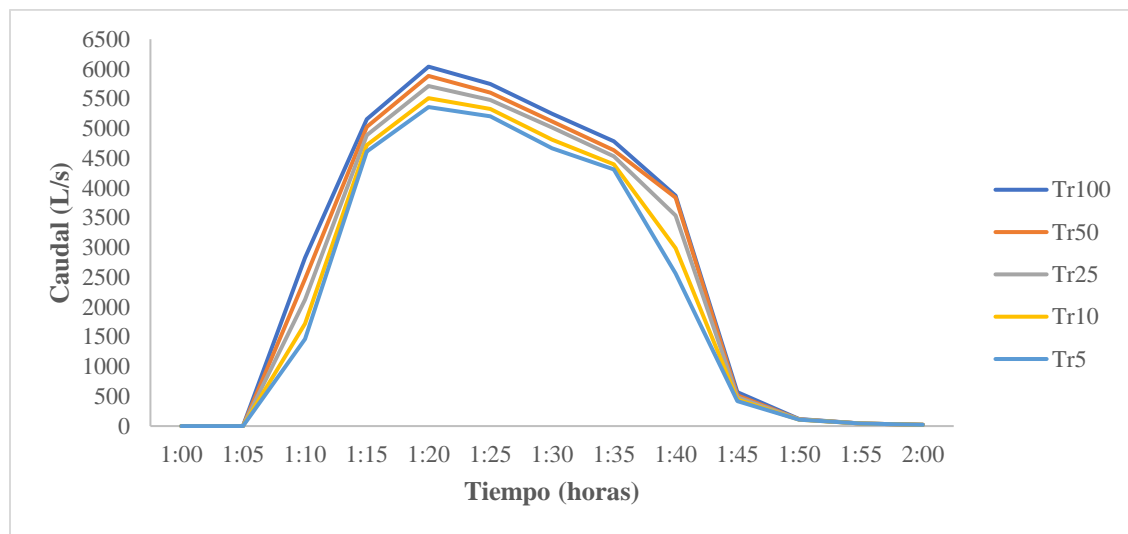
d. Hietograma Tr:50 años.

Nota: Se muestra la lluvia de diseño para los diferentes periodos de retorno proyectados.

8.5 Análisis hidráulico

La Figura 33 representa el hidrograma de salida de la cuenca después de ejecutar la simulación hidráulica para los diferentes periodos de retorno, donde los conductos reflejan caudal a partir del minuto 5 hasta el minuto 55 y el caudal pico se alcanza a los 20 minutos trascurrida la lluvia. Además, el caudal pico se alcanza 5 minutos después del pico de las lluvias de diseño.

El caudal máximo estimado a los 20 minutos para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años es 6038.37, 5882.98, 5713.01, 5509.38 y 5359.64 L/s respectivamente. Se evidencian diferencias de caudal entre los periodos de retorno de 100 y 5 años de 678.73 L/s.

Figura 33*Hidrograma de salida - cámara 04001D*

En la Figura 34 se presenta la simulación realizada para la lluvia de diseño de 5, 10, 25, 50 y 100 años, justo en el tiempo de 20 minutos después de iniciada la lluvia para la variable inundación en nodos, la cual es la condición más crítica. En la Tabla 25 se aprecia la cantidad de cámaras inundadas y su porcentaje correspondiente del total de estas.

Tabla 25*Cantidad y porcentajes de cámaras inundadas*

Periodo de retorno (años)	Cámaras inundadas	Porcentaje	Intervalo de tiempo de inundación (min)
100	244	43.96	10 - 40
50	235	42.34	10 - 40
25	223	40.18	10 - 35
10	190	34.23	10 - 35
5	163	29.37	10 - 35
----	555*	100%	----

Nota: * Corresponde al total de cámaras de la cuenca de estudio.

Para todos los periodos de retorno analizados se identificaron cámaras con inundaciones mayores a 100 L/s, donde se alcanzó porcentajes de cámaras inundadas de 33.61, 31.49, 30.49, 27.37 y 26.38% para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años respectivamente, como se muestra en la Tabla 26. En este mismo sentido, para cada periodo de retorno el caudal de inundación mayor fue de 1119.63, 1061.65, 1006.19, 925.13 y 916.9 L/s y el tiempo más largo de inundación fue de 30, 29.40, 28.80, 27.60 y 26.40 minutos. Para las diferentes simulaciones la entrada del agua pluvial proveniente de las subcuencas es directamente a las cámaras y no por los diferentes sumideros que existen realmente; por tanto, no se tiene en cuenta el flujo en las calles y el ingreso de agua por estos, lo que afecta y reduce directamente el tiempo de concentración.

La Figura 34 muestra espacialmente las cámaras donde se da el caudal de inundación mayor y el tiempo más largo de inundación.

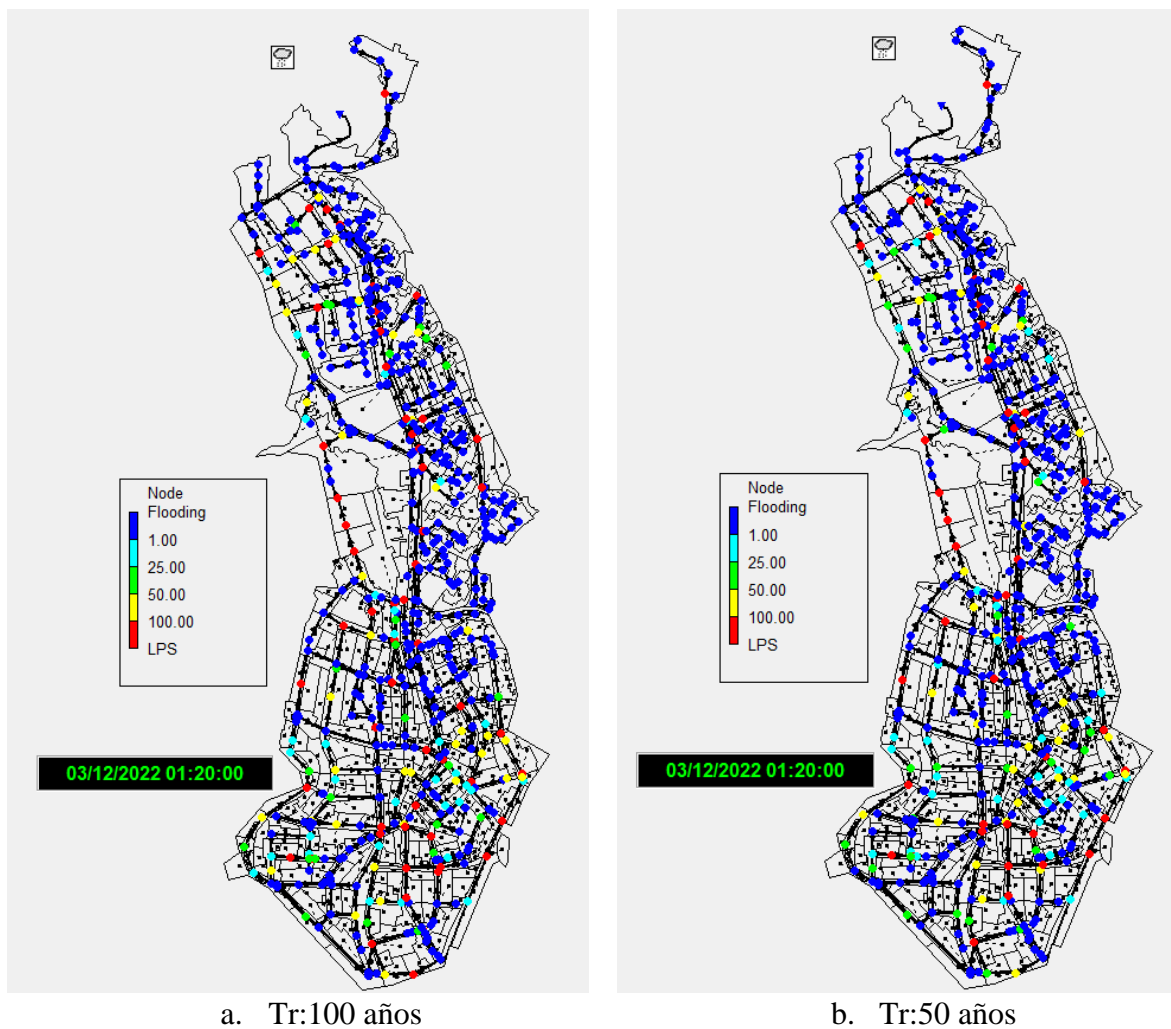
Tabla 26

Porcentaje de cámaras inundadas para diferentes intervalos de caudal

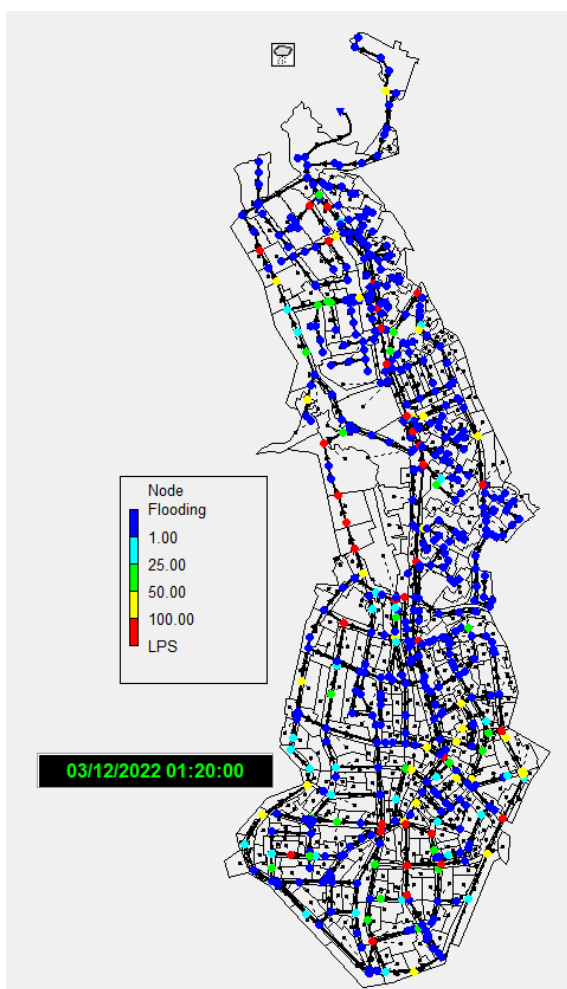
Intervalo caudal de inundación (L/s)	Periodo de retorno (años) – cantidad y porcentaje de cámaras inundadas (%)				
	100	50	25	10	5
1 - 25	65–(26.64)	66–(28.09)	65–(29.15)	59–(31.05)	55–(33.74)
25 - 50	47–(19.26)	47–(20.0)	46–(20.63)	36–(18.95)	31–(19.02)
50 – 100	50–(20.49)	48–(20.43)	44–(19.73)	43–(22.63)	34–(20.86)
> 100	82–(33.61)	74–(31.49)	68–(30.49)	52–(27.37)	43–(26.38)

Figura 34

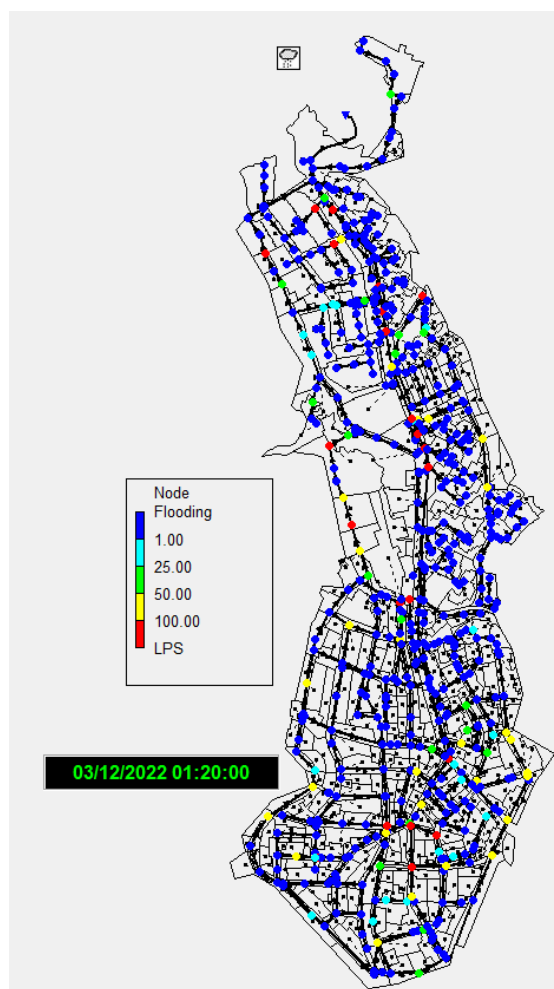
Nodos con inundación en la cuenca de estudio minuto 20



Nota: Los puntos diferentes a color azul son cámaras con inundación.

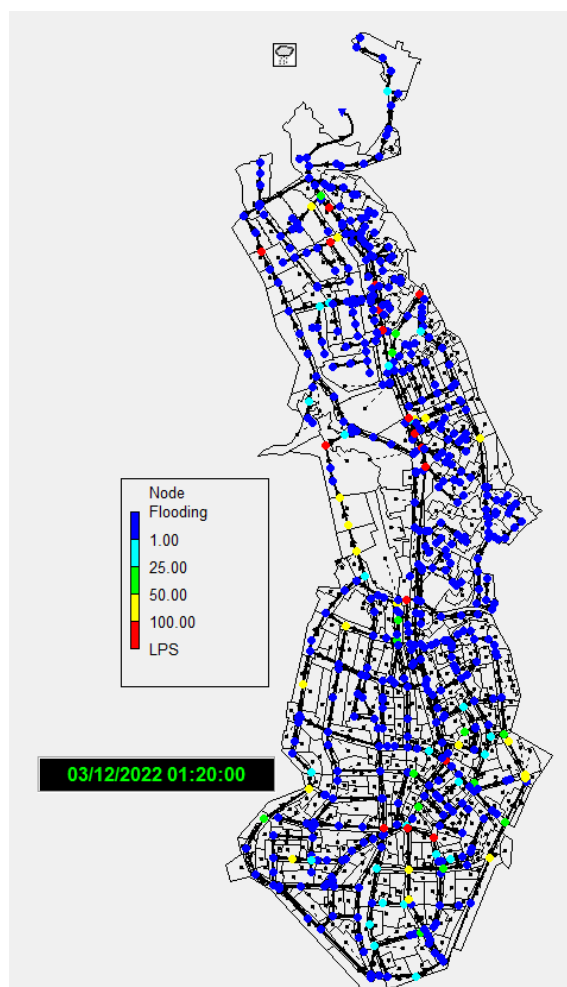


c. Tr:25 años



d. Tr:10 años

Nota: Los puntos diferentes a color azul son cámaras con inundación.



e. Tr:5 años

Nota: Los puntos diferentes a color azul son cámaras con inundación.

La Figura 35 muestra la simulación realizada para los diferentes periodos de retorno en relación con la variable capacidad de los conductos. En la Tabla 27 se muestra la cantidad de conductos que sobrepasa el 93% de la capacidad de la tubería, limite permisible de acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 en su artículo 151. Para la cuenca se identifica que, de los 589 conductos existentes, 320, 308, 296, 263 y 240 tuberías sobrepasan el 93% de capacidad para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años en el mismo orden.

Tabla 27

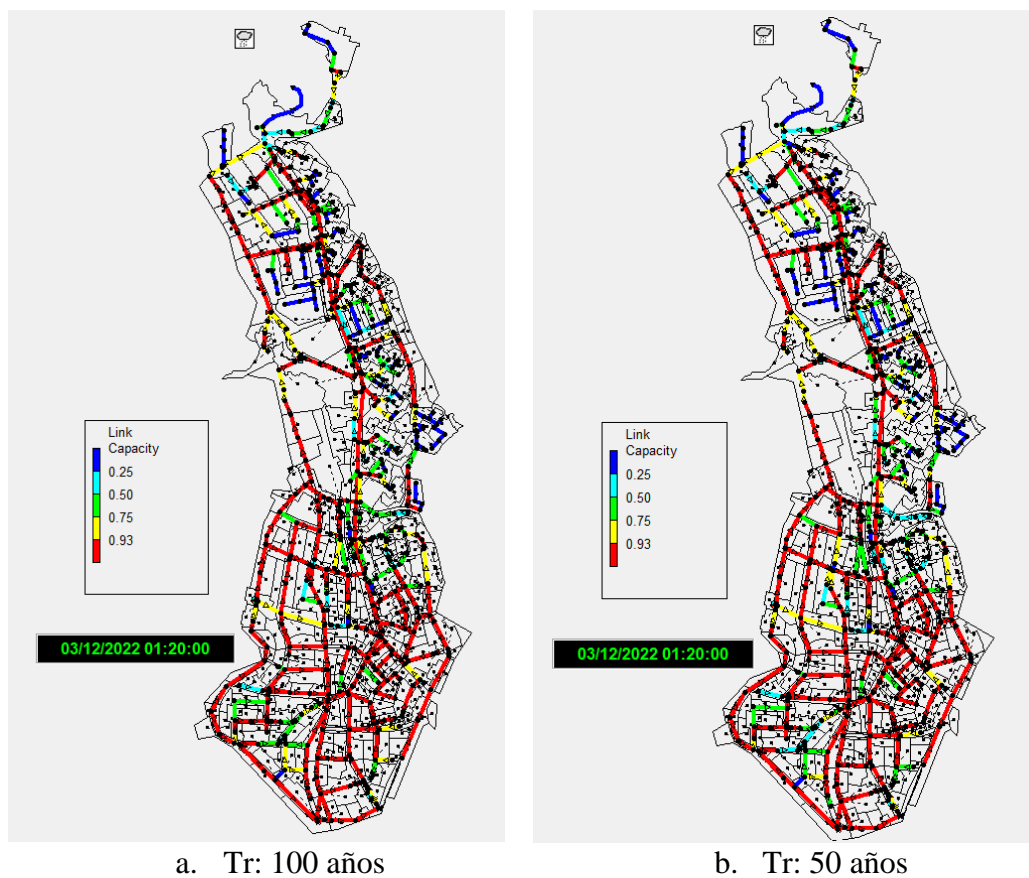
Cantidad de conductos con capacidad mayor al 93% para diferentes periodos de retorno

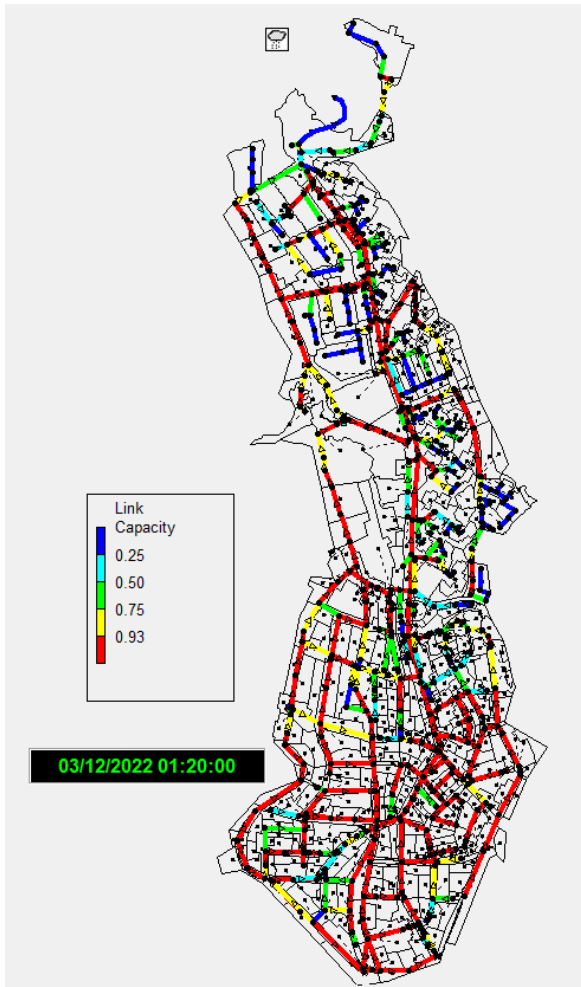
Periodo de retorno (años)	Conductos excediendo el 93% de capacidad	Porcentaje	Conductos funcionando a tubo lleno
100	320	54.33	315
50	308	52.29	303
25	296	50.25	286
10	263	44.65	255
5	240	40.75	233
----	589*	100	----

Nota: * Corresponde al total de conductos de la cuenca de estudio.

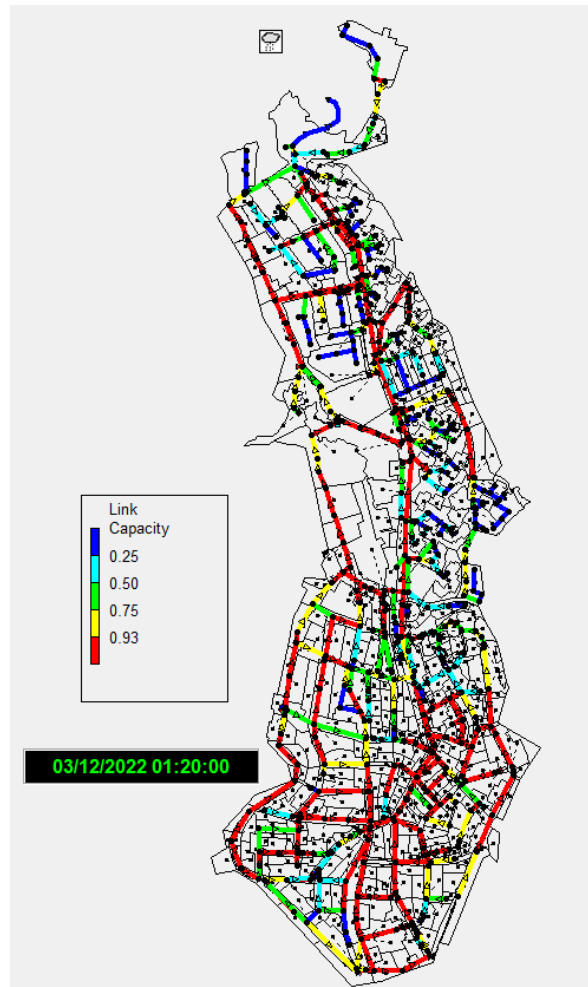
Figura 35

Capacidad de los conductos en la cuenca de estudio minuto 20

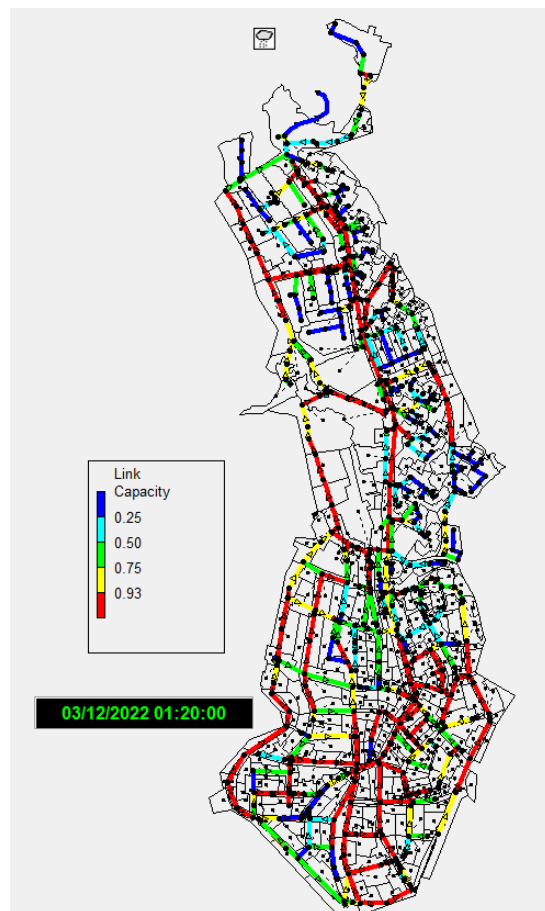




c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

En la Figura 36 se muestra la simulación realizada para los diferentes periodos de retorno en relación con la variable velocidad de los conductos. En la Tabla 28 se indica el rango de velocidades presentes en los conductos en el cual se identifica que, para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años se sobrepasa la velocidad máxima que recomienda la Resolución 0330 de 2017 en su artículo 150 de 5 m/s, con valores de porcentaje de 14.94, 14.60, 13.75, 13.41 y 12.90% respectivamente. La mayoría de estas velocidades se dan en conductos de material en concreto, ocasionando que se desgaste y deteriore en menor tiempo las tuberías. De igual manera, se presentan conductos con velocidades menores a 0.75 m/s en condición de tubo lleno, en porcentajes de 1.53, 2.38, 1.36, 2.04 y 1.87% s para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años respectivamente, propiciando en cierto grado la sedimentación de partículas.

Tabla 28

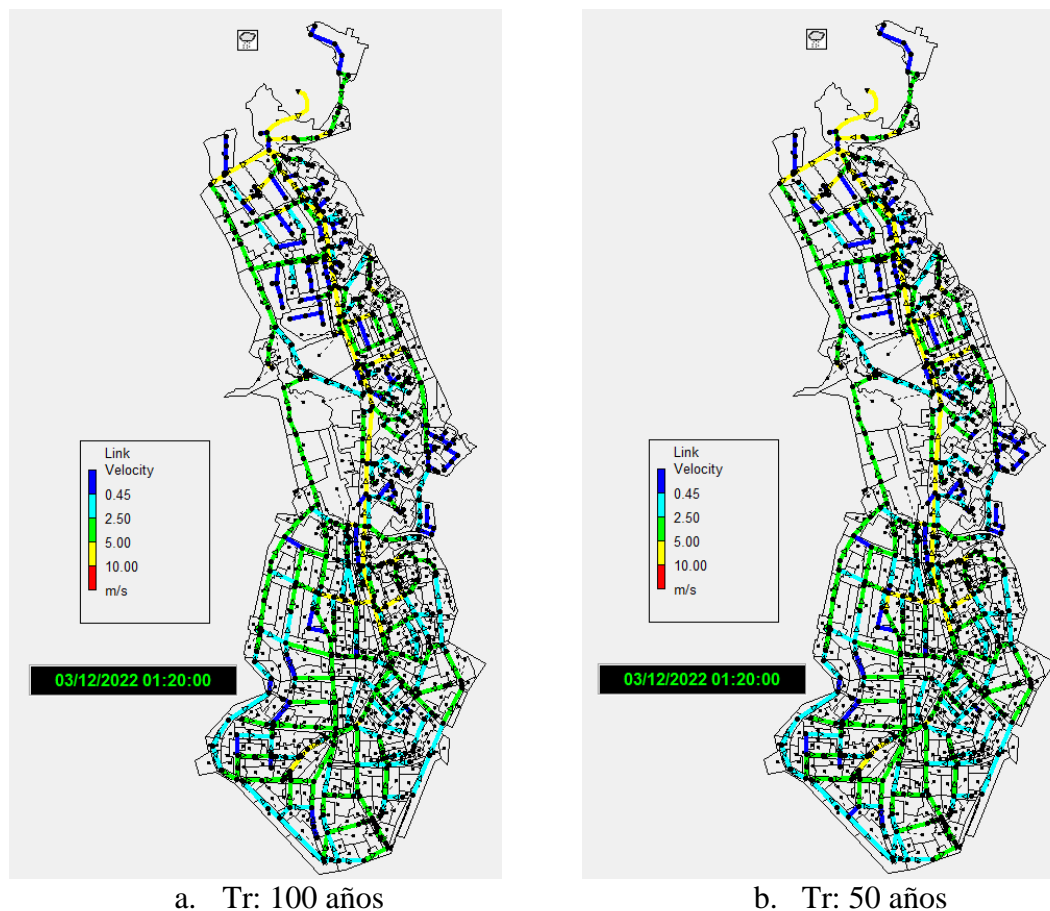
Porcentaje de conductos con velocidad mayor a 5 m/s

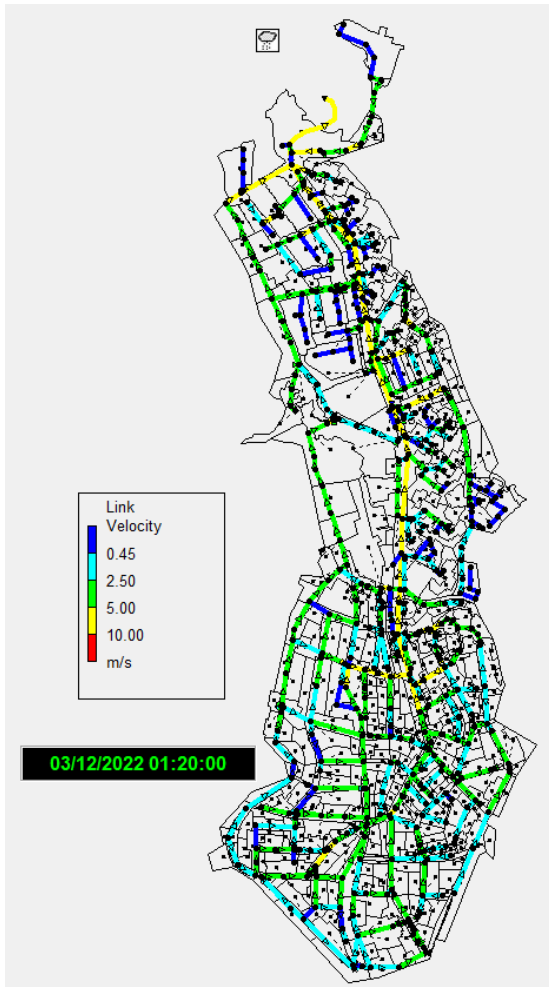
Condición	Periodo de retorno (años) – cantidad y porcentaje de conductos				
	100	50	25	10	5
> 5 m/s	88-(14.94)	86-(14.60)	81-(13.75)	79-(13.41)	76-(12.90)
PVC > 5 m/s	19-(21.59) *	17-(19.77) *	17-(20.99) *	7-(8.86) *	14-(18.42) *
> 10 m/s	6-(1.02)	6-(1.02)	7-(1.19)	8-(1.19)	7-(9.21)
< 0.75 m/s	9-(1.53)	14-(2.38)	8-(1.36)	12-(2.04)	11-(1.87)

Nota: *Porcentaje respecto a los conductos que sobrepasan la capacidad del 93%.

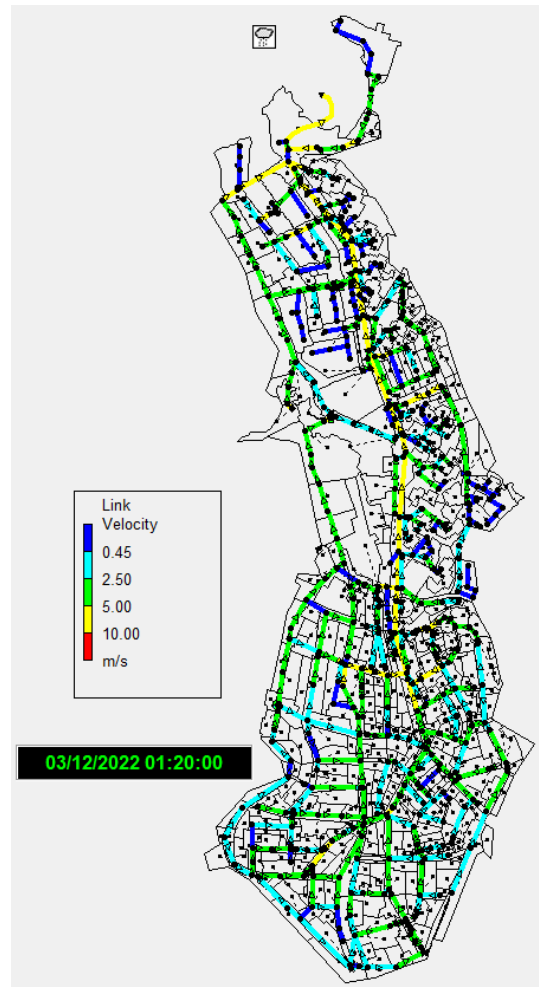
Figura 36

Velocidad máxima en los conductos de la cuenca de estudio minuto 20

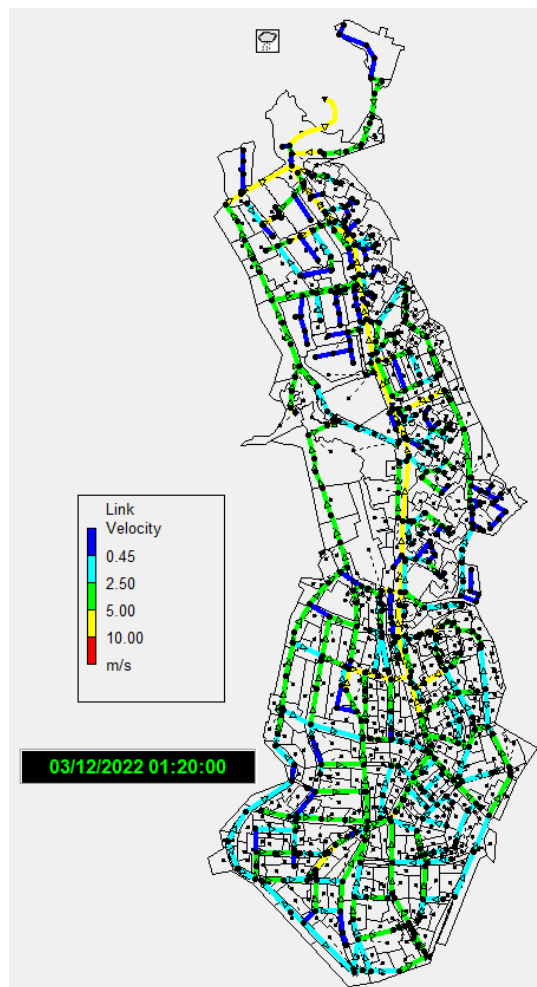




c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



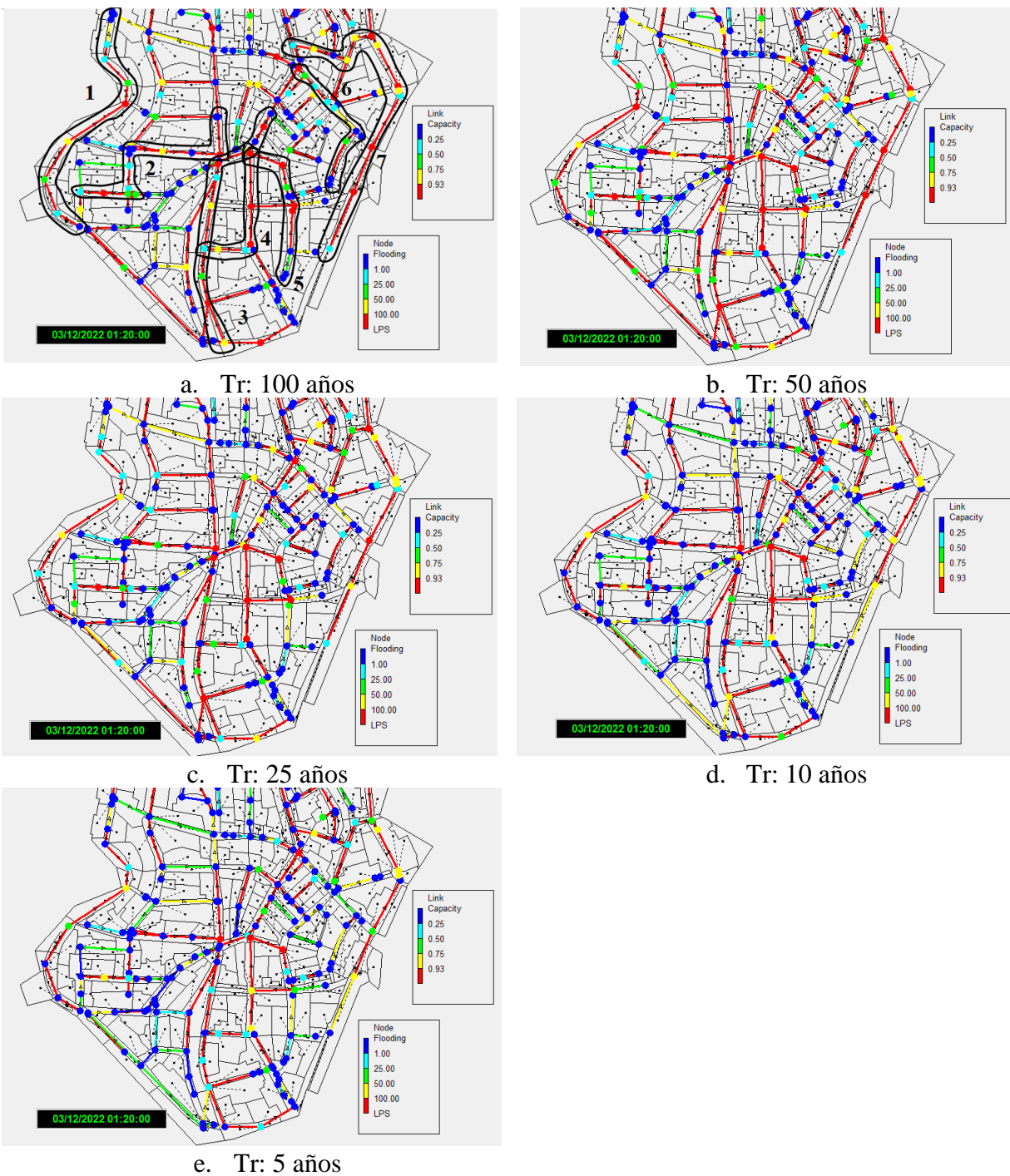
e. Tr: 5 años

Con el fin de establecer y mostrar los tramos críticos en la cuenca, se divide en tres sectores (bajo, medio y alto) que presentan problemas de inundación en las cámaras y conductos con capacidades mayores a 0.93.

La zona alta mostrada en la Figura 37, identifica 7 tramos críticos para los diferentes periodos de retorno.

Figura 37

Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector alto



El tramo 1 comprende 10 cámaras, donde para el periodo de retorno de 100 años se presenta inundación en 7 cámaras y su duración máxima es de 30 minutos. Para los periodos de retorno de 50 y 25 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 30 y 25 minutos respectivamente. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 25 minutos.

La Figura 38 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06451C, primera en presentarse inundación y última en aliviarse, estando aproximadamente 30 minutos inundada. La cámara 06457C es inicial.

En la Tabla 29 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 1.

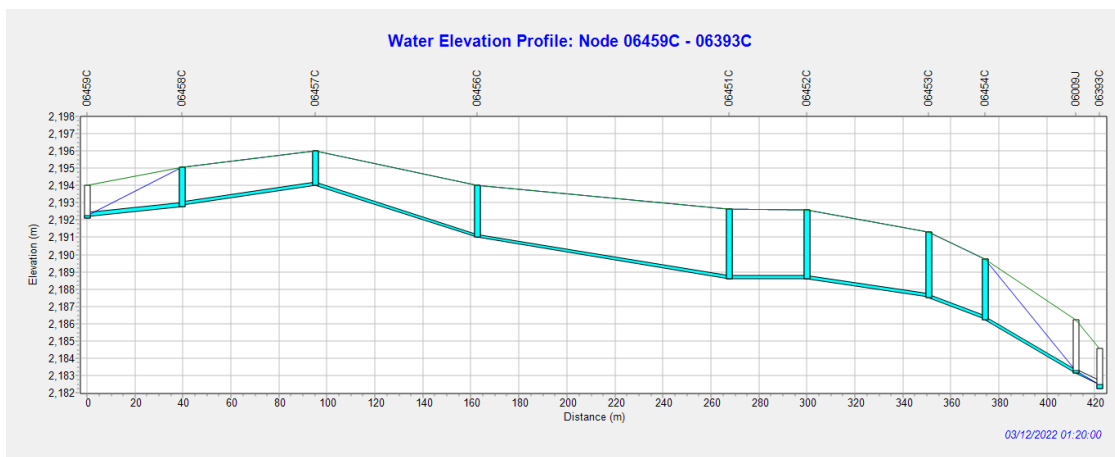
Tabla 29

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 1

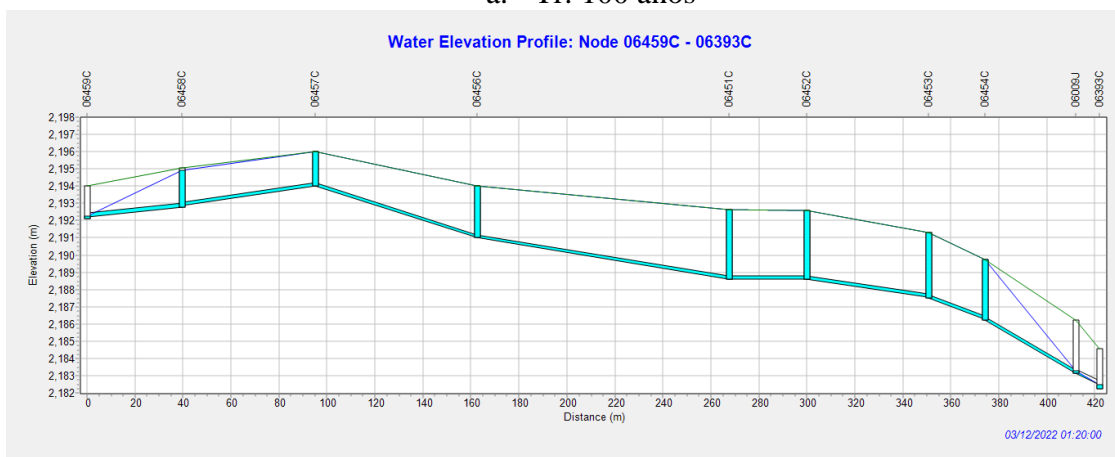
Cámara	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
#	100	50	25	10	5
06458C	4.25-5-1:20	----	----	----	----
06457C	43.9-10-1:20	29.24-5-1:20	14.16-5-1:20	----	----
06456C	82.09-30-1:20	74.43-30-1:20	67.58-20-1:20	55.45-20-1:20	49.95-20-1:20
06451C	123.22-30-1:20	109.74-30-1:20	96.44-25-1:20	79.73-25-1:20	73.09-25-1:20
06452C	35.26-10-1:20	28.04-10-1:20	21.18-10-1:20	8.91-5-1:20	2.06-5-1:20
06453C	15.41-10-1:20	10.35-10-1:20	4.84-5-1:20	----	----
06454C	16.38-10-	11.70-10-1:20	7-505-1:20	----	----

Figura 38

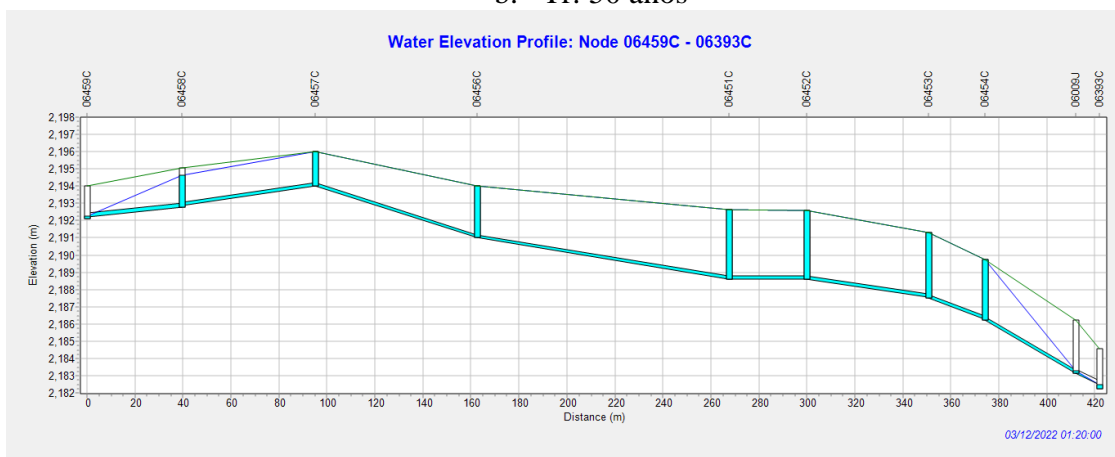
Perfiles de alcantarillado tramo 1



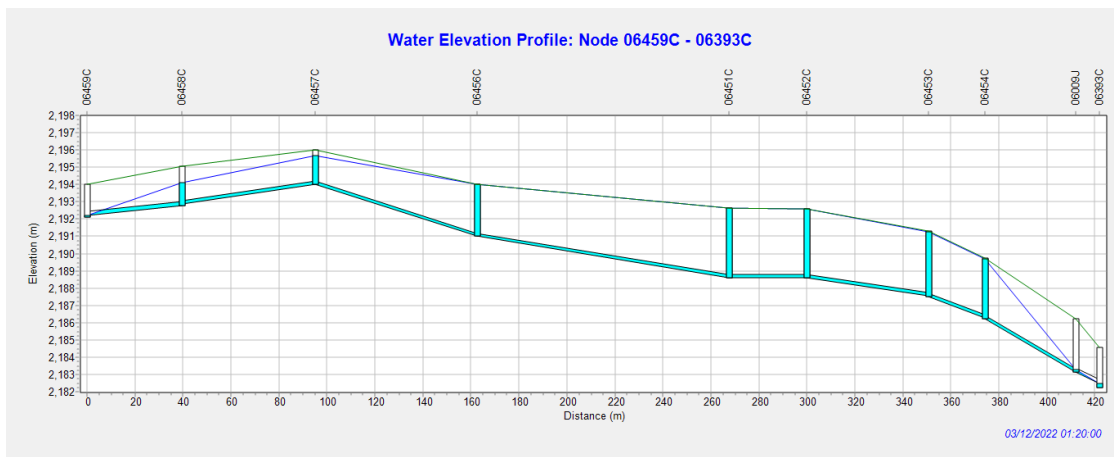
a. Tr: 100 años



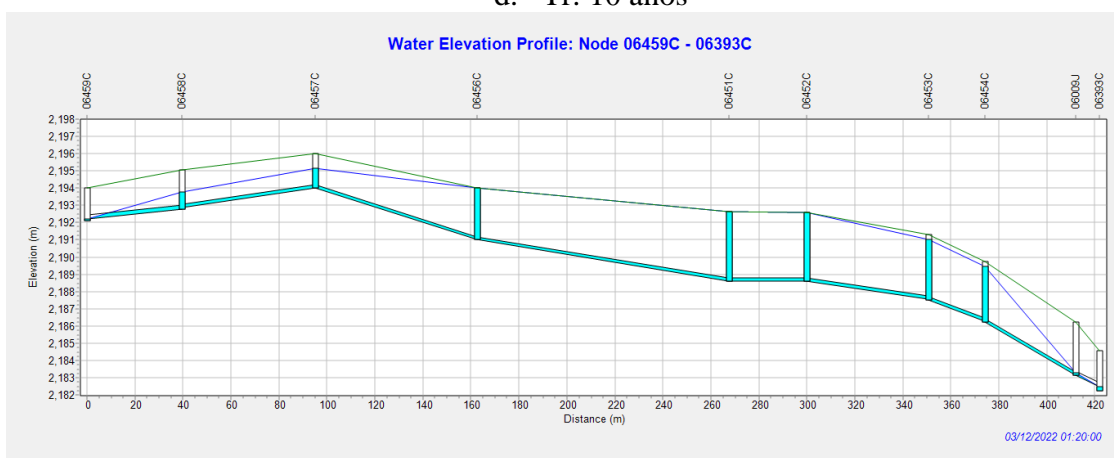
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 2 comprende 11 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 7 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 5 cámaras y su duración máxima es de 15 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 39 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06411C, primera en presentarse inundación y última en aliviarse, estando aproximadamente 20 minutos inundada.

En la Tabla 30 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 2.

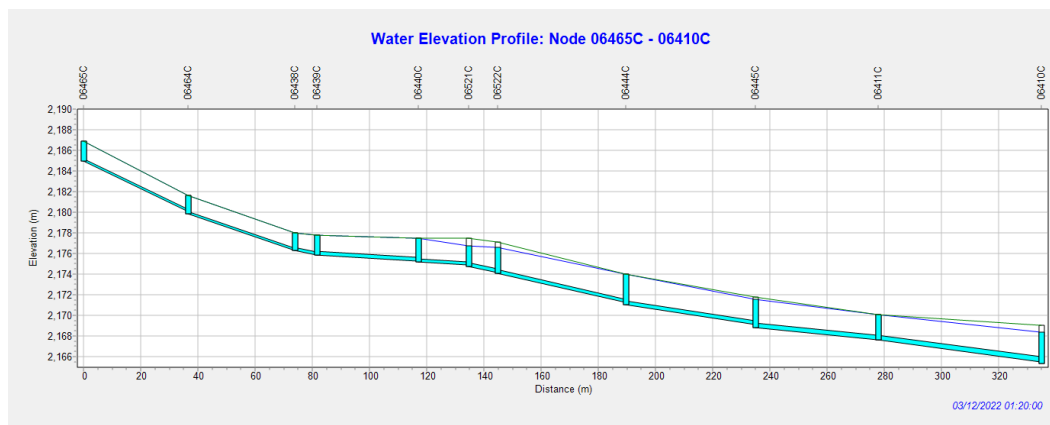
Tabla 30

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 2

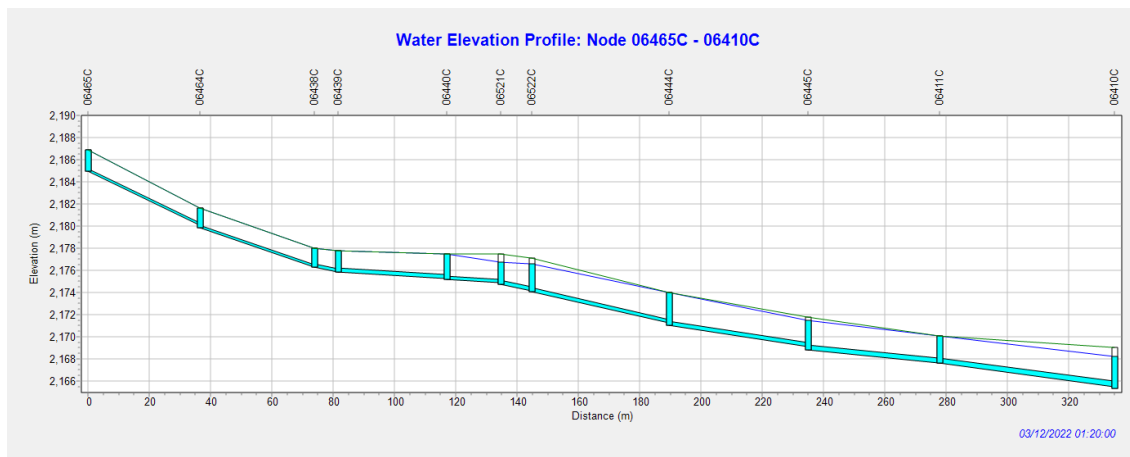
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
06465C	21.70-10-1:20	15.27-10-1:20	8.67-10-1:20	----	----
06464C	121.96-20- 1:20	111.53-20- 1:20	102.16-15- 1:20	73.74-10-1:20	54.77-10-1:20
06438C	42.28-10-1:20	38.44-10-1:20	28.22-10-1:20	11.53-5-1:20	4.73-5-1:20
06439C	10.43-5-1:20	4.39-5-1:20	----	----	----
06440C	19.39-5-1:20	0.49-5-1:20	----	----	----
06444C	85.78-10-1:20	65.19-10-1:20	42.06-5-1:20	----	----
06411C	399.27-20- 1:20	368.19-20- 1:20	313.77-15- 1:20	276.48-10- 1:20	150.41-10- 1:20

Figura 39

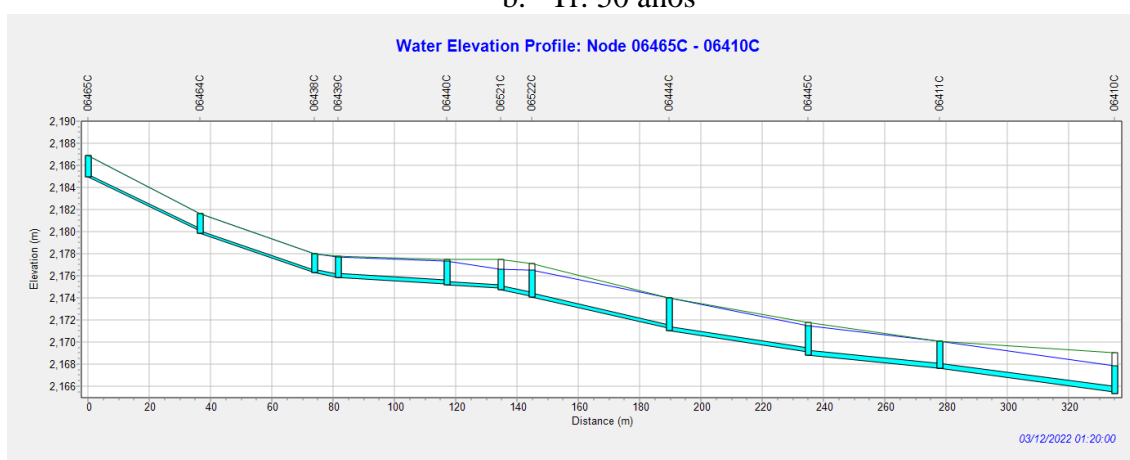
Perfiles de alcantarillado tramo 2



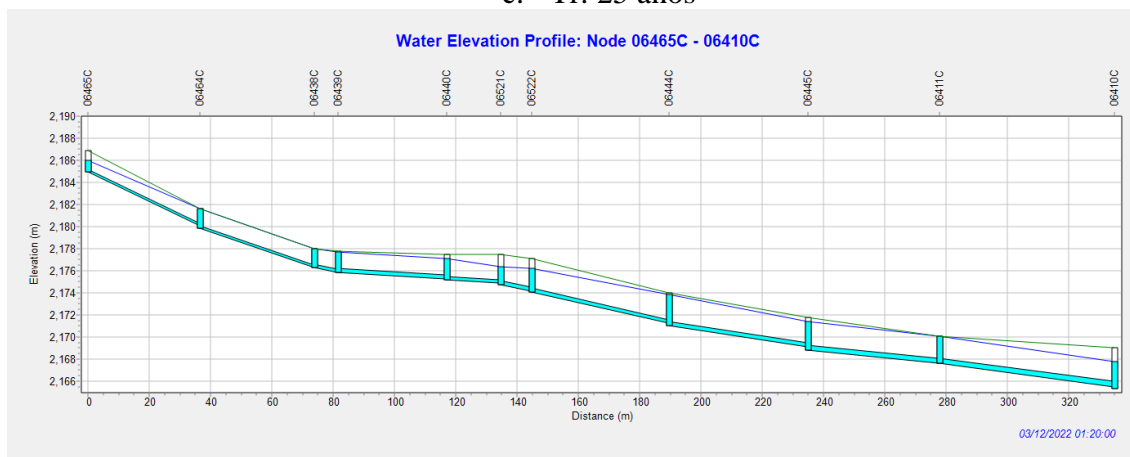
a. Tr: 100 años



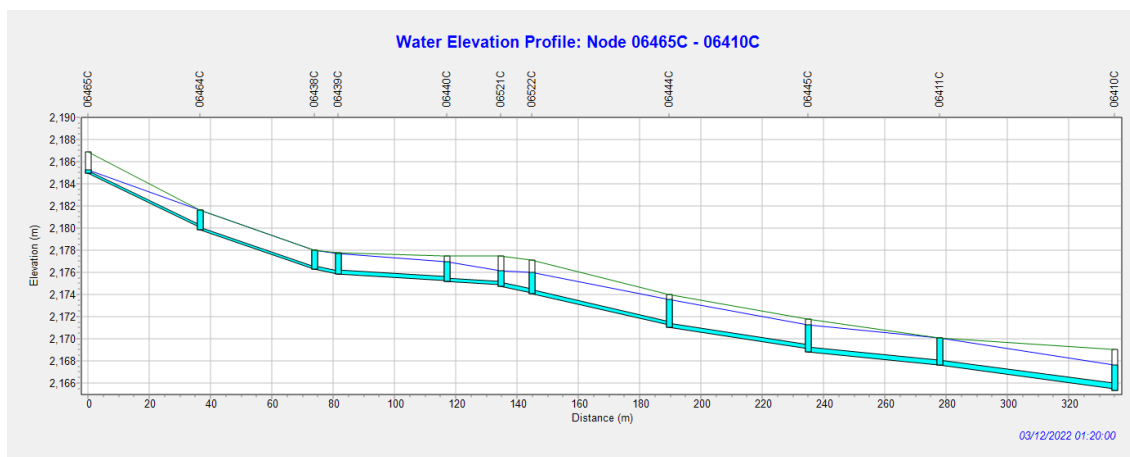
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 3 comprende 12 cámaras, donde para el periodo de retorno de 100 años se presenta inundación en 8 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Para el periodo de retorno de 50 años se presenta inundación en 7 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 15 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 5 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 40 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras más críticas son las 06422C y 06316C. En la primera la inundación dura 10 minutos, pero el caudal pico es mayor y en la segunda la inundación dura 20 minutos.

En la Tabla 31 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 3.

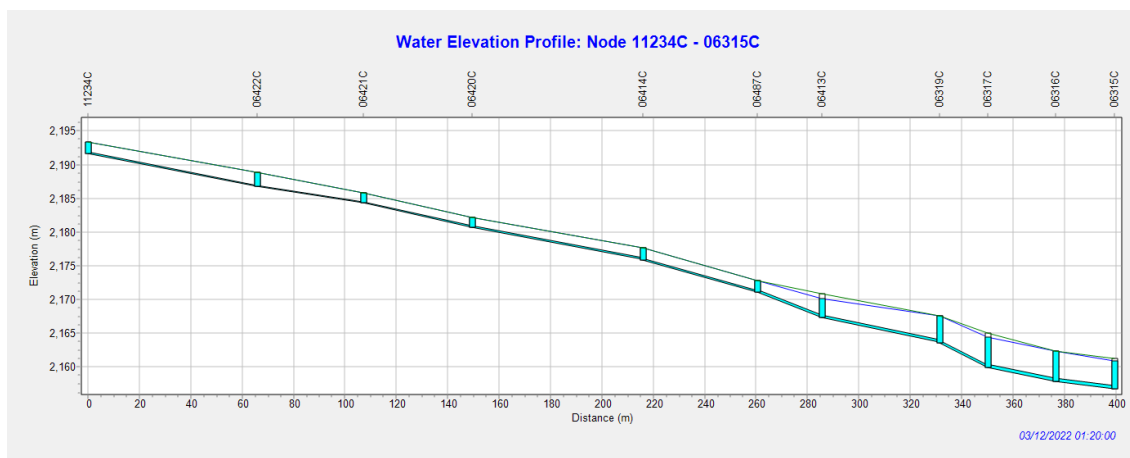
Tabla 31

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 3

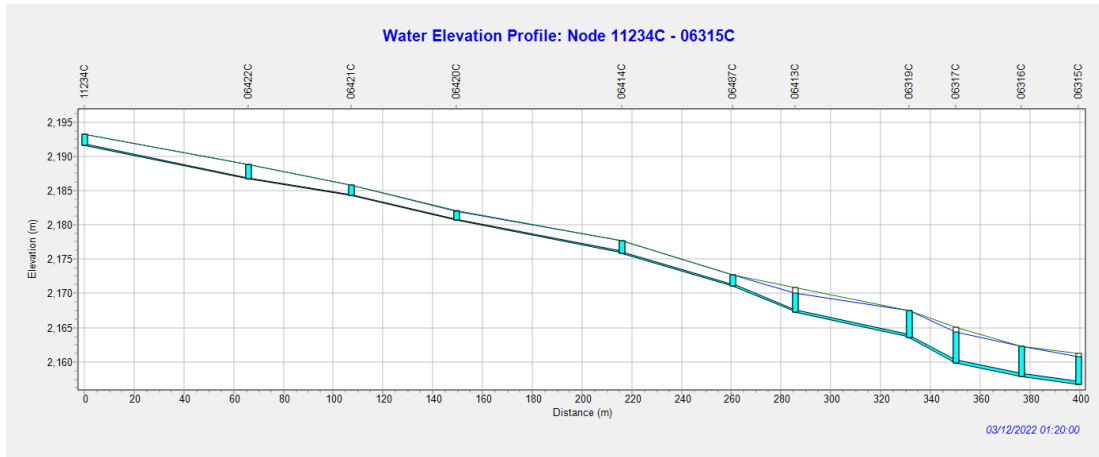
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
11234C	71.96-10-1:20	41.89-5-1:20	11.62-5-1:20	----	----
06422C	148.41-10-1:20	125.28-10-1:20	104.29-10-1:20	52.46-10-1:20	19.25-5-1:20
06421C	41.93-20-1:20	35.84-10-1:20	29.54-10-1:20	19.98-10-1:20	15.38-10-1:20
06420C	3.64-5-1:20	----	----	----	----
06414C	70.48-20-1:20	60.26-10-1:20	48.38-10-1:20	31.66-10-1:20	18.69-10-1:20
06487C	10.10-5-1:20	0.90-5-1:20	----	----	----
06319C	95.84-15-1:20	81.91-10-1:20	63.27-10-1:20	37.97-10-1:20	19.34-5-1:20
06316C	108.44-20-1:20	92.67-20-1:20	78.41-15-1:20	55.92-10-1:20	42.89-10-1:20

Figura 40

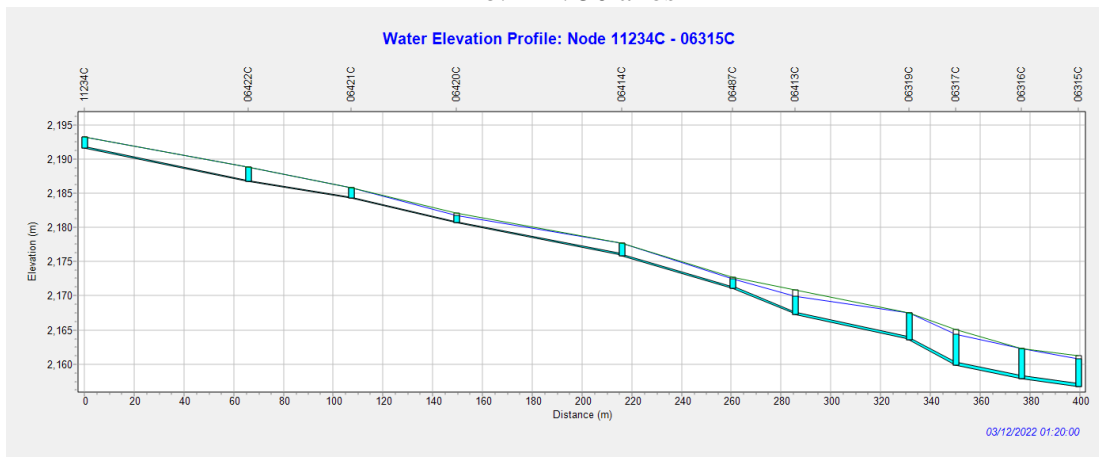
Perfiles de alcantarillado tramo 3



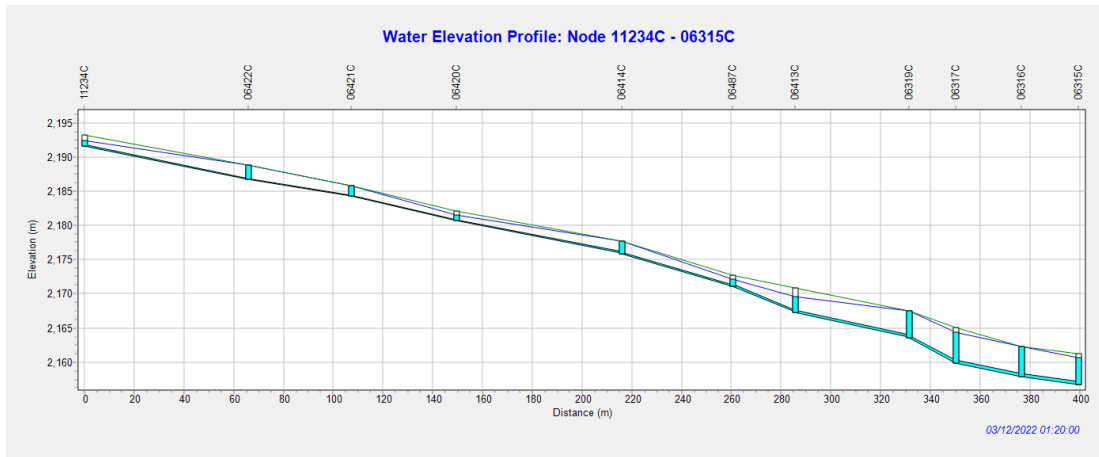
a. Tr: 100 años



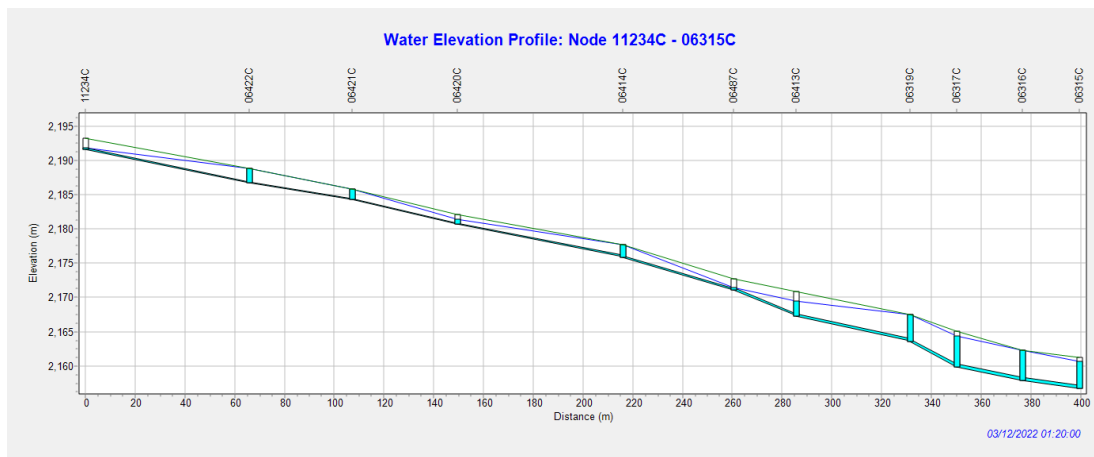
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 4 comprende 7 cámaras, sin embargo, las cámaras 06420C y 06319C se han analizado en el tramo 3 y no se tendrán en cuenta. Para todos los periodos de retorno se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 25, 20, 15 y 10 minutos para los periodos de retorno de 100, 50, 25 y 10 y 5 años respectivamente.

La Figura 41 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras más críticas son la 06415C y 06318C, la primera presenta un caudal pico mayor, sin embargo, la reducción del caudal se da en mayor proporción.

En la Tabla 32 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 4.

Tabla 32

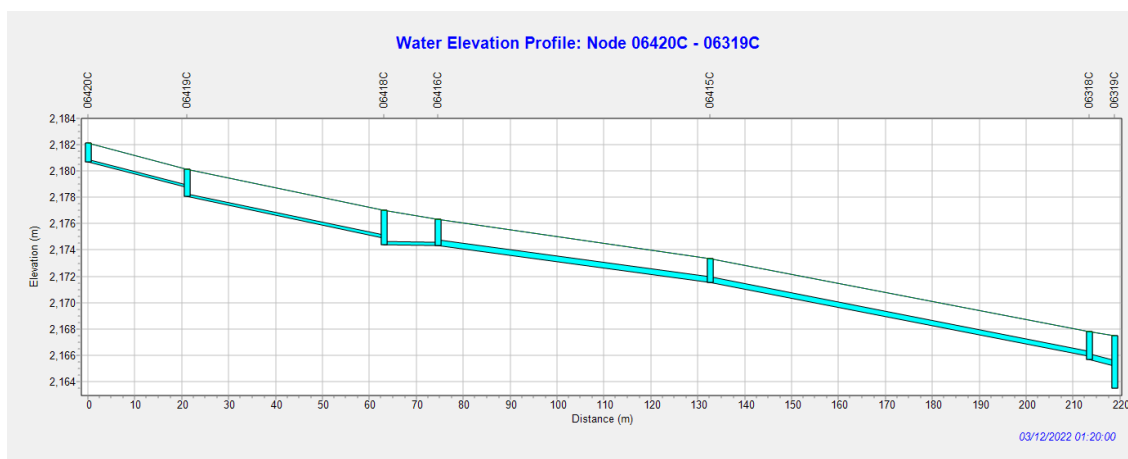
Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 4

Cámara	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
#	100	50	25	10	5
06419C	72.27-10-1:20	57.97-10-1:20	43.01-10-1:20	20.25-5-1:20	9.38-5-1:20

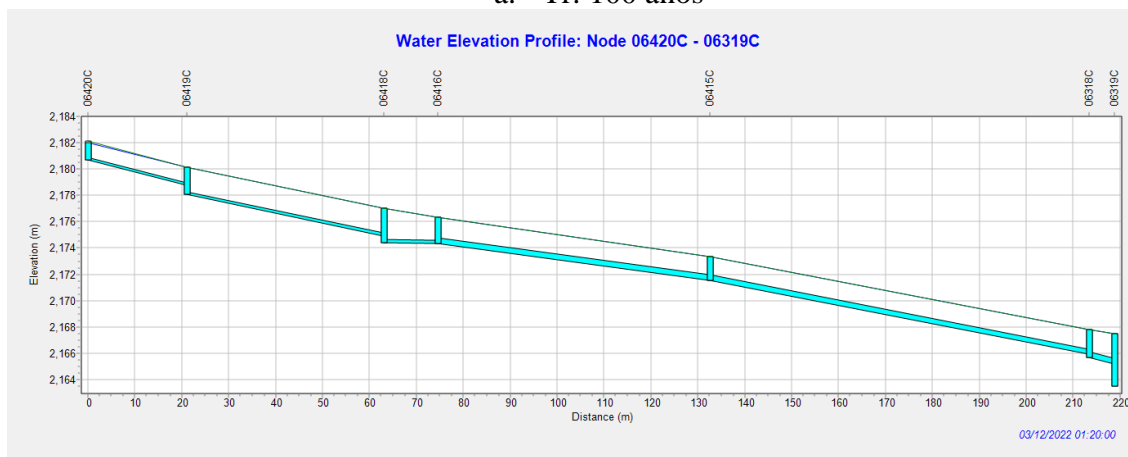
Cámara	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
06418C	15.58-10-1:20	12.58-10-1:20	12.58-10-1:20	12.58-10-1:20	12.58-10-1:20
06416C	147.58-20-1:20	130.95-15-1:20	115.83-15-1:20	93.17-10-1:20	81.33-10-1:20
06415C	182.49-20-1:20	159.20-15-1:20	138.12-15-1:20	106.70-10-1:20	90.41-10-1:20
06318C	179.89-25-1:20	165.78-20-1:20	152.97-15-1:20	135.75-15-1:20	124.58-10-1:20

Figura 41

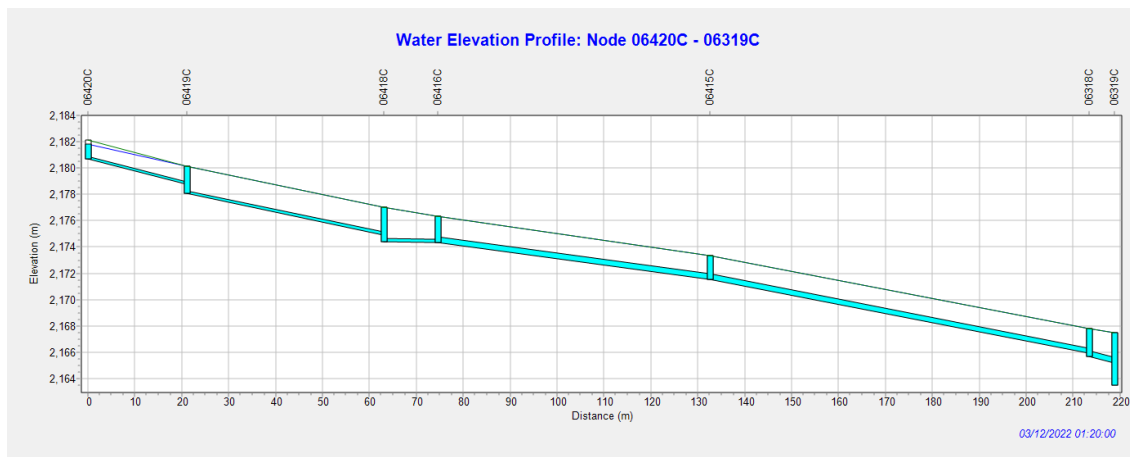
Perfiles de alcantarillado tramo 4



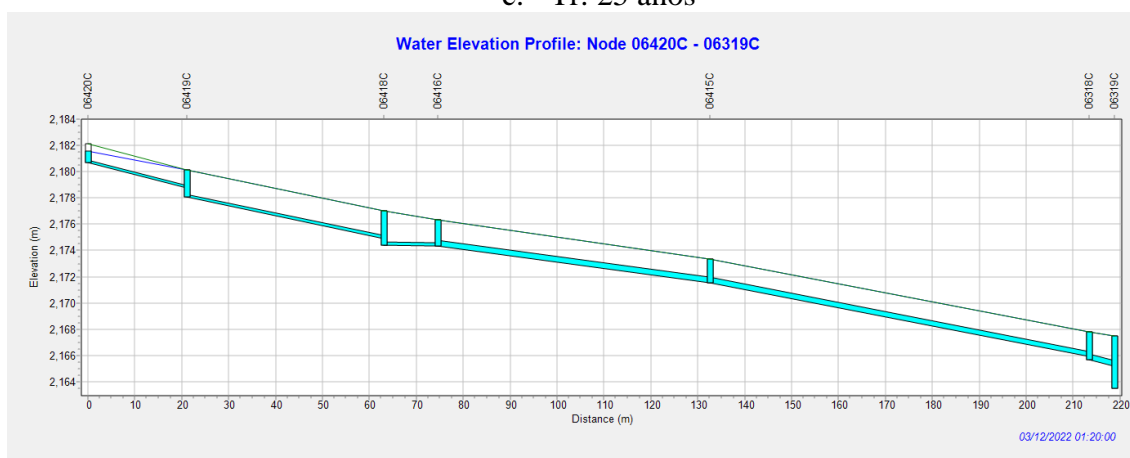
a. Tr: 100 años



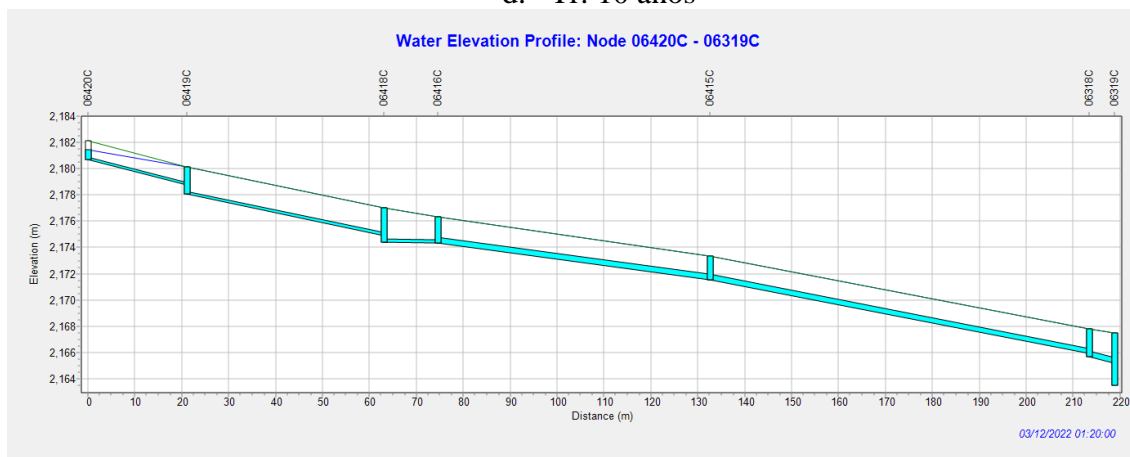
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 5 comprende 9 cámaras, sin embargo, la cámara 06319C se ha analizado en el tramo 3 y no se tendrá en cuenta. Para los periodos de retorno de 100, 50 y 25 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 30 y 25 minutos respectivamente. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos.

La Figura 42 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06294C, siendo la primera en inundarse y la última en aliviarse, presentando una inundación de 30 minutos.

En la Tabla 33 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 5.

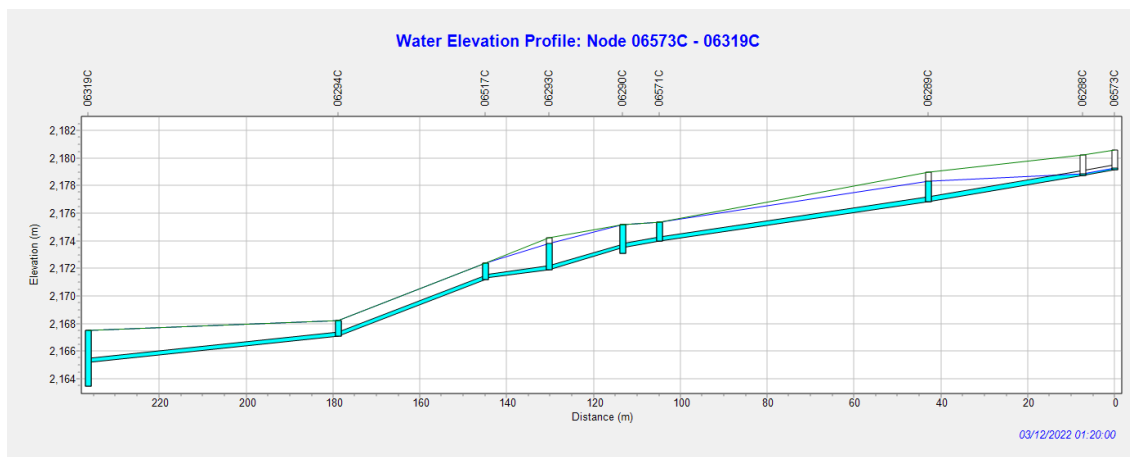
Tabla 33

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 5

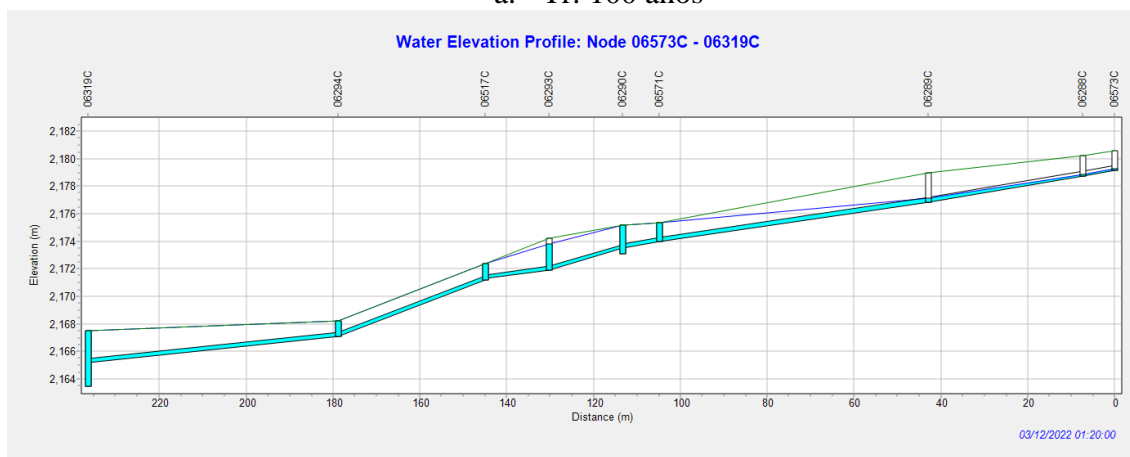
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
06571C	101.99-10-1:20	63.58-5-1:20	27.36-5-1:20	----	----
06290C	136.57-10-1:20	121.10-10-1:20	106.97-10-1:20	71.05-10-1:20	35.75-5-1:20
06517C	46.78-10-1:20	38.84-10-1:20	31.74-10-1:20	20.54-10-1:20	15.20-5-1:20
06294C	246.09-30-1:20	236.43-25-1:20	227.64-25-1:20	215.87-20-1:20	208.48-20-1:20

Figura 42

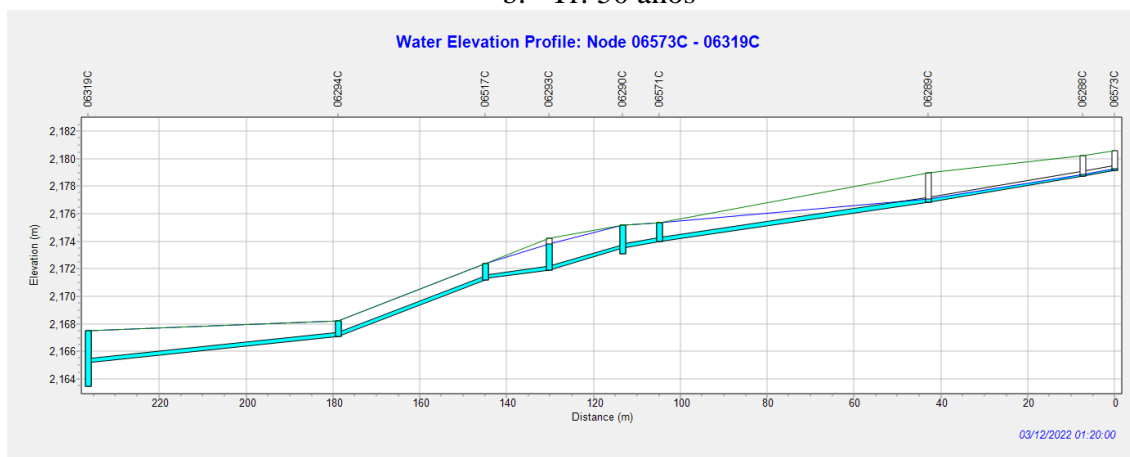
Perfiles de alcantarillado tramo 5



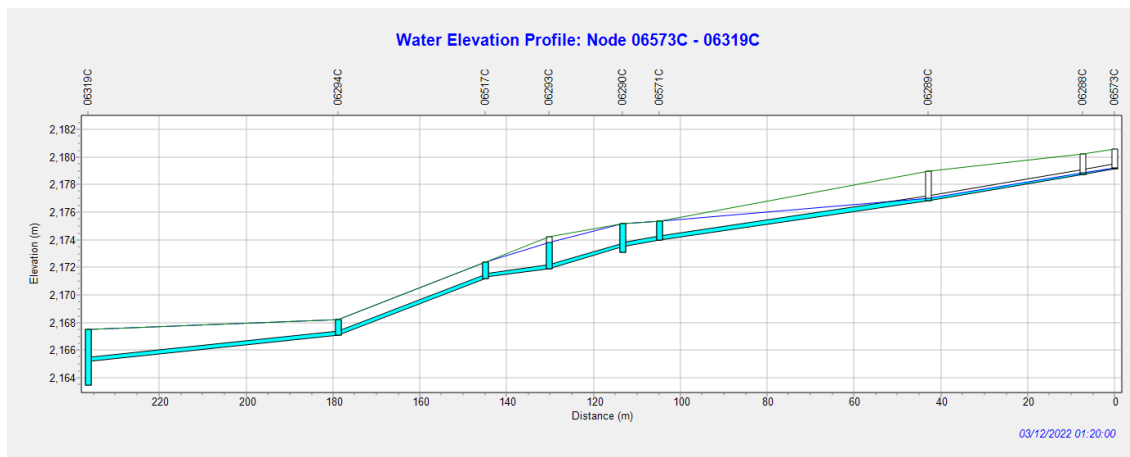
a. Tr: 100 años



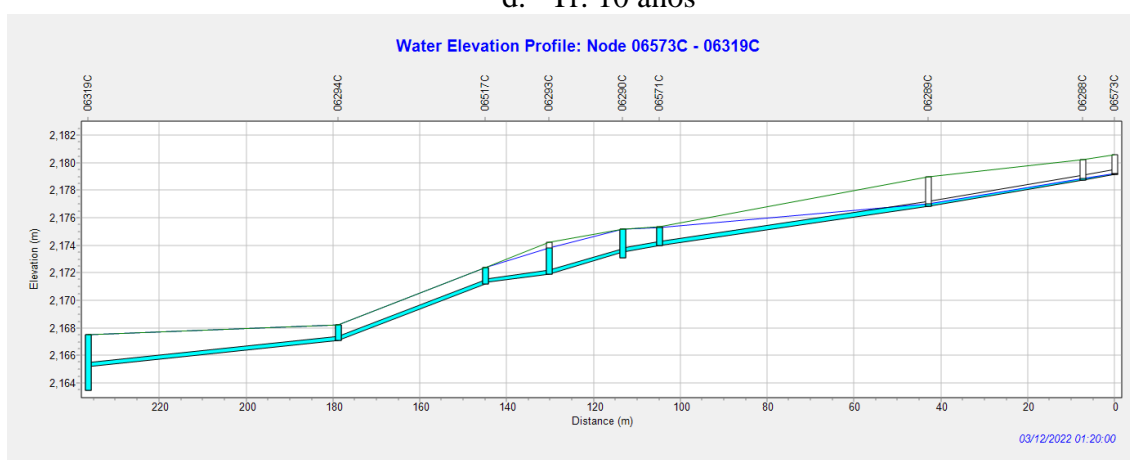
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 6 comprende 9 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 30 y 25 minutos respectivamente. Para los periodos de retorno de 25 y 10 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 25 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 1 cámara y su duración máxima es de 25 minutos.

La Figura 43 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06324C, primera en presentarse inundación y última en aliviarse, estando aproximadamente 30 minutos inundada.

En la Tabla 34 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 6.

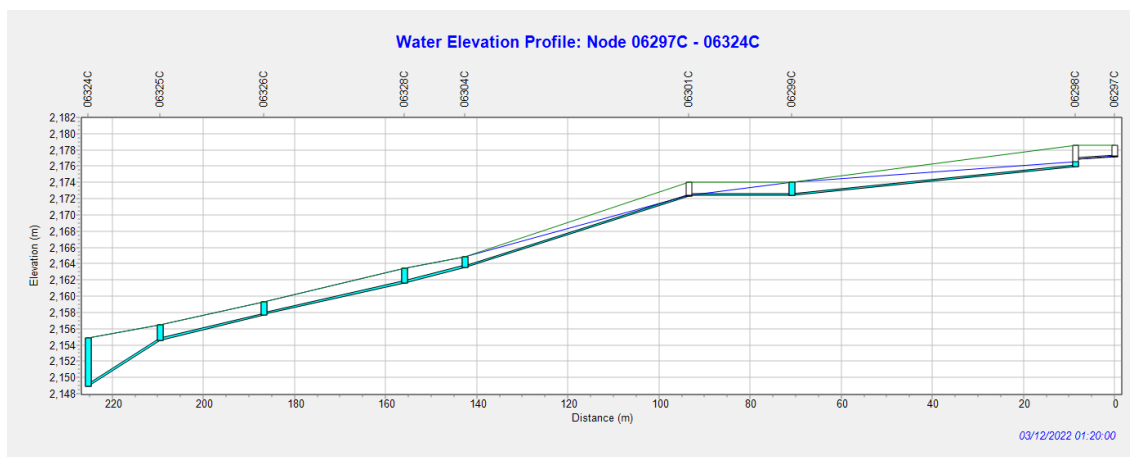
Tabla 34

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 6

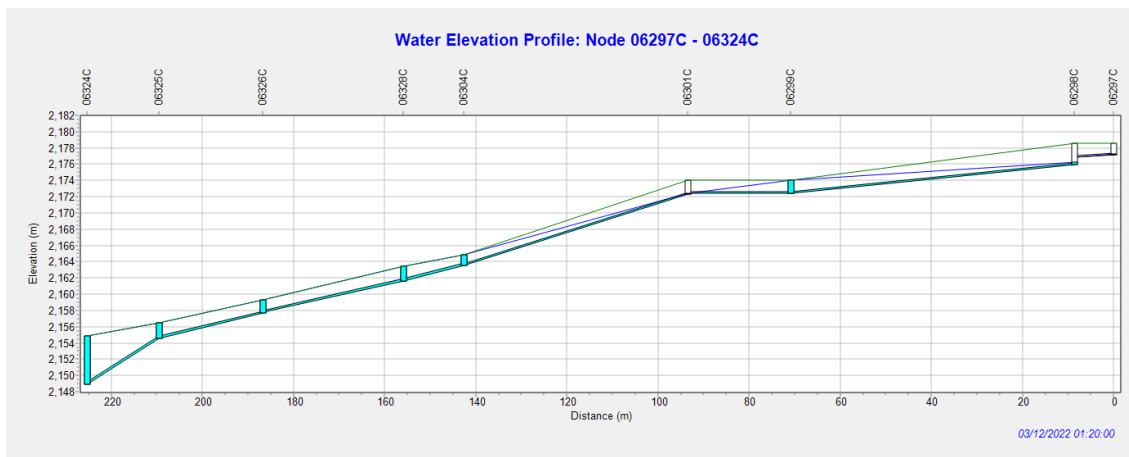
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
06299C	26.92-10-1:20	19.97-10-1:20	17.71-10-1:20	4.73-5-1:20	----
06304C	19.12-5-1:20	0.11-5-1:20	----	----	----
06328C	24.29-5-1:20	18.25-5-1:20	----	----	----
06326C	8.13-5-1:20	8.13-5-1:20	----	----	----
06325C	47.0-15-1:20	47.00-10-1:20	42.38-10-1:20	14.39-5-1:20	----
06324C	995.31-30-1:20	974.78-25-1:20	950.57-25-1:20	913.43-25-1:20	874.92-25-1:20

Figura 43

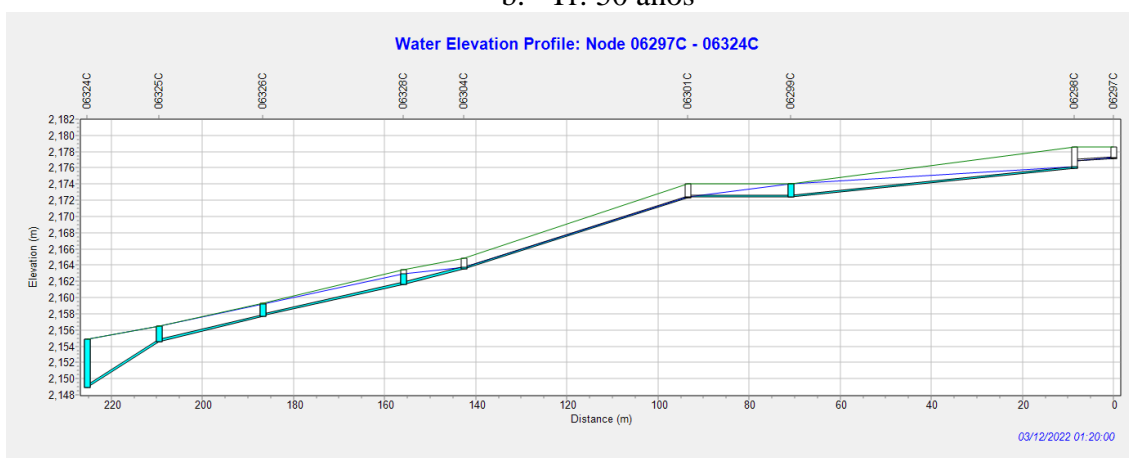
Perfiles de alcantarillado tramo 6



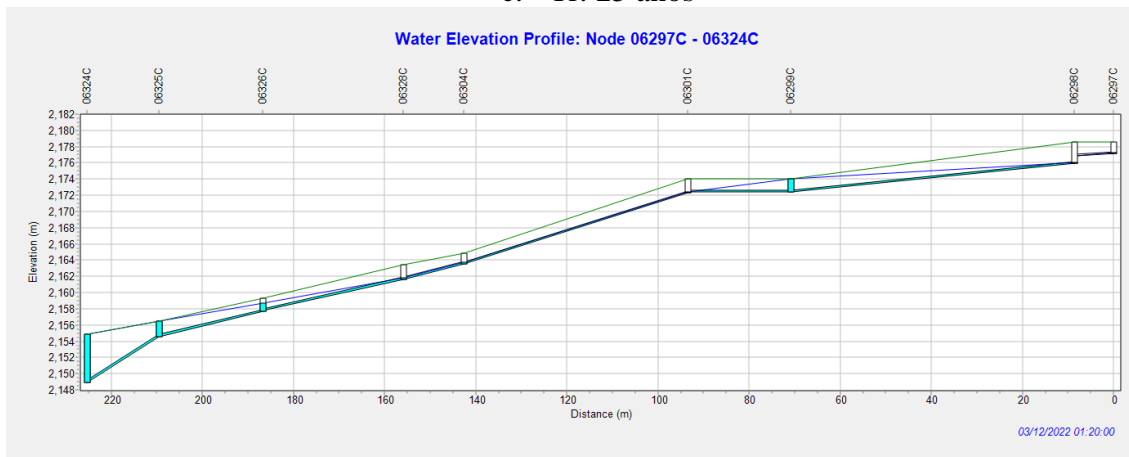
a. Tr: 100 años



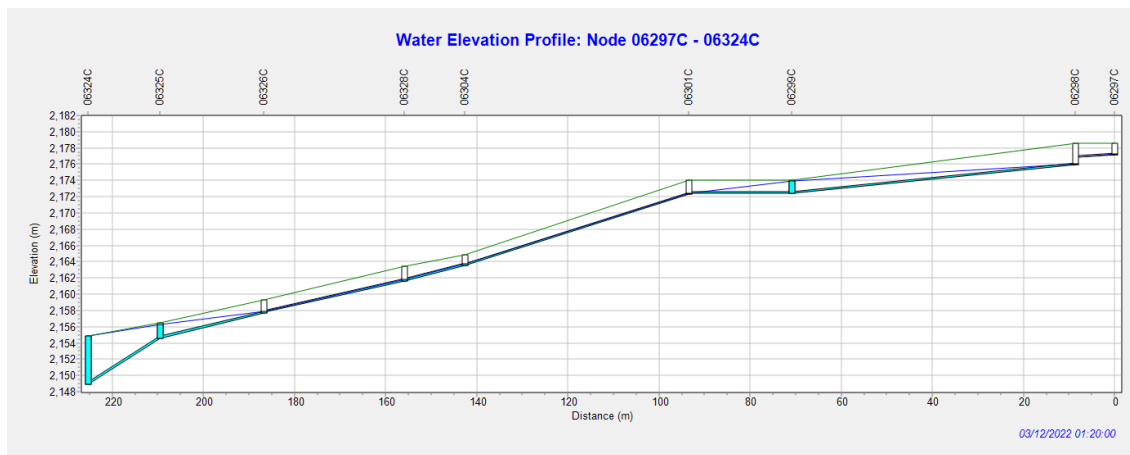
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 7 comprende 12 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en todas las cámaras y su duración máxima es de 25 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 11 cámaras y su duración es de 25 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 9 cámaras y su duración máxima es de 25 y 20 minutos.

La Figura 44 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras más críticas son las 06270C, 06082C y 06002, donde la primera presenta el mayor caudal pico y la tercera presenta una disminución de su caudal pico muy leve.

En la Tabla 35 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 7.

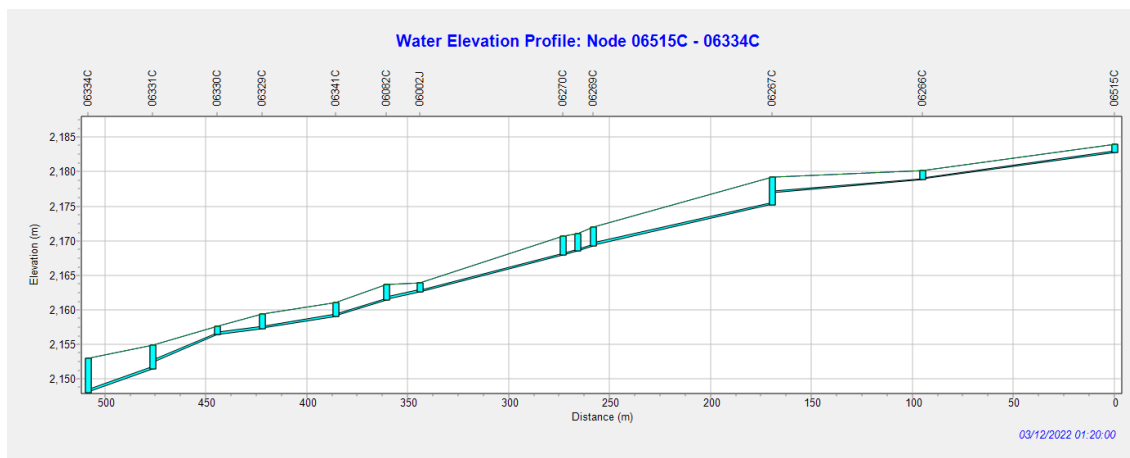
Tabla 35

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 7

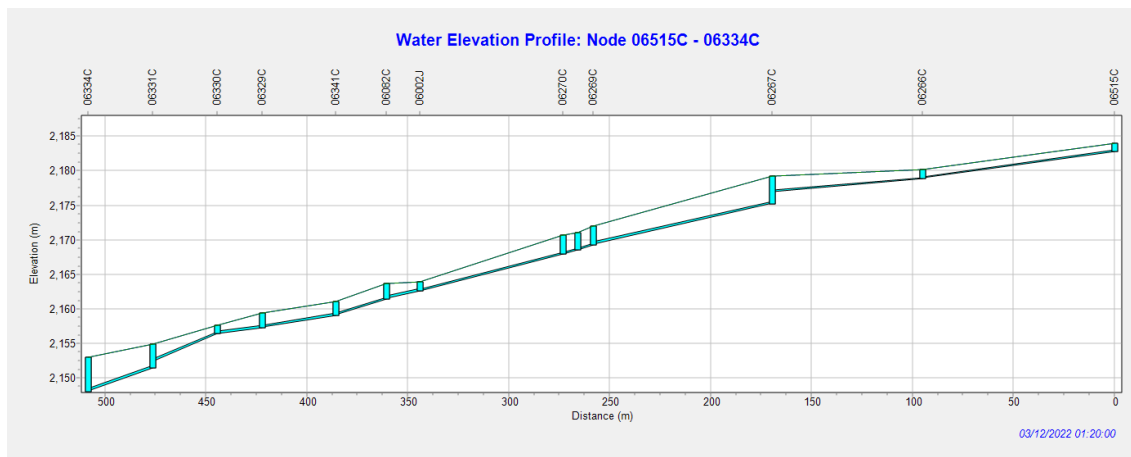
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
06515C	17.09-10-1:20	10.28-5-1:20	3.97-5-1:20	----	----
06266C	115.96-20-1:20	105.52-20-1:20	96.03-20-1:20	73.76-20-1:20	63.26-10-1:20
06267C	193.18-10-1:20	152.65-10-1:20	115.68-10-1:20	67.19-10-1:20	36.76-5-1:20
06269C	19.83-10-1:20	13.34-10-1:20	7.44-5-1:20	----	----
06001J	81.21-25-1:20	81.21-25-1:20	81.21-20-1:20	80.79-20-1:20	76.16-20-1:20
06270C	133.16-25-1:20	112.29-20-1:20	93.34-20-1:20	63.53-15-1:20	50.25-10-1:20
06002J	81.85-25-1:20	71.85-25-1:20	71.85-25-1:20	71.85-25-1:20	71.85-20-1:20
06082C	126.08-20-1:20	113.86-10-1:20	101.60-10-1:20	61.77-10-1:20	41.92-10-1:20
06341C	50.16-20-1:20	40.54-10-1:20	31.90-10-1:20	19.79-10-1:20	12.37-10-1:20
06329C	54.67-20-1:20	46.47-20-1:20	39.23-10-1:20	28.95-10-1:20	22.88-10-1:20
06331C	91.44-25-1:20	84.57-20-1:20	75.66-20-1:20	61.23-20-1:20	53.52-10-1:20
06334C	22.58-5-1:20	2.90-5-1:20	----	----	----

Figura 44

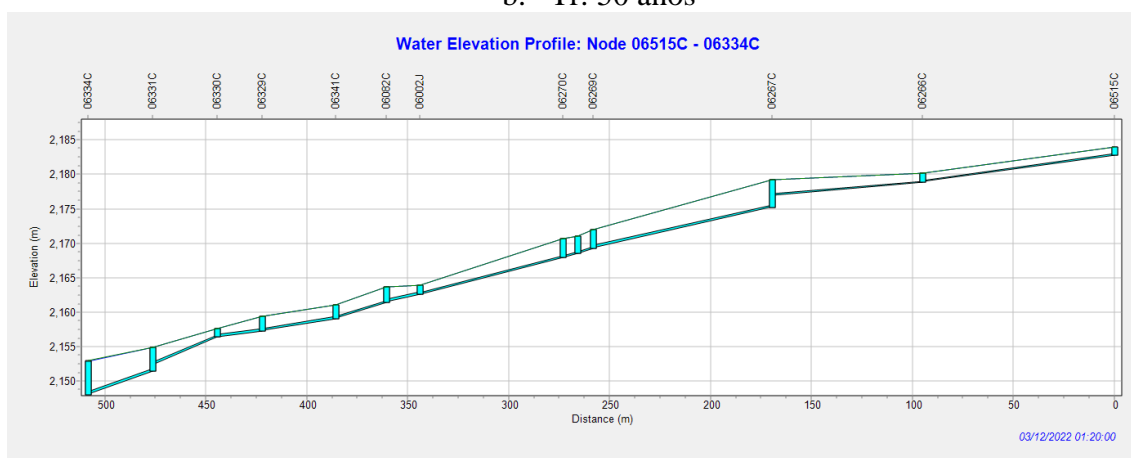
Perfiles de alcantarillado tramo 7



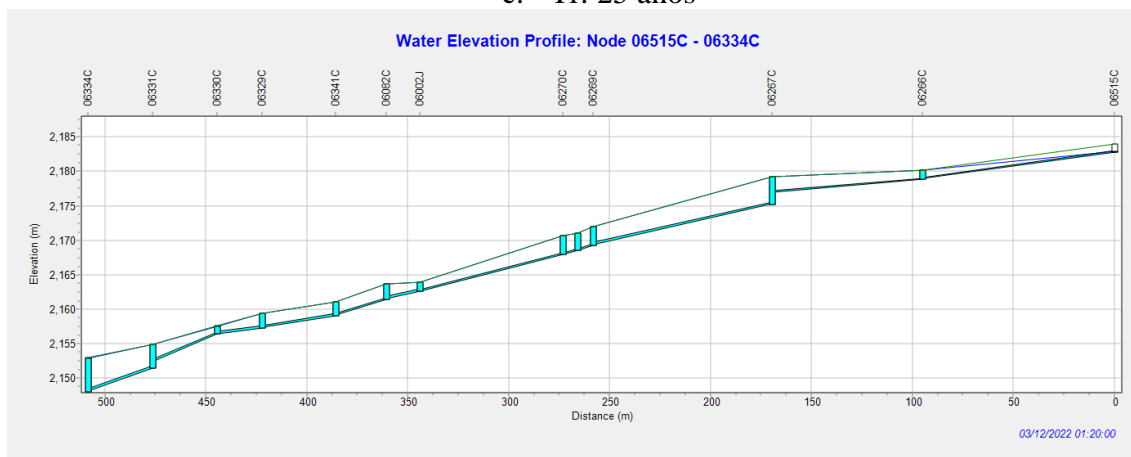
a. Tr: 100 años



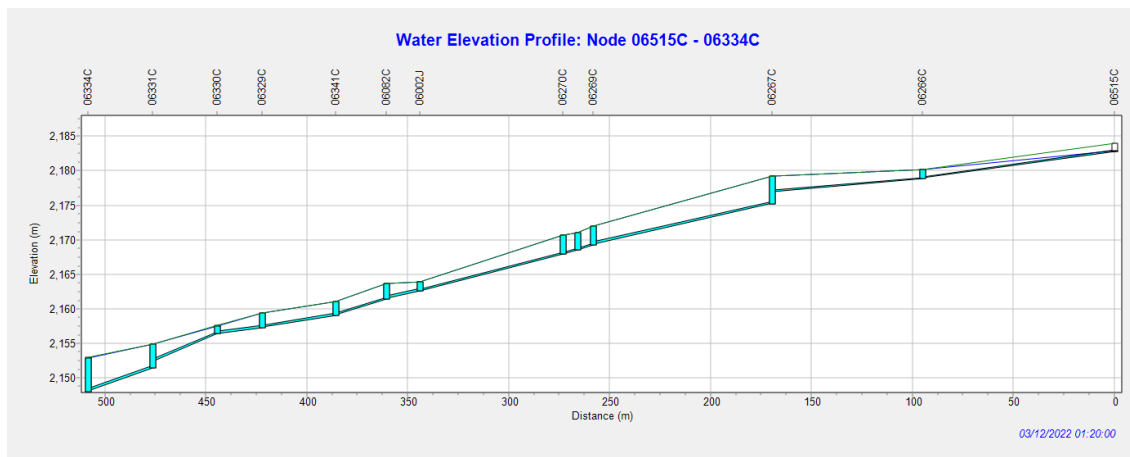
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



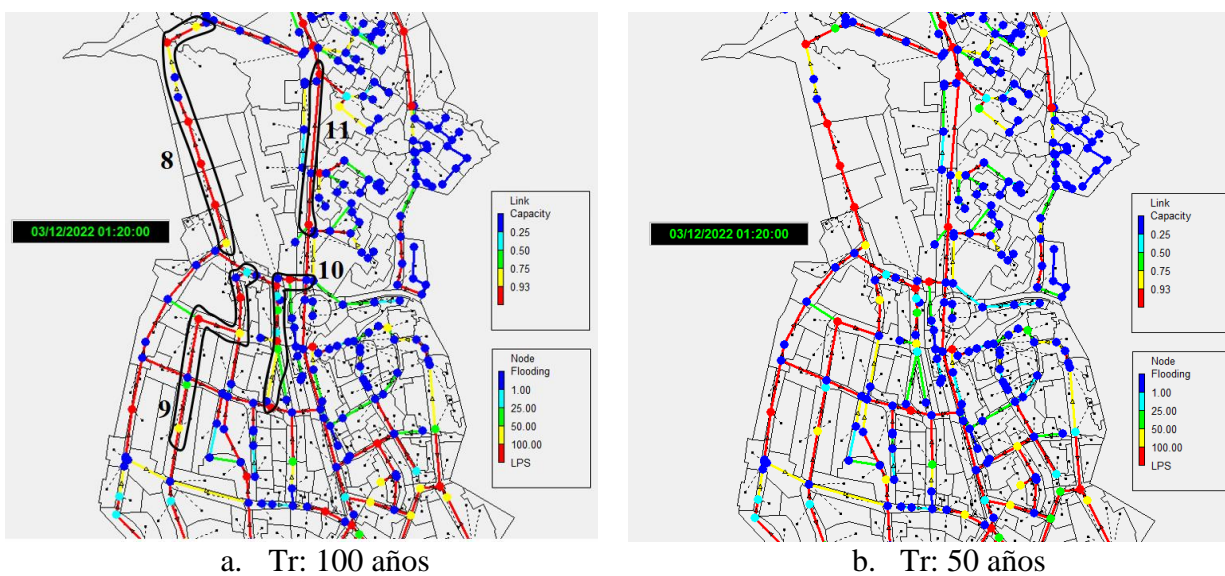
e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El sector medio se muestra en la Figura 45, en esta zona se identifican 4 tramos críticos para los diferentes periodos de retorno.

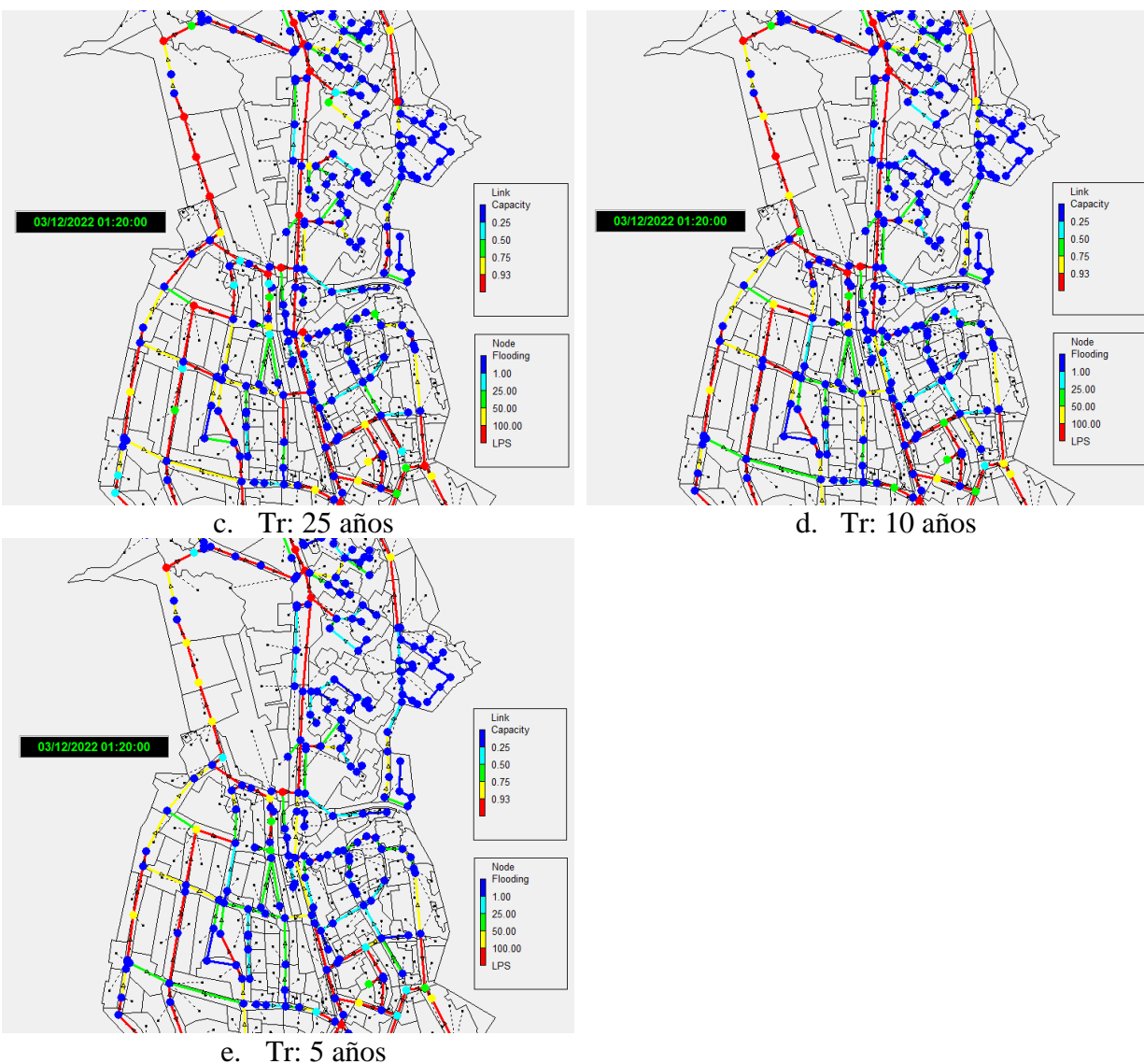
Figura 45

Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector medio



a. Tr: 100 años

b. Tr: 50 años



El tramo 8 comprende 9 cámaras, donde 6 cámaras presentan inundación para todos los periodos de retorno y su duración máxima es de 30 minutos.

La Figura 46 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06382C, primera en presentarse inundación y última en aliviarse, estando aproximadamente 30 minutos inundada.

En la Tabla 36 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 8.

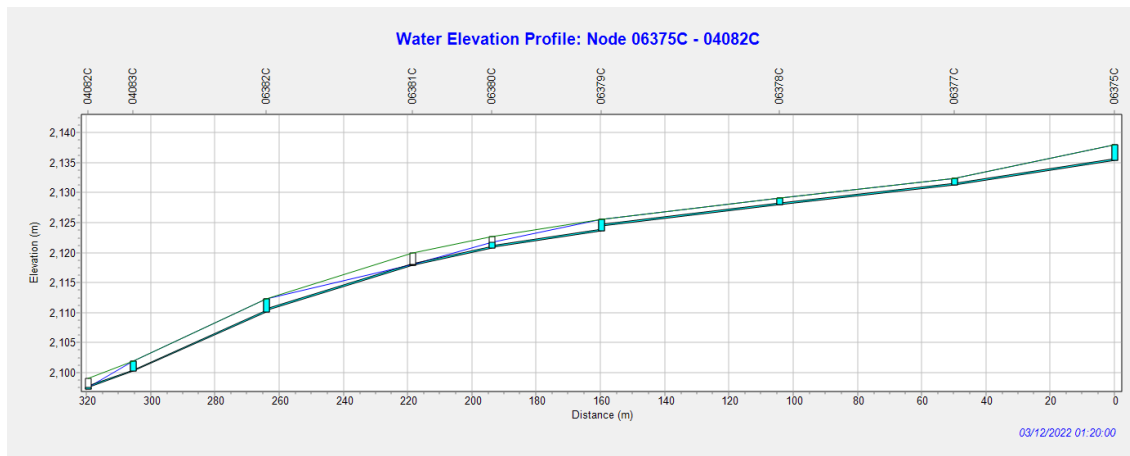
Tabla 36

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 8

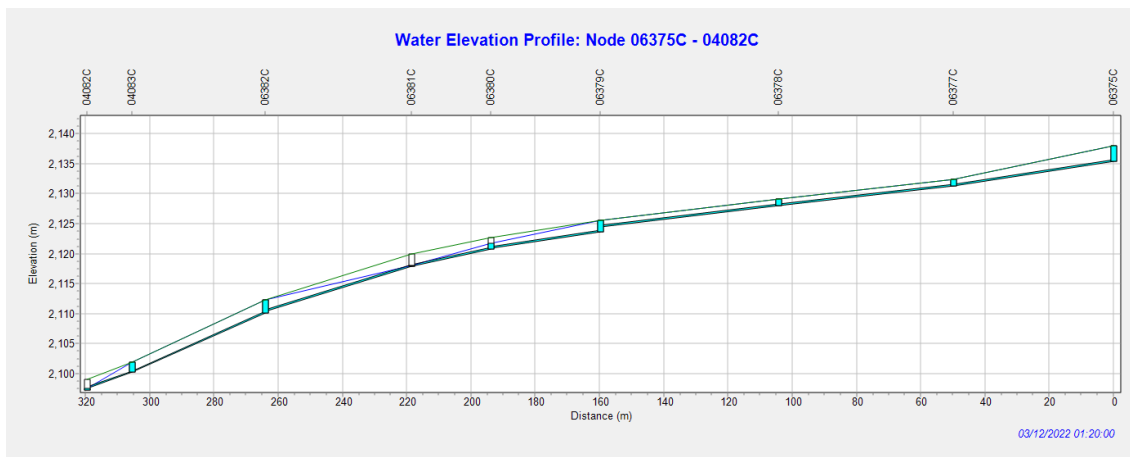
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
06375C	86.61-10-1:20	73.03-10-1:20	61.32-10-1:20	34.44-5-1:20	1.34-5-1:20
06377C	112.68-25- 1:20	106.69-20- 1:20	101.33-20- 1:20	94.88-20-1:20	89.88-10-1:20
06378C	164.45-25- 1:20	145.89-25- 1:20	129.37-25- 1:20	109.76-20- 1:20	93.76-20-1:20
06379C	175.53-25- 1:20	149.84-25- 1:20	126.90-20- 1:20	99.13-20-1:20	76.49-20-1:20
06382C	535.14-30- 1:20	478.09-30- 1:20	426.75-30- 1:20	363.35-25- 1:20	313.27-25- 1:20
04083C	55.97-30-1:20	47.77-30-1:20	40.47-20-1:20	31.78-20-1:20	24.66-20-1:20

Figura 46

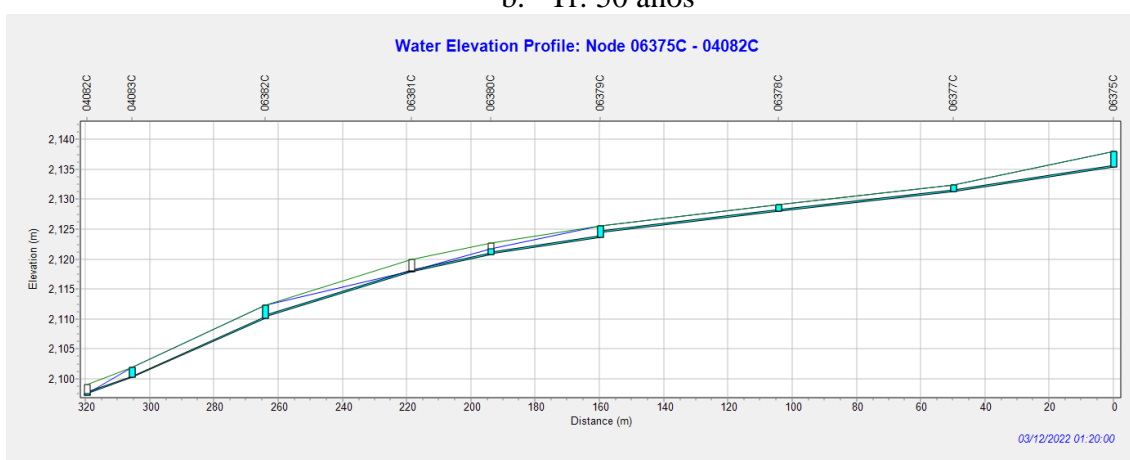
Perfiles de alcantarillado tramo 8



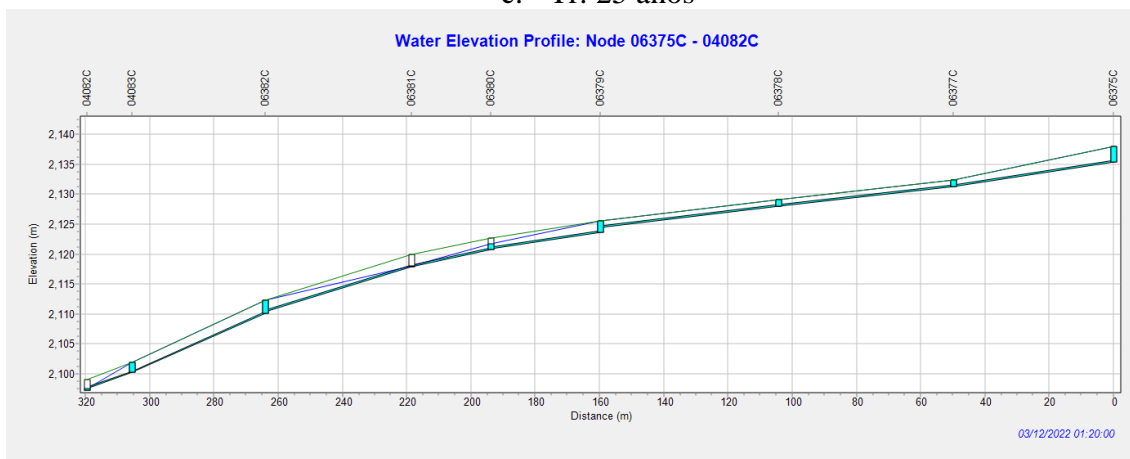
a. Tr: 100 años



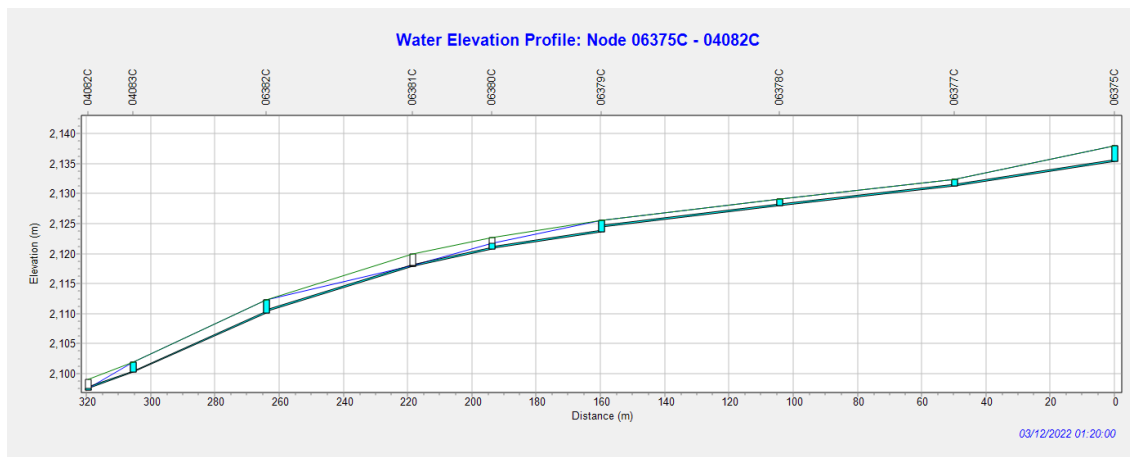
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 9 comprende 9 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 30 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 5 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 1 cámara y su duración máxima es de 20 minutos.

La Figura 47 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras más críticas son las 06270C, 06082C y 06002C, donde la primera presenta el mayor caudal pico y la tercera presenta una disminución de su caudal pico muy leve.

En la Tabla 37 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 9.

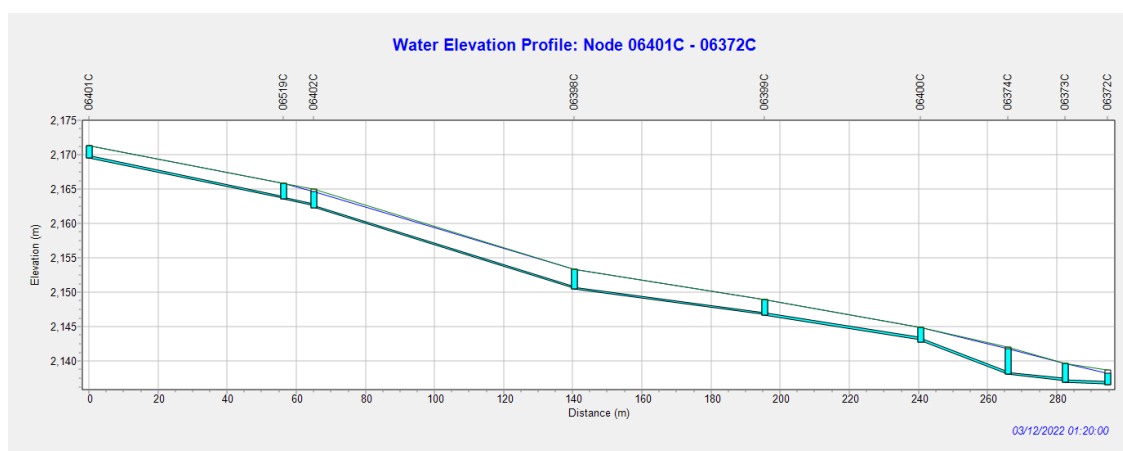
Tabla 37

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 9

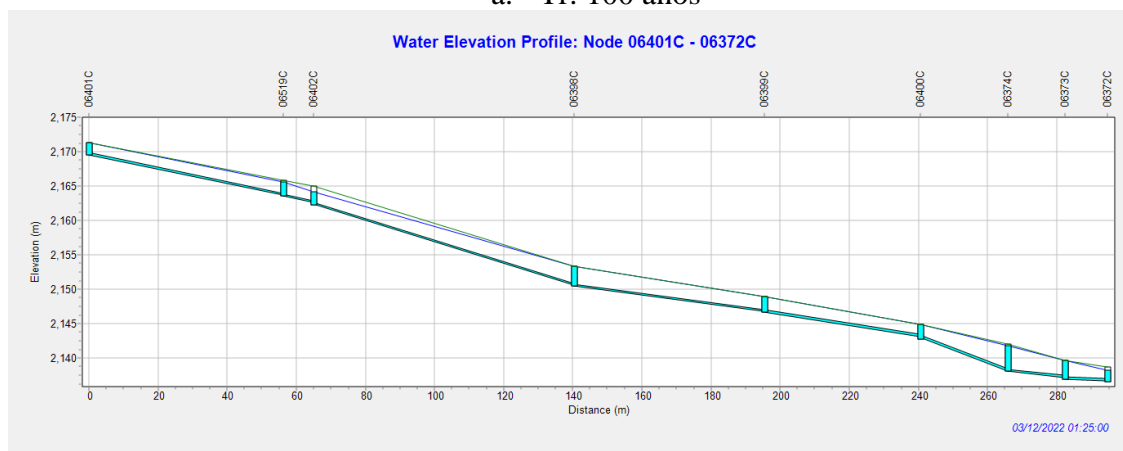
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
06401C	85.31-10-1:20	63.71-10-1:20	44.30-5-1:20	----	----
06519C	42.07-10-1:20	23.49-5-1:20	5.75-5-1:20	----	----
06398C	204.99-30-1:20	170.14-30-1:20	141.42-20-1:20	95.0-20-1:20	76.93-20-1:20
06399C	69.51-10-1:20	28.42-5-1:25	----	----	----
06400C	108.66-10-1:20	57.84-10-1:20	22.86-5-1:20	----	----
06373C	19.64-10-1:20	15.68-10-1:20	14.95-5-1:20	----	----

Figura 47

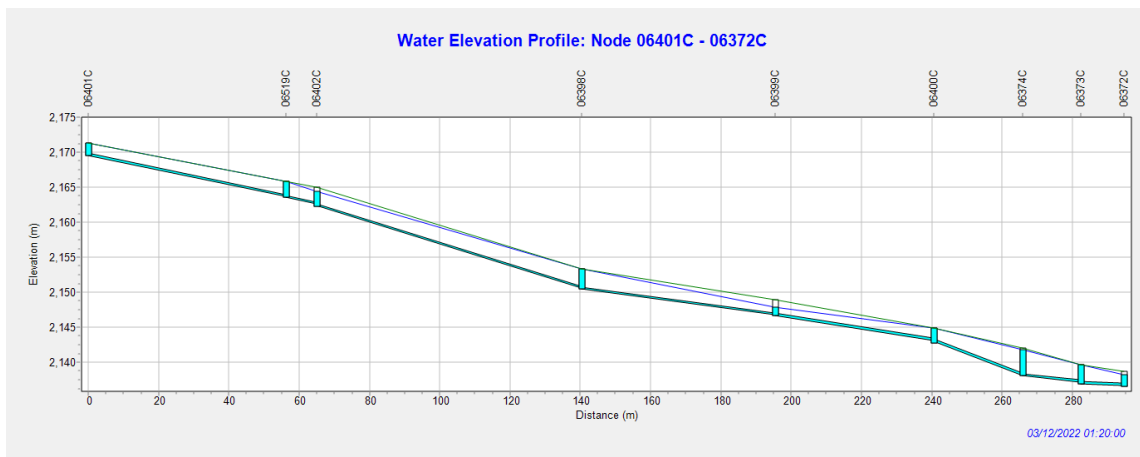
Perfiles de alcantarillado tramo 9



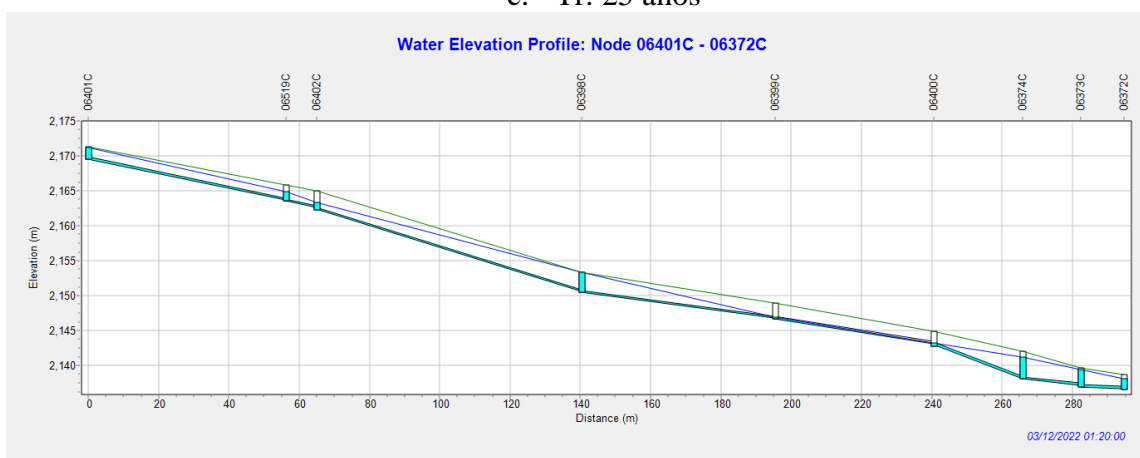
a. Tr: 100 años



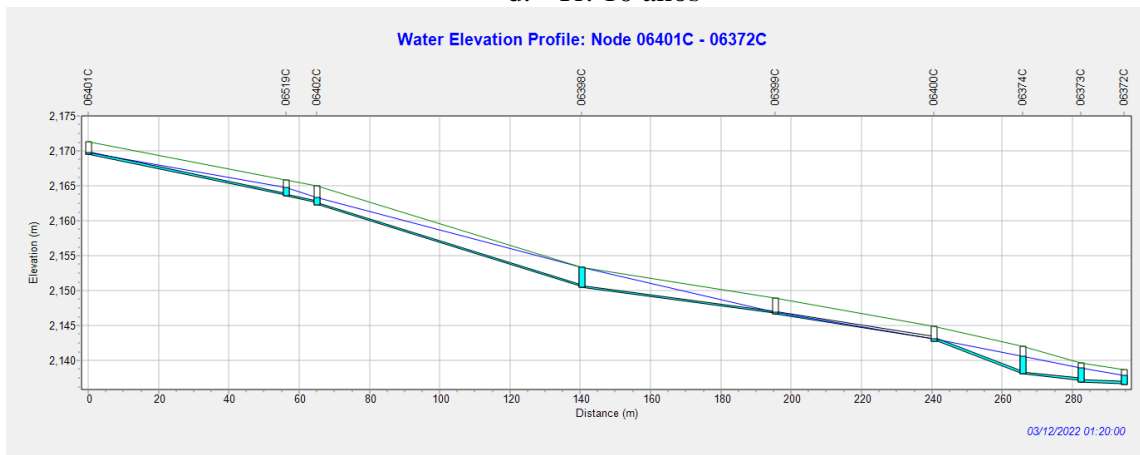
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 10 comprende 10 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 7 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 15 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 48 enseña la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras más críticas son la 06353C y la 06355C, donde la primera presenta el mayor caudal pico y disminuye el caudal pico muy leve.

En la Tabla 38 se relaciona el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 10.

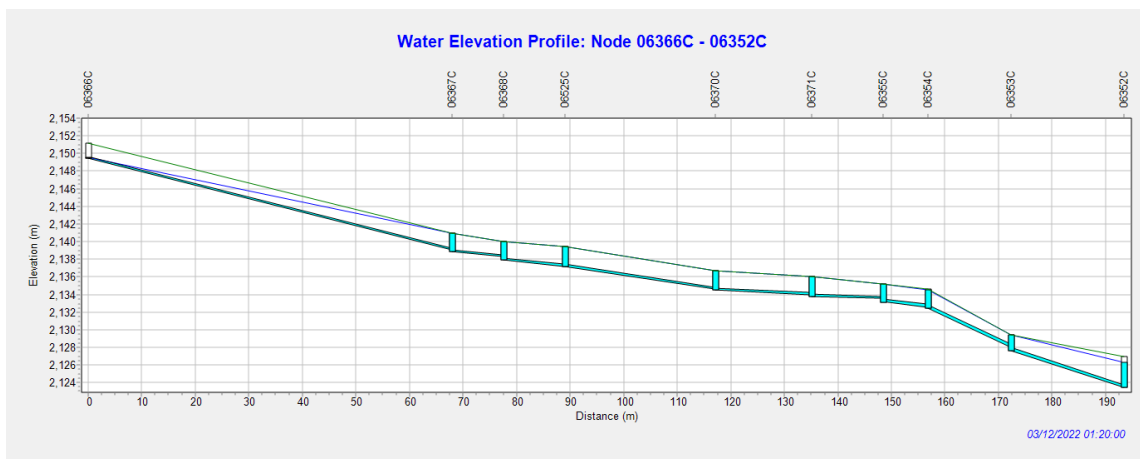
Tabla 38

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 10

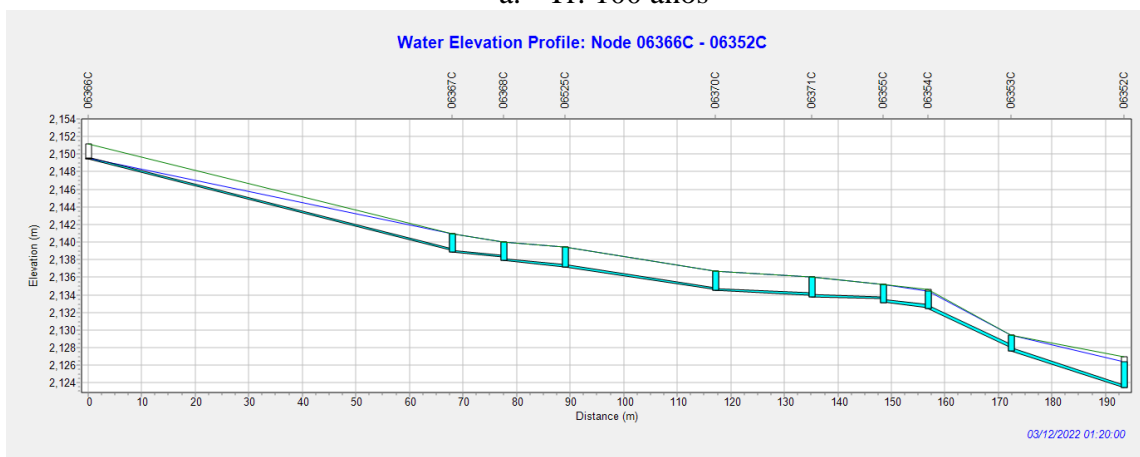
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
06367C	35.48-5-1:20	17.47-5-1:20	1.26-5-1:20	----	----
06368C	105.85-15-1:20	98.95-10-1:20	89.80-10-1:20	54.23-10-1:20	32.65-10-1:20
06525C	6.10-5-1:20	0.90-5-1:20	----	----	----
06370C	46.91-15-1:20	46.91-15-1:20	46.09-10-1:20	43.59-10-1:20	41.73-10-1:20
06371C	8.52-10-1:20	5.37-5-1:20	2.60-5-1:20	----	----
06355C	250.17-10-1:20	209.61-10-1:20	173.13-10-1:20	114.24-10-1:20	64.17-5-1:20
06353C	252.93-20-1:20	244.62-15-1:20	229.76-15-1:20	187.57-10-1:25	141.27-10-1:20

Figura 48

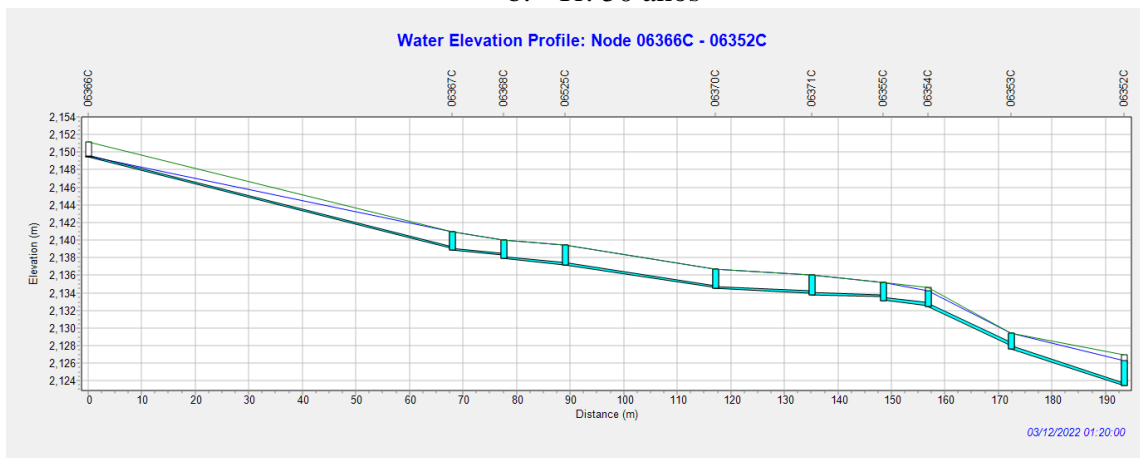
Perfiles de alcantarillado tramo 10



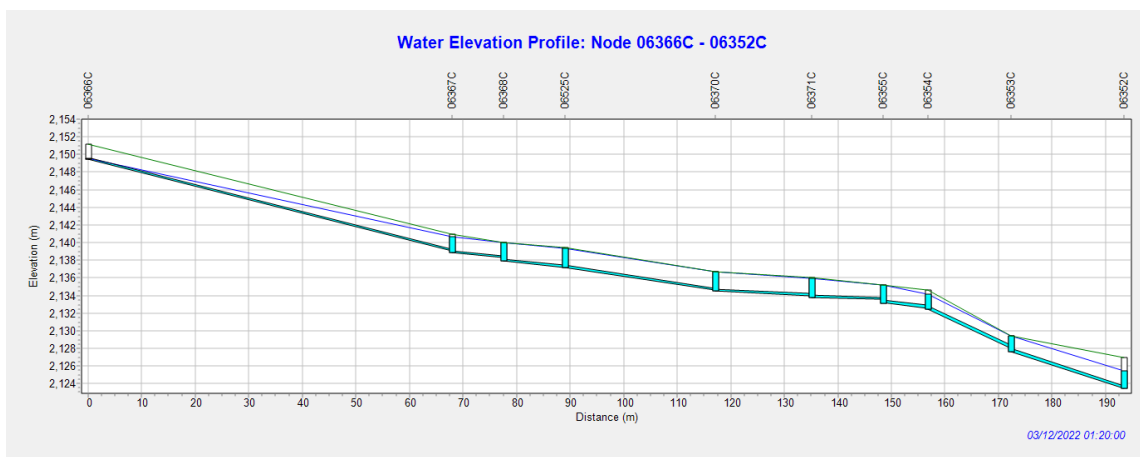
a. Tr: 100 años



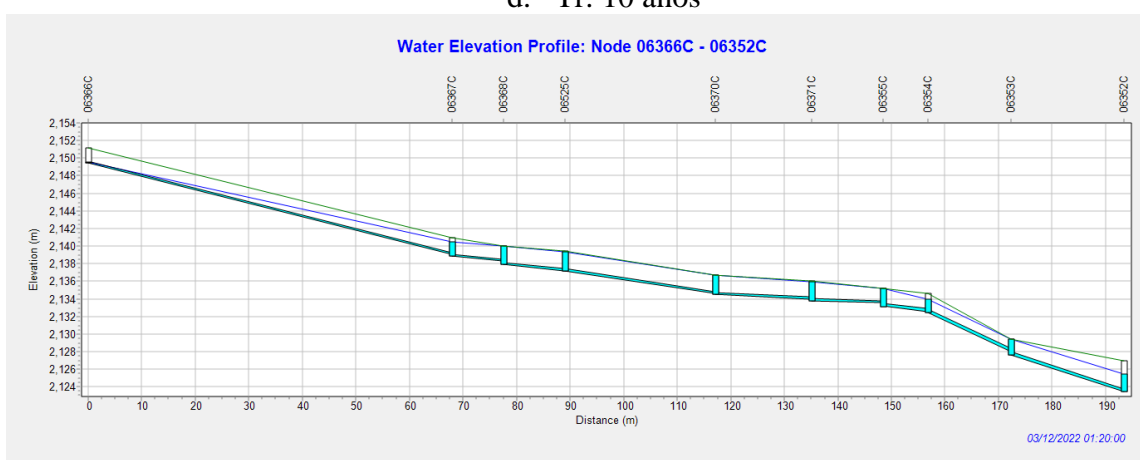
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 11 comprende 5 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100, 50, 25 y 10 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 2 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 49 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 06030C, disminuyendo levemente su caudal pico.

En la Tabla 39 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 11.

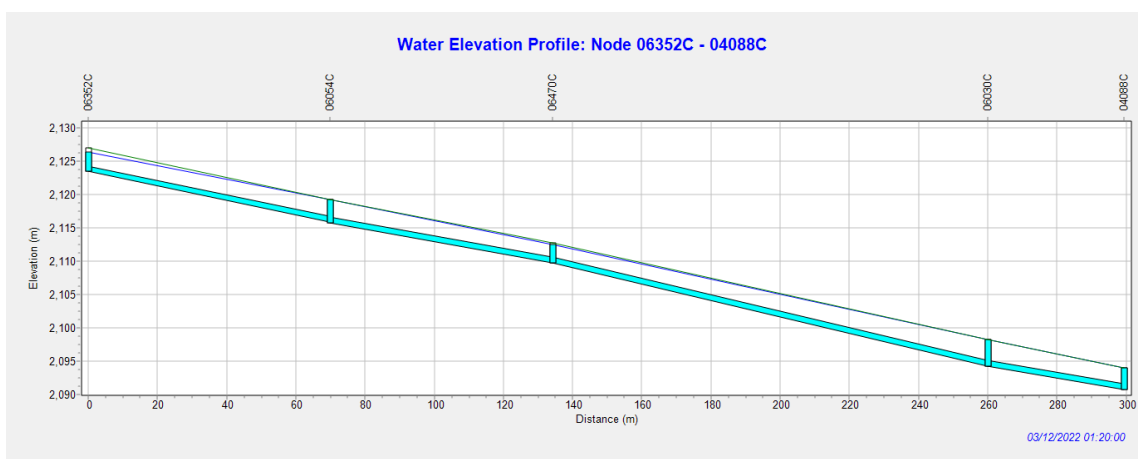
Tabla 39

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 11

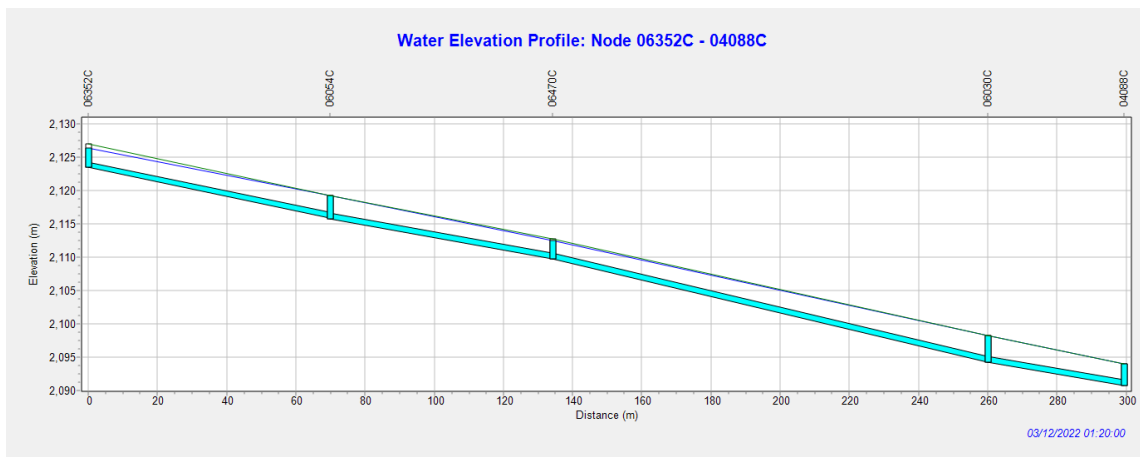
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
06054C	216.93-15- 1:20	189.42-10- 1:20	112.66-10- 1:20	6.79-5-1:20	----
06030C	565.56-20- 1:20	525.0-15-1:20	483.85-15- 1:20	444.69-15- 1:20	317.52-10- 1:20
04088C	434.70-20- 1:20	399.28-15- 1:20	367.20-15- 1:20	322.96-15- 1:20	296.47-10- 1:20

Figura 49

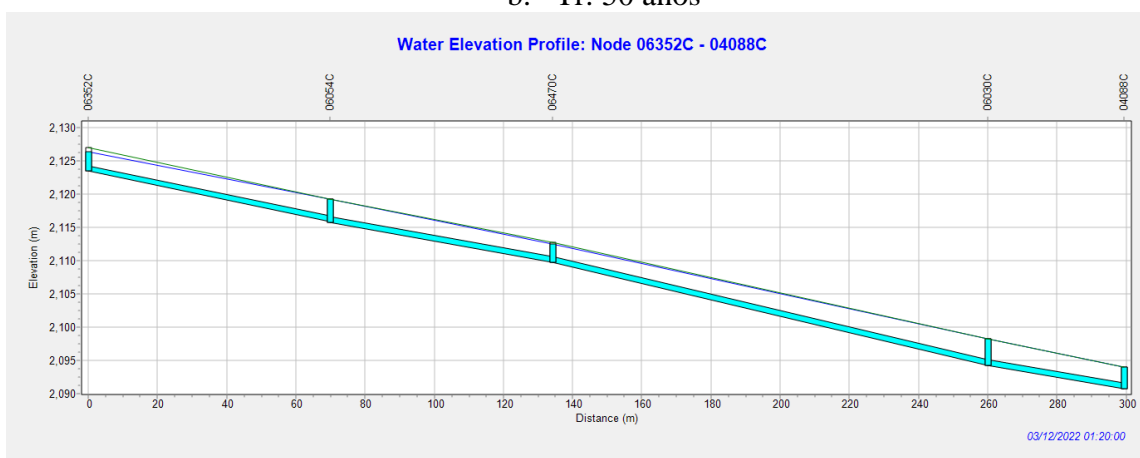
Perfiles de alcantarillado tramo 11



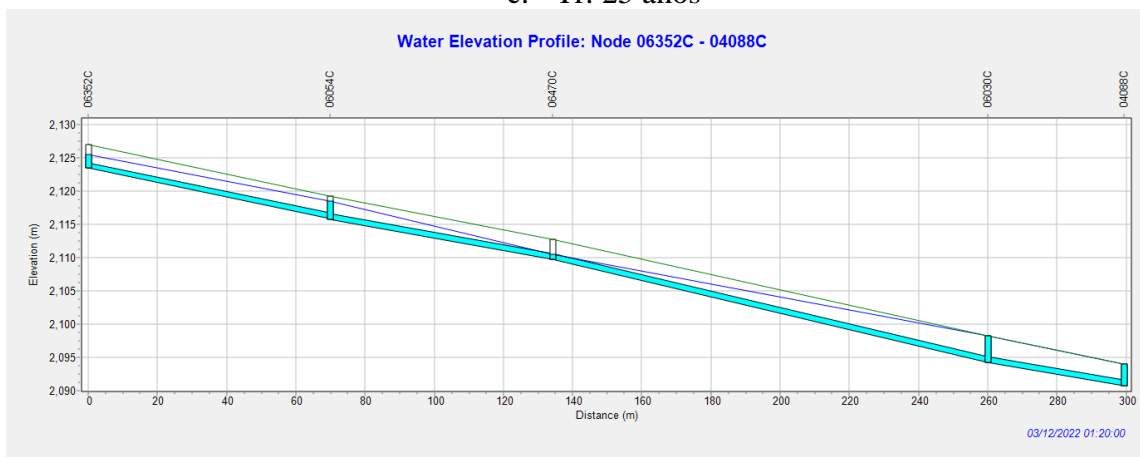
a. Tr: 100 años



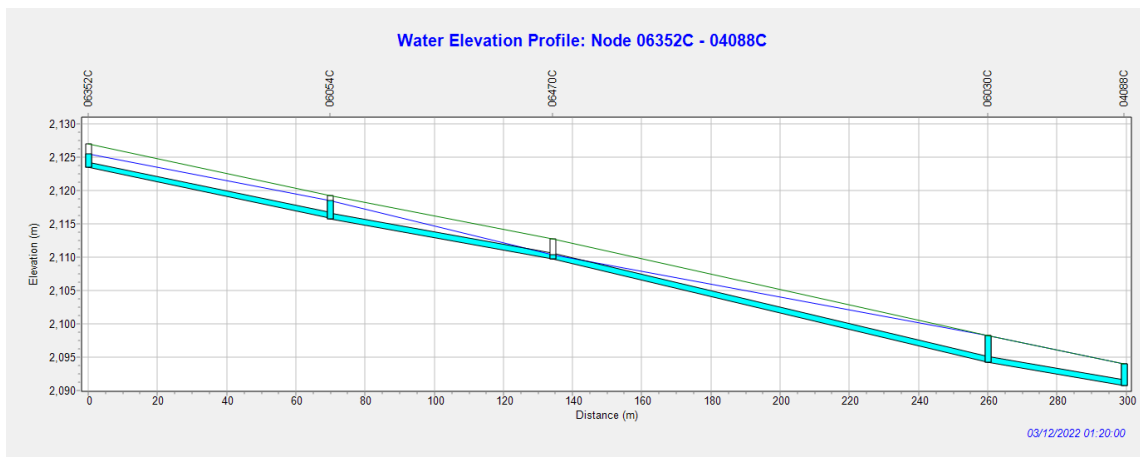
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



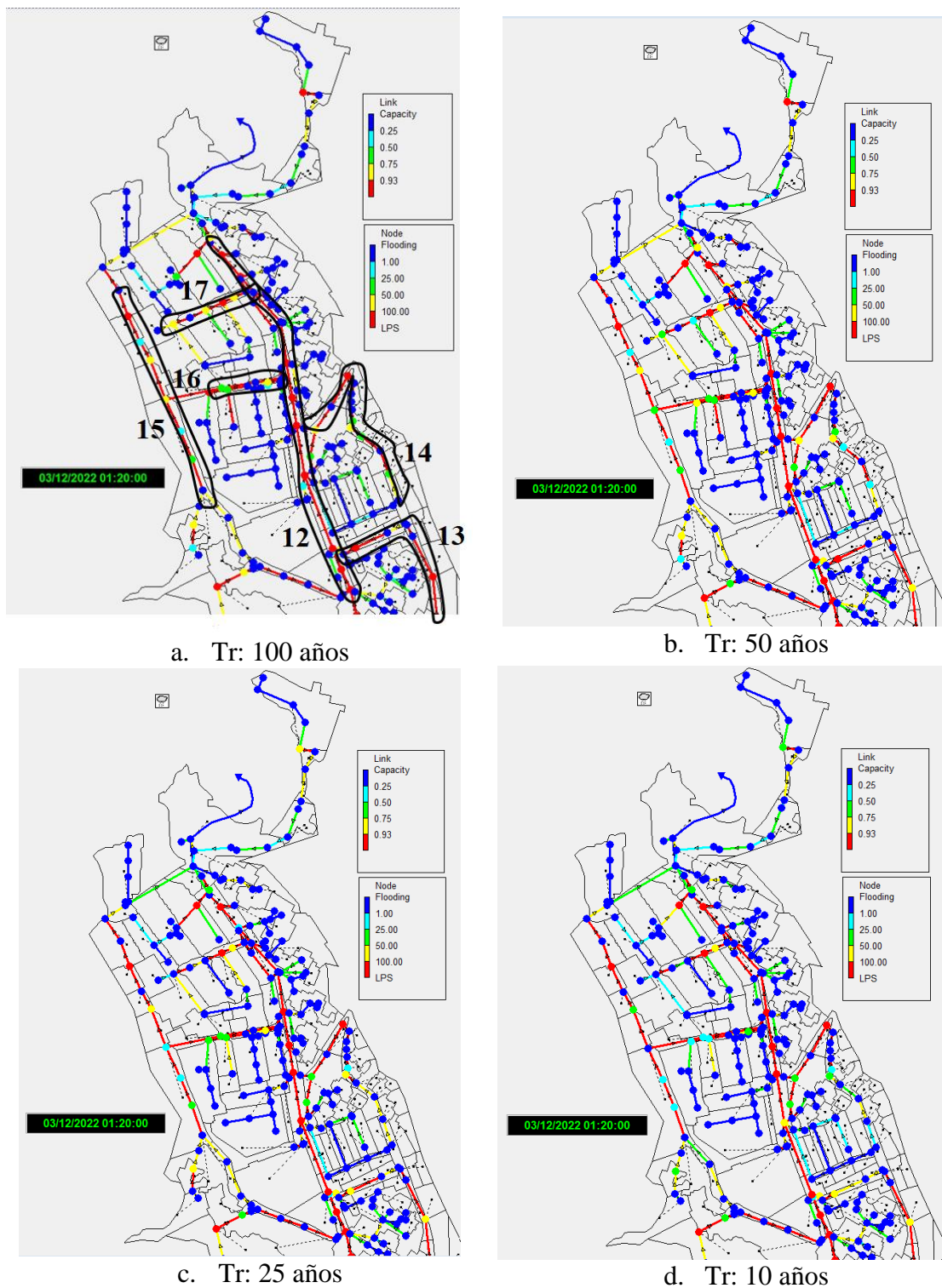
e. Tr: 5 años

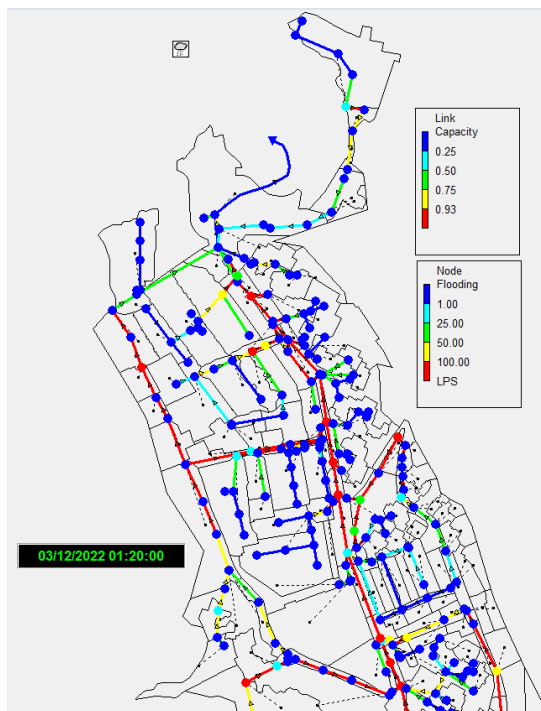
Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

La parte denominada como sector bajo se enseña en la Figura 50, en esta zona se identifican 6 tramos críticos para los diferentes periodos de retorno.

Figura 50

Capacidad de los conductos e inundación de cámaras en el sector bajo





e. Tr: 5 años

El tramo 12 comprende 12 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100, 50 y 25 años se presenta inundación en 9 cámaras y su duración máxima es de 30 minutos. Y para los periodos de retorno de 10 y 5 años se presenta inundación en 8 cámaras y su duración máxima es de 25 minutos.

La Figura 51 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 04112C, disminuyendo levemente su caudal pico.

En la Tabla 40 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 12.

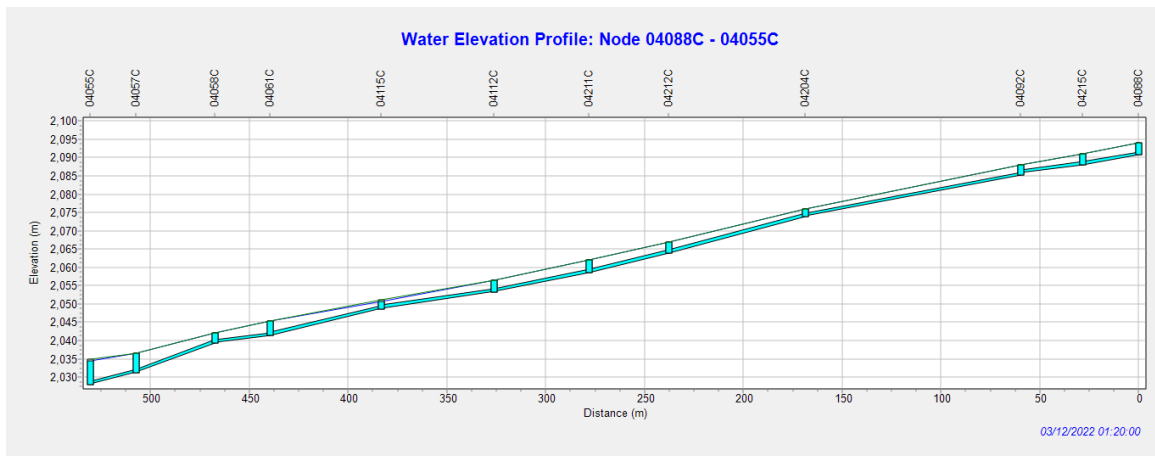
Tabla 40

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 12

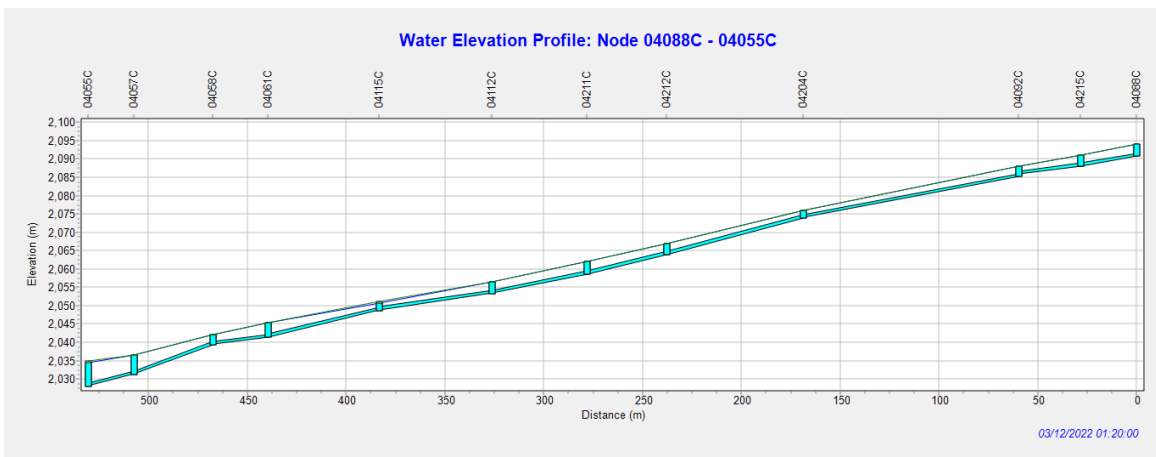
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
04088C	434.70-20-1:20	399.28-15-1:20	367.20-15-1:20	322.96-15-1:20	296.47-10-1:20
04215C	155.61-20-1:20	155.61-15-1:20	155.61-15-1:20	155.61-15-1:25	155.61-10-1:25
04092C	229.31-20-1:20	208.74-15-1:20	187.34-15-1:20	150.82-15-1:20	135.71-10-1:20
04204C	368.42-10-1:20	255.37-10-1:20	213.02-10-1:20	93.23-5-1:20	1.99-5-1:20
04212C	883.80-25-1:20	821.18-25-1:20	764.77-25-1:20	694.09-20-1:20	639.11-15-1:20
04211C	110.89-25-1:20	108.18-25-1:20	105.75-25-1:20	120.90-20-1:20	100.57-15-1:20
04112C	1118.74-25-1:20	1060.99-25-1:20	1005.83-25-1:20	924.39-25-1:20	868.48-20-1:20
04058C	125.55-10-1:20	71.63-5-1:20	21-5-1:20	----	----
04057C	766.28-30-1:25	764.14-30-1:25	770.34-25-1:20	753.35-25-1:20	739.19-25-1:20

Figura 51

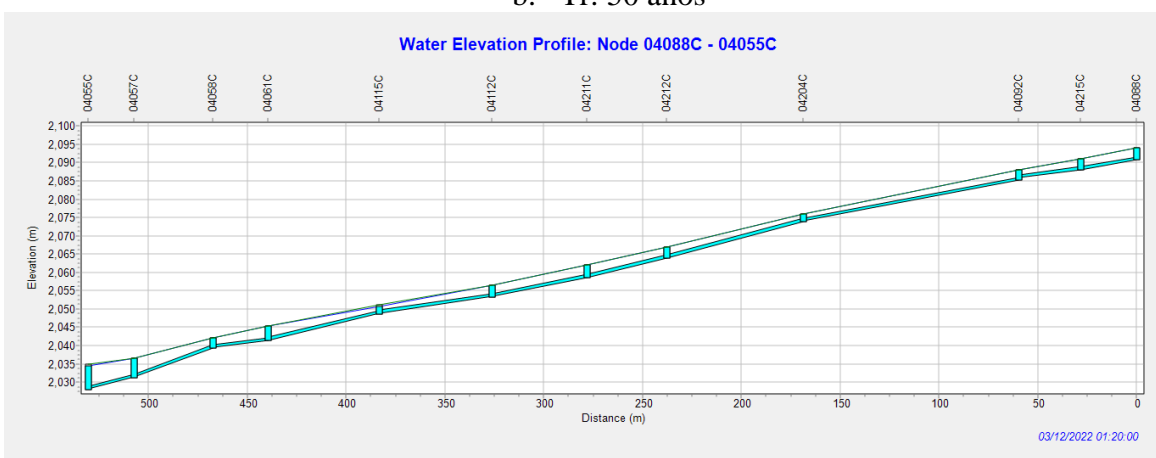
Perfiles de alcantarillado tramo 12



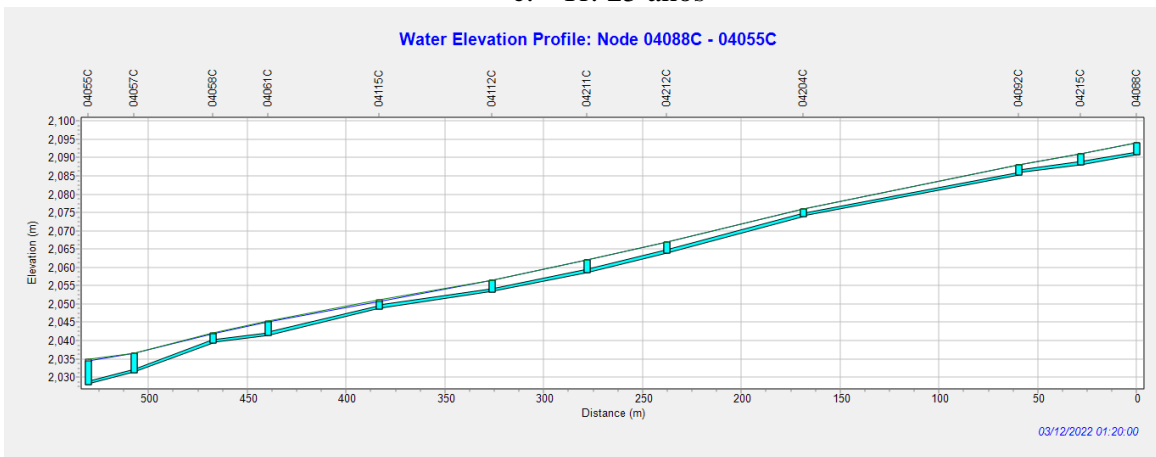
a. Tr: 100 años



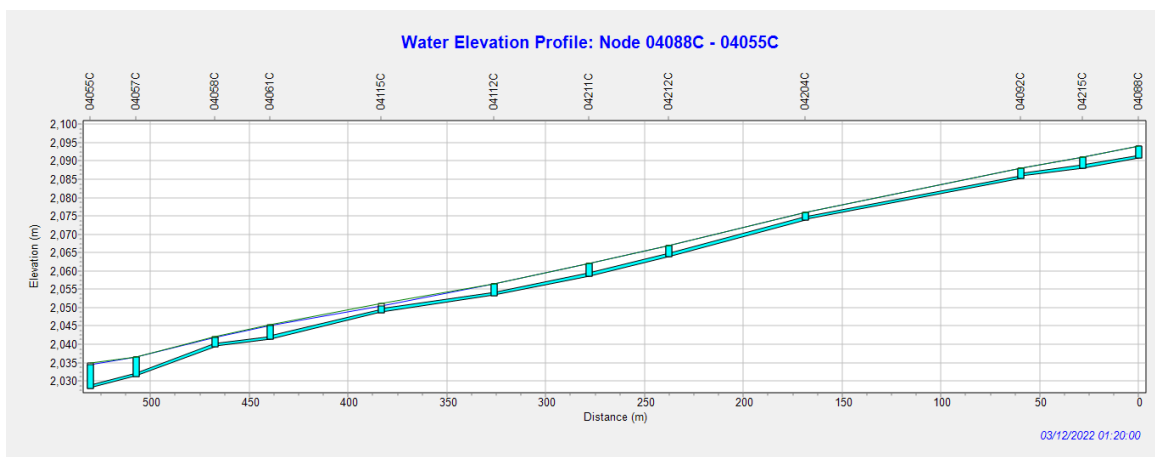
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 13 comprende 10 cámaras, sin embargo, la cámara 04092C se analizó en el perfil 12 y no se tendrá en cuenta. Periodos de retorno de 100, 50, 25 y 10 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 52 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que las cámaras críticas son la 04112C y la 04216C, la primera presentando el mayor caudal pico y la segunda disminuyendo en menor proporción su caudal pico.

En la Tabla 41 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 13.

Tabla 41

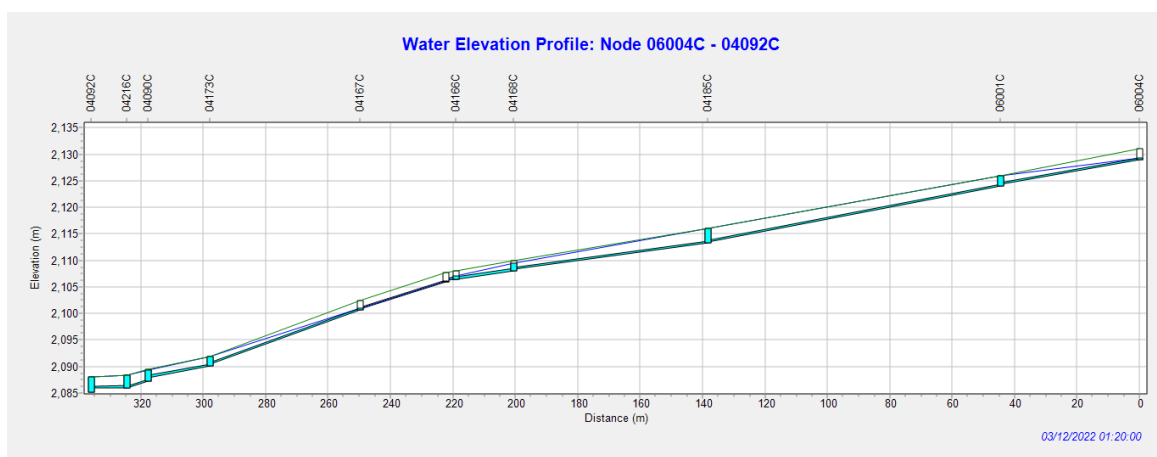
Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 13

Cámara	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
#	100	50	25	10	5
06001C	314.01-10-1:20	254.18-10-1:20	171.41-10-1:20	75.37-5-1:20	----

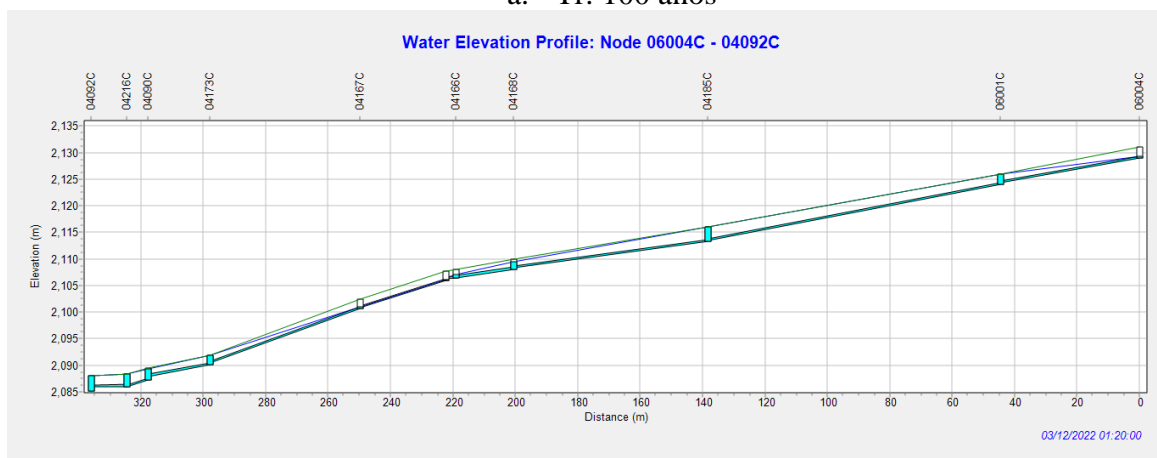
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
04185C	104.91-15-1:20	92.17-15-1:20	80.48-10-1:20	64.45-10-1:20	54.39-10-1:20
04173C	132.60-15-1:20	115.02-15-1:20	98.82-10-1:20	74.20-10-1:20	61.99-10-1:20
04216C	96.17-20-1:20	94.28-15-1:20	92.56-15-1:20	89.83-15-1:20	89.85-10-1:20

Figura 52

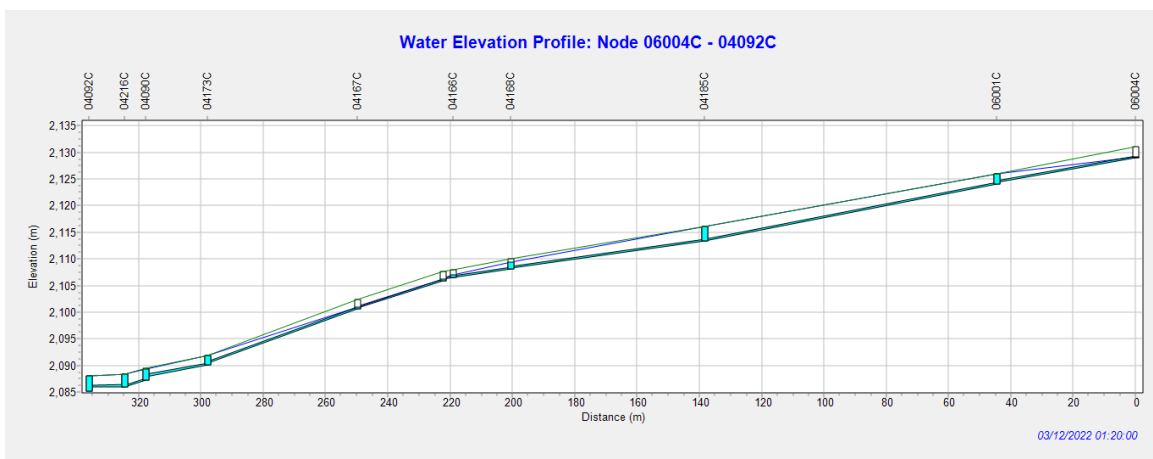
Perfiles de alcantarillado tramo 13



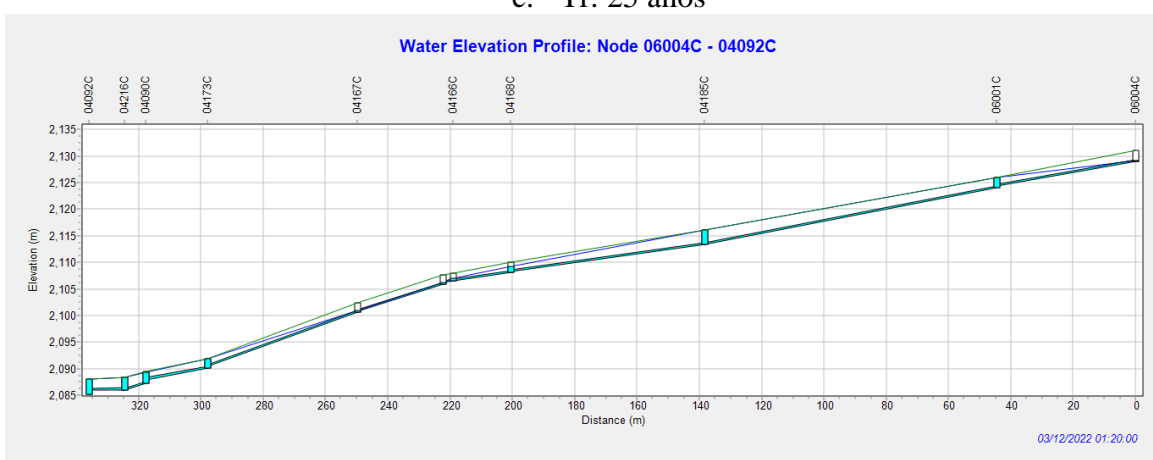
a. Tr: 100 años



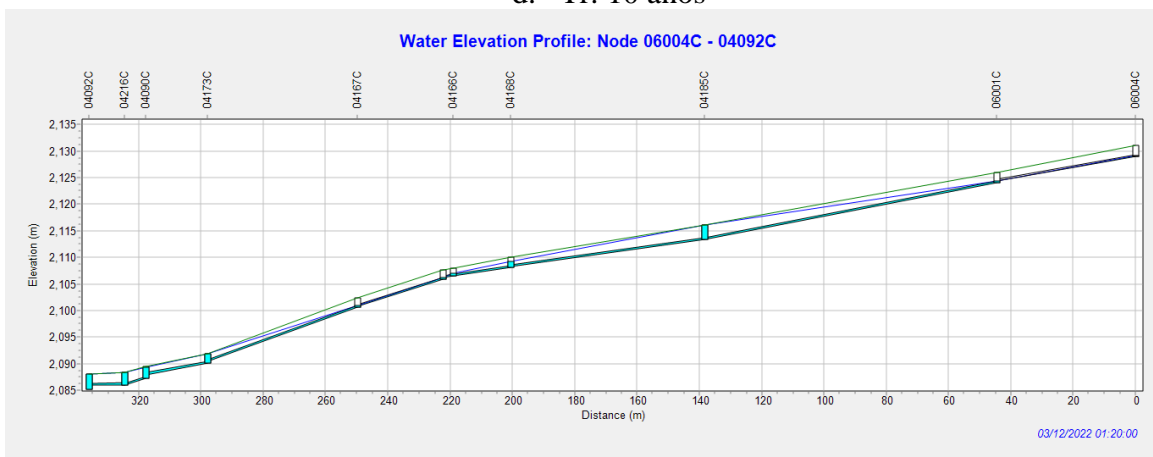
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 14 comprende 14 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 30 minutos. Para los periodos de retorno de 25 y 10 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 30 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 25 minutos.

La Figura 53 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 04148C, disminuyendo levemente su caudal pico.

En la Tabla 42 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 14.

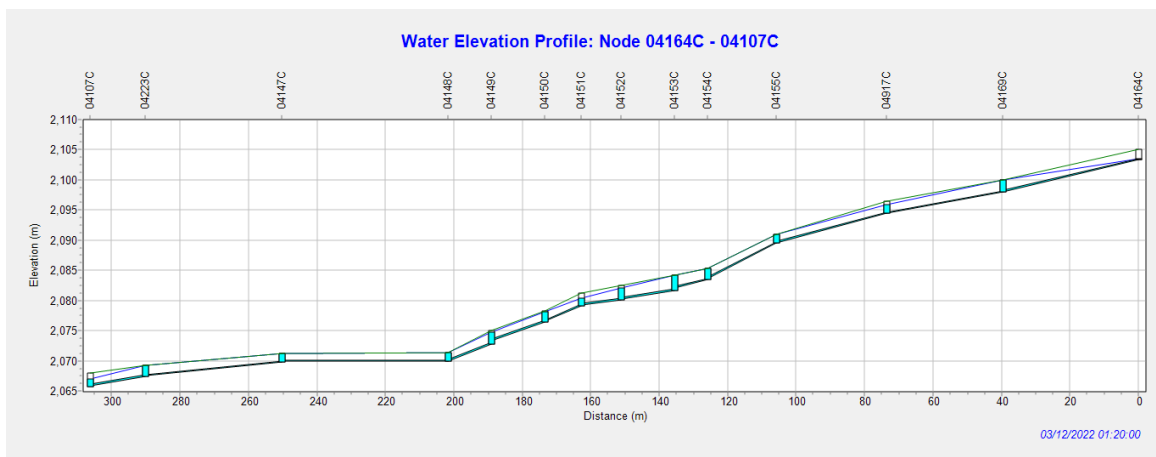
Tabla 42

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 14

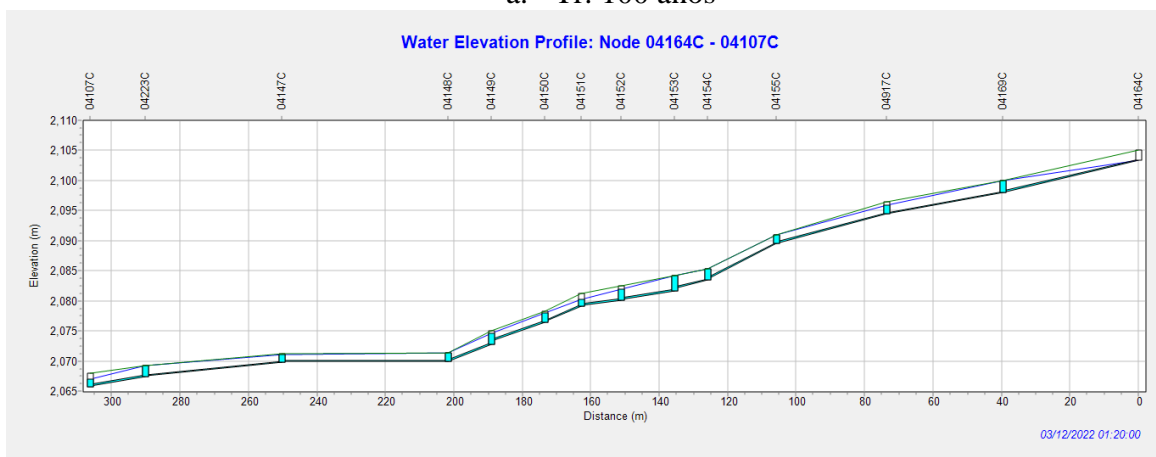
Cámara	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
#	100	50	25	10	5
04169C	38.72-5-1:20	18.04-5-1:20	----	----	----
04155C	32.42-5-1:20	21.65-5-1:20	----	----	----
04154C	74.94-10-1:20	74.94-10-1:20	69.12-10-1:20	42.45-10-1:20	18.50-5-1:20
04153C	34.16-10-1:20	26.14-10-1:20	18.91-10-1:20	8.39-5-1:20	----
04148C	177.16-30-1:20	169.62-30-1:20	163.02-30-1:20	154.27-30-1:20	145.63-25-1:20
04223C	52.98-25-1:20	50.93-25-1:20	48.93-20-1:20	46.33-20-1:20	44.03-15-1:20

Figura 53

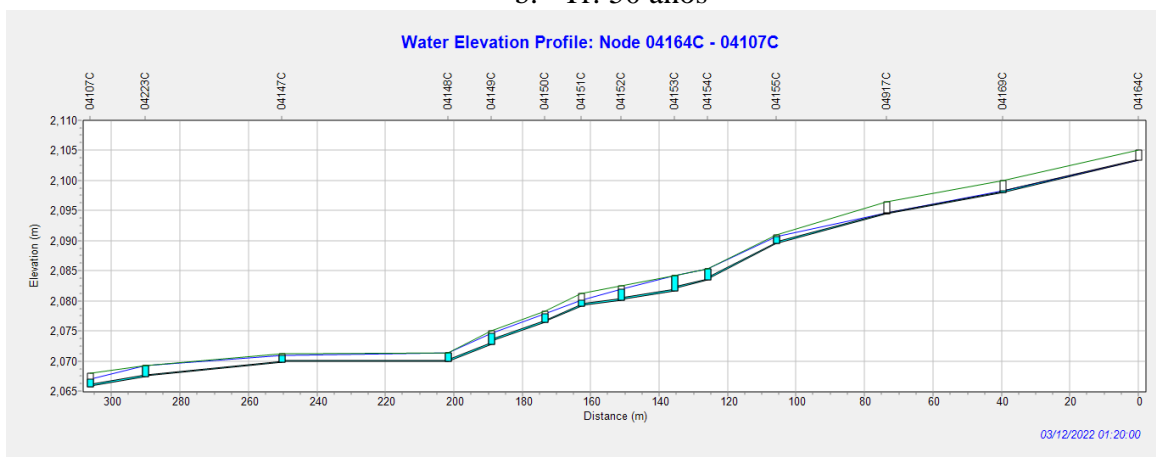
Perfiles de alcantarillado tramo 14



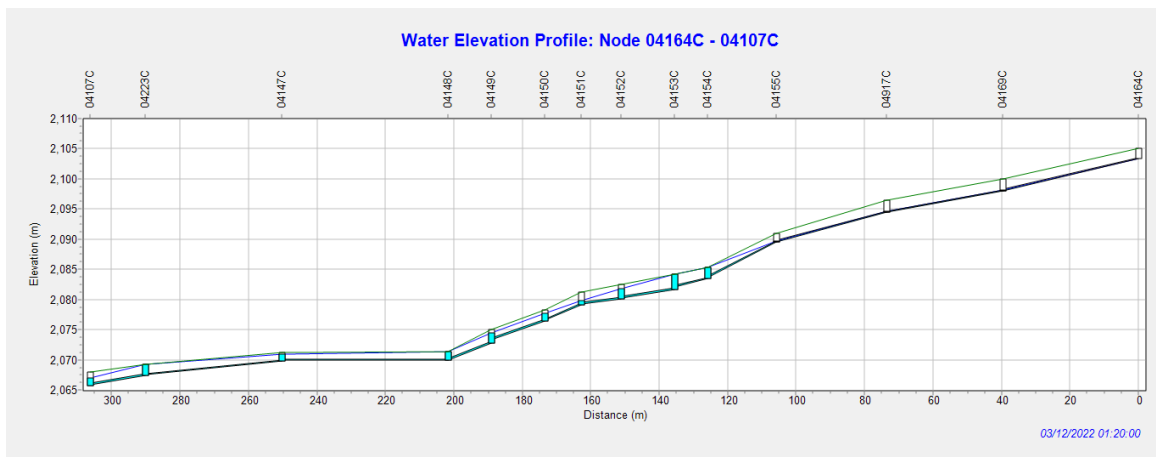
a. Tr: 100 años



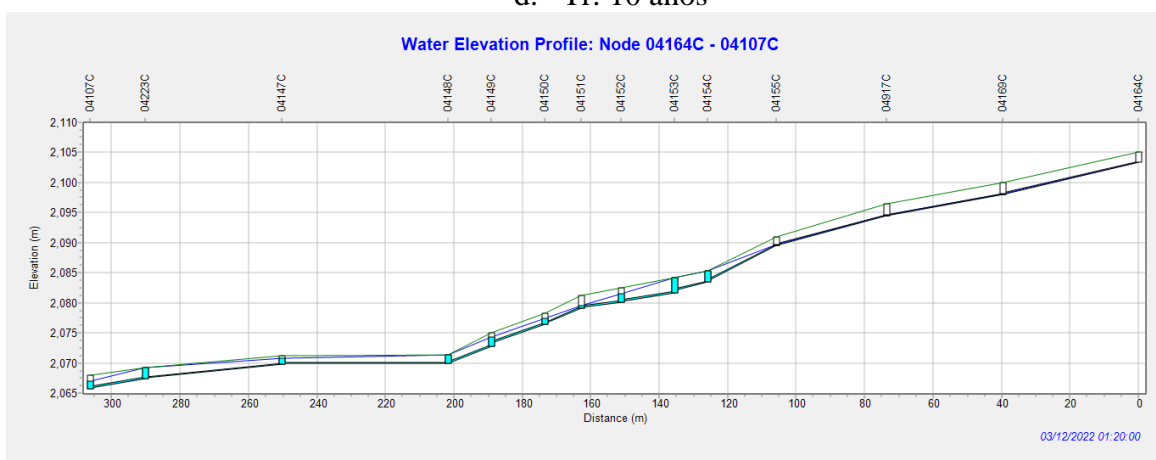
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 15 comprende 8 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 6 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Para el periodo de retorno de 25 años se presenta inundación en 5 cámaras y su duración máxima es de 15 minutos. Para el periodo de retorno de 10 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 1 cámara y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 54 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 04006C, disminuyendo levemente su caudal pico.

En la Tabla 43 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 15.

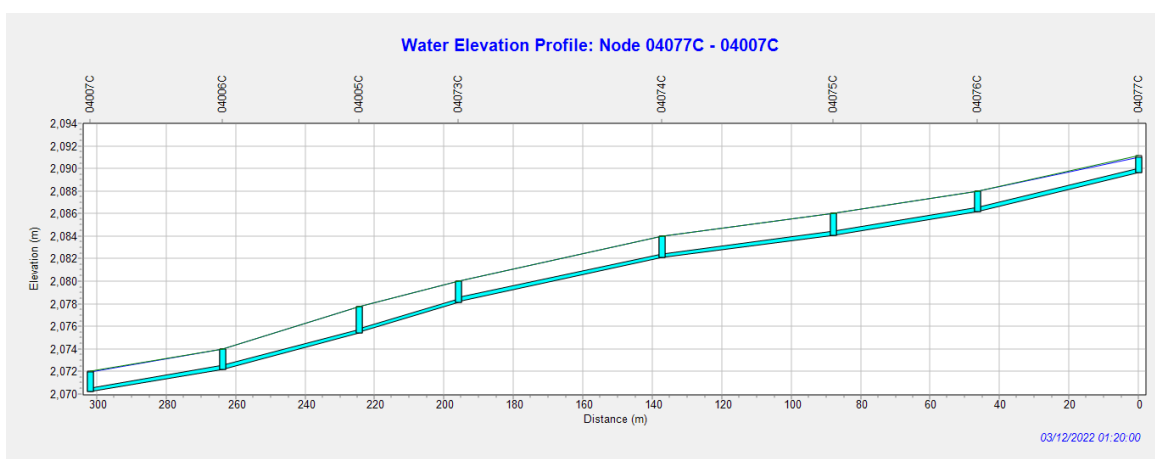
Tabla 43

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 15

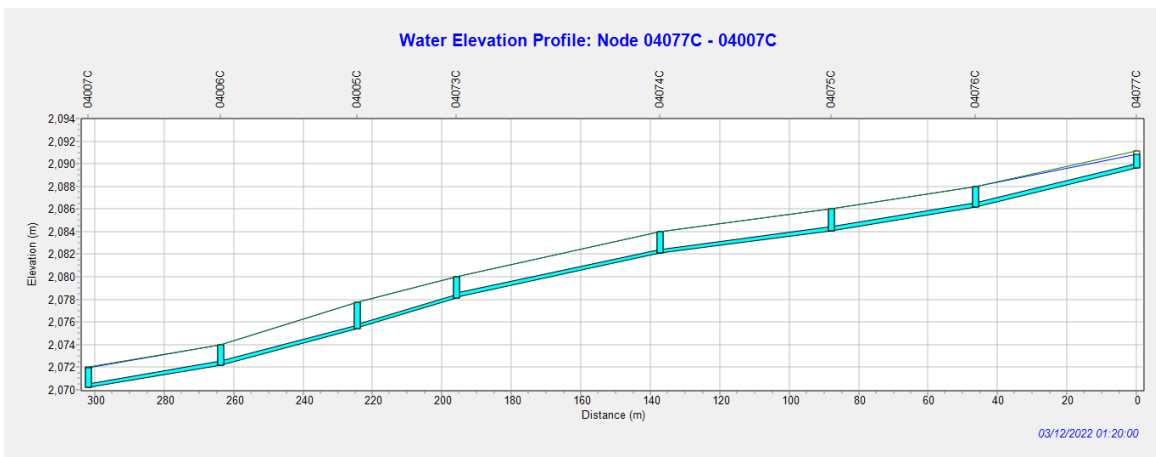
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
04076C	41.24-10-1:20	34.0-10-1:20	27.52-10-1:20	1.63-5-1:20	----
04075C	20.06-10-1:20	20.06-10-1:20	20.06-5-1:20	8.40-5-1:20	----
04074C	83.60-10-1:20	49.35-5-1:20	18.22-5-1:20	----	----
04073C	77.0-10-1:20	66.09-10-1:20	55.35-10-1:20	33.06-5-1:20	----
04005C	7.6-5-1:20	2.69-5-1:20	----	----	----
04006C	154.83-20-1:20	148.28-20-1:20	141.79-15-1:20	132.97-10-1:20	119.44-10-1:20

Figura 54

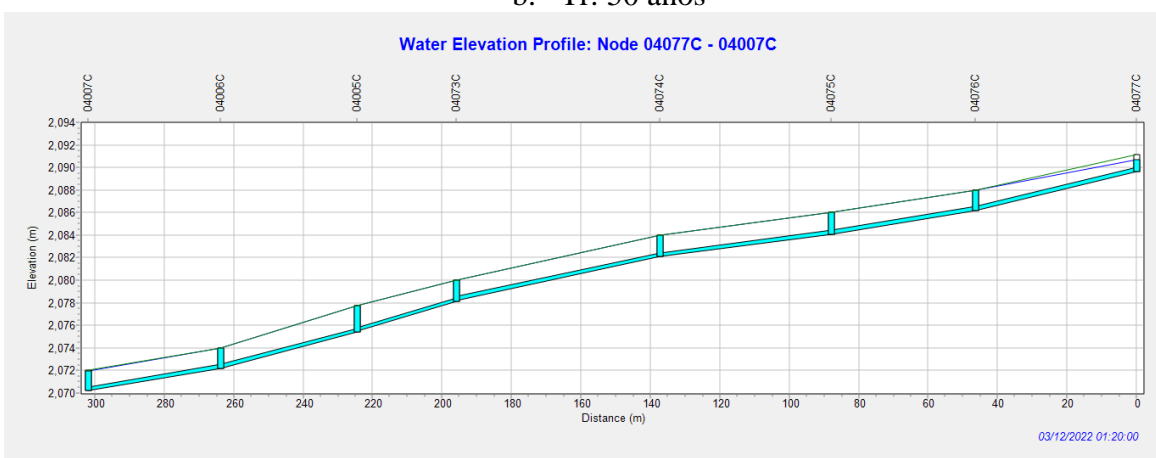
Perfiles de alcantarillado tramo 15



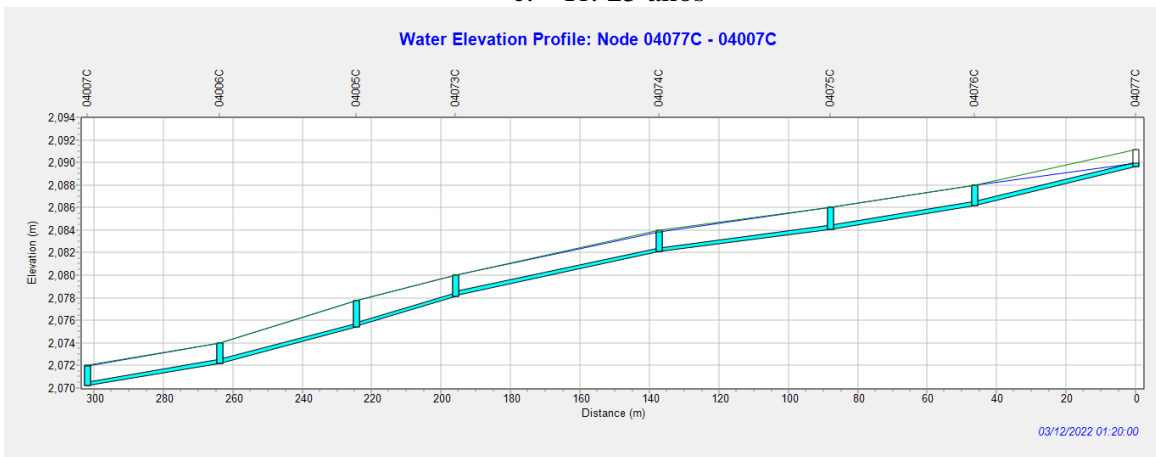
a. Tr: 100 años



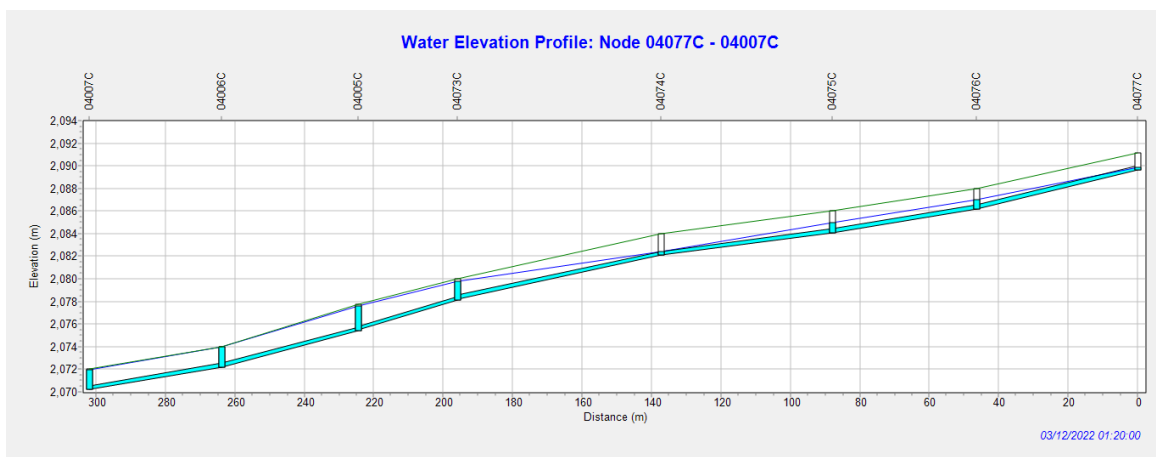
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 16 comprende 6 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100, 50, 25 y 10 años se presenta inundación en 3 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos. Y para el periodo de retorno de 5 años se presenta inundación en 2 cámaras y su duración máxima es de 5 minutos.

La Figura 55 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 04072C.

En la Tabla 44 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 16.

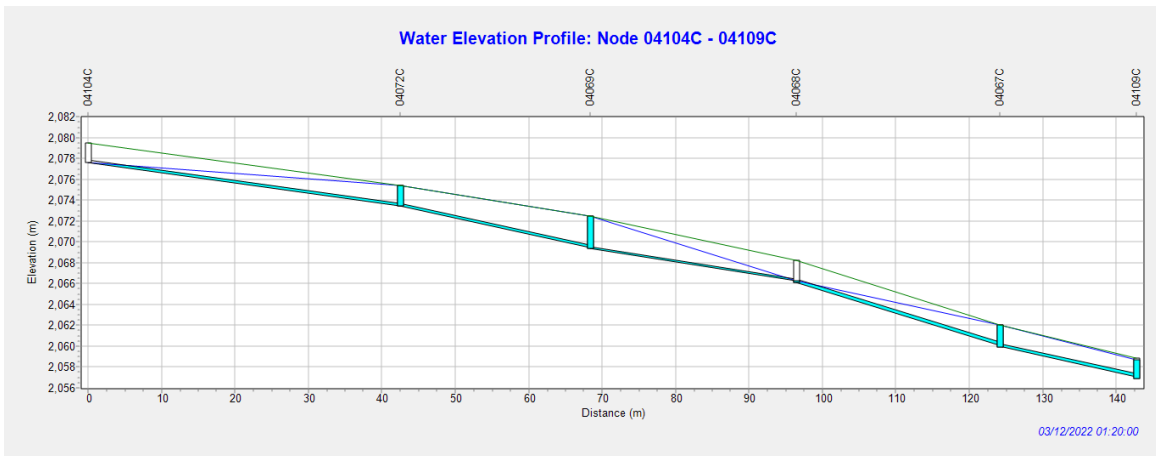
Tabla 44

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 16

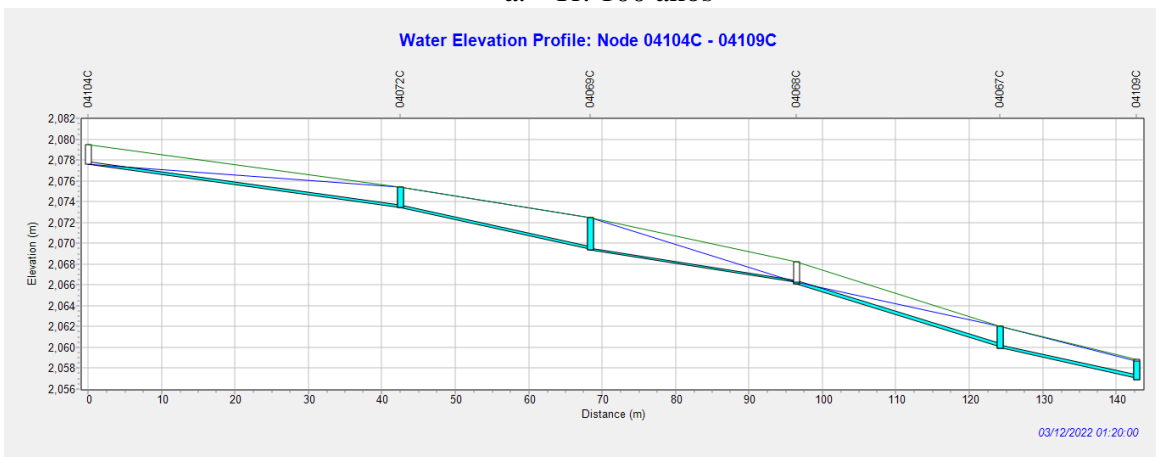
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	Tiempo caudal máximo (hora-minuto)				
	100	50	25	10	5
04072C	100.33-10-1:20	73.90-10-1:20	49.99-10-1:20	20.24-5-1:20	13.78-5-1:20
04069C	48.75-10-1:20	34.99-10-1:20	25.63-10-1:20	13.62-5-1:20	0.85-5-1:20
04067C	98.63-10-1:20	77.96-10-1:20	56.08-10-1:20	29.51-5-1:20	----

Figura 55

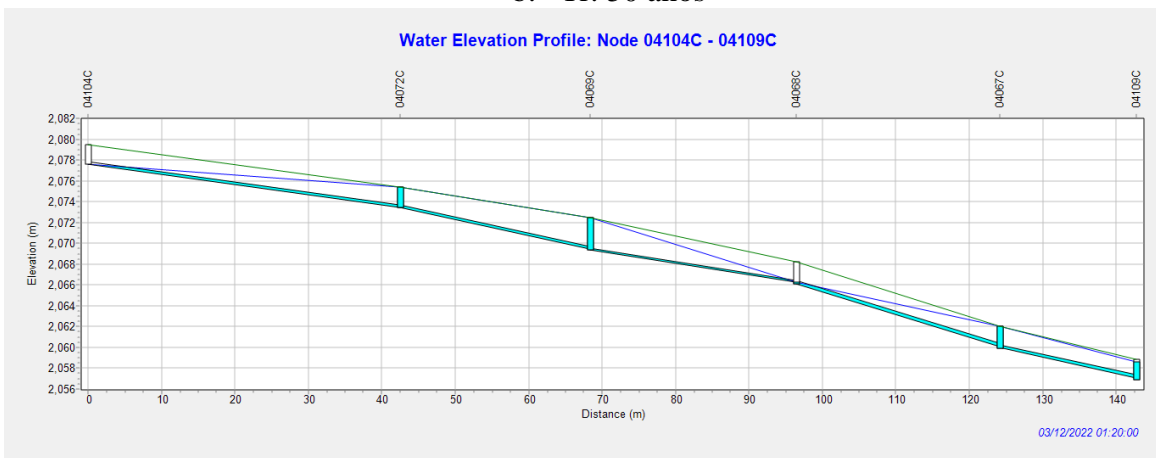
Perfiles de alcantarillado tramo 16



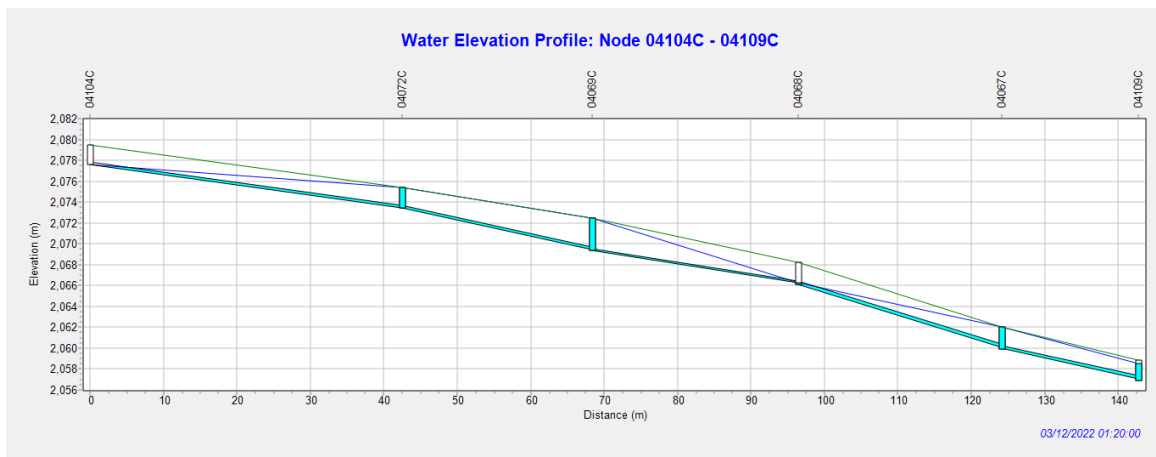
a. Tr: 100 años



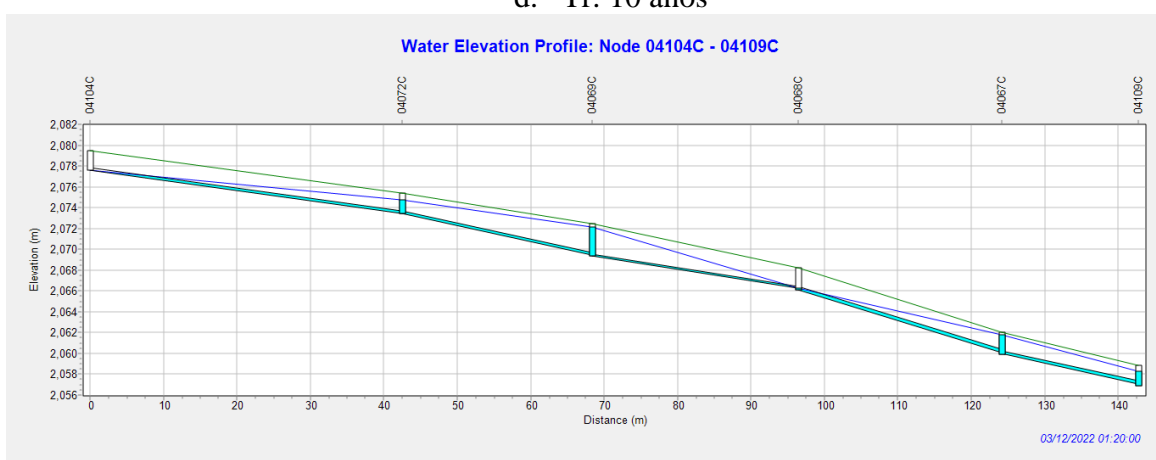
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM.

El tramo 17 comprende 7 cámaras, donde para los periodos de retorno de 100 y 50 años se presenta inundación en 4 cámaras y su duración máxima es de 20 minutos. Y para los periodos de retorno de 25, 10 y 5 años se presenta inundación en 2 cámaras y su duración máxima es de 10 minutos.

La Figura 56 exhibe la condición más crítica que ocurre en el minuto 20. Es relevante mencionar que la cámara más crítica es la 04001C.

En la Tabla 45 se muestra el caudal máximo de inundación y el tiempo en que se da para cada cámara en el tramo 17.

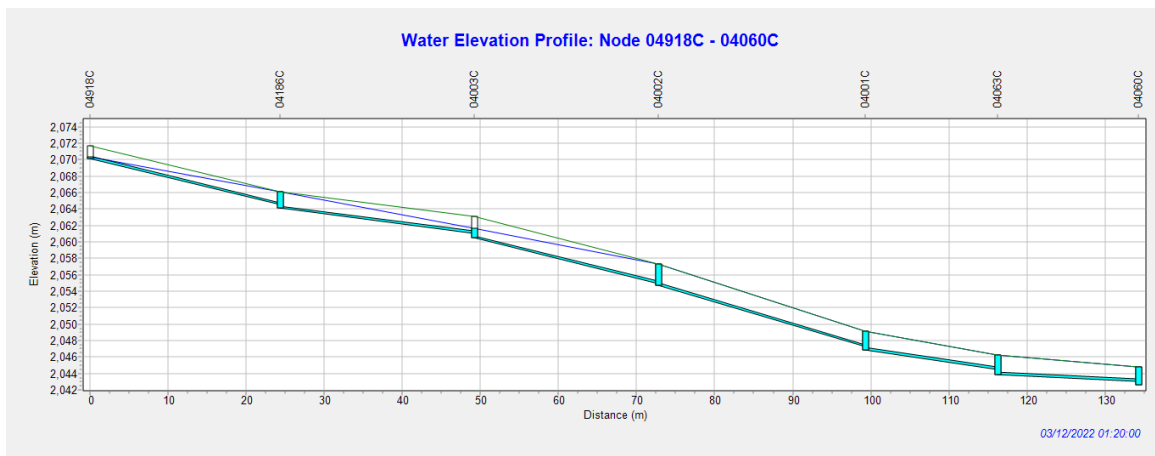
Tabla 45

Caudal de inundación y tiempo para cada cámara tramo 17

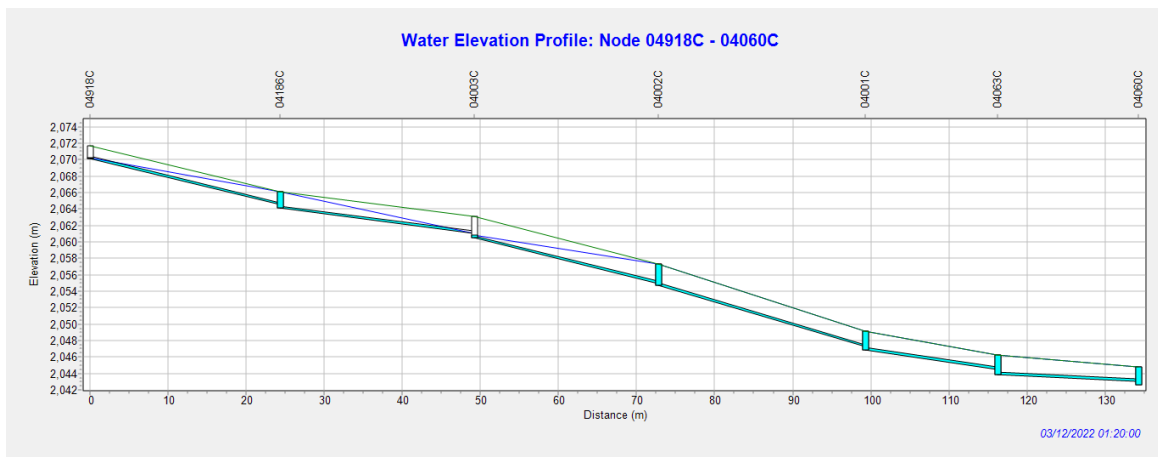
Cámara #	Caudal de inundación (L/s) - Duración del evento de inundación (minutos)				
	100	50	25	10	5
04186C	82.36-5-1:20	34.90-5-1:20	----	----	----
04002C	52.90-10-1:20	14.14-5-1:20	----	----	----
04001C	291.04-20- 1:20	268.90-20- 1:20	203.45-10- 1:20	186.61-10- 1:20	120.32-10- 1:20
04063C	94.77-20-1:20	93.53-20-1:20	92.33-15-1:20	88.10-10-1:20	76.68-10-1:20

Figura 56

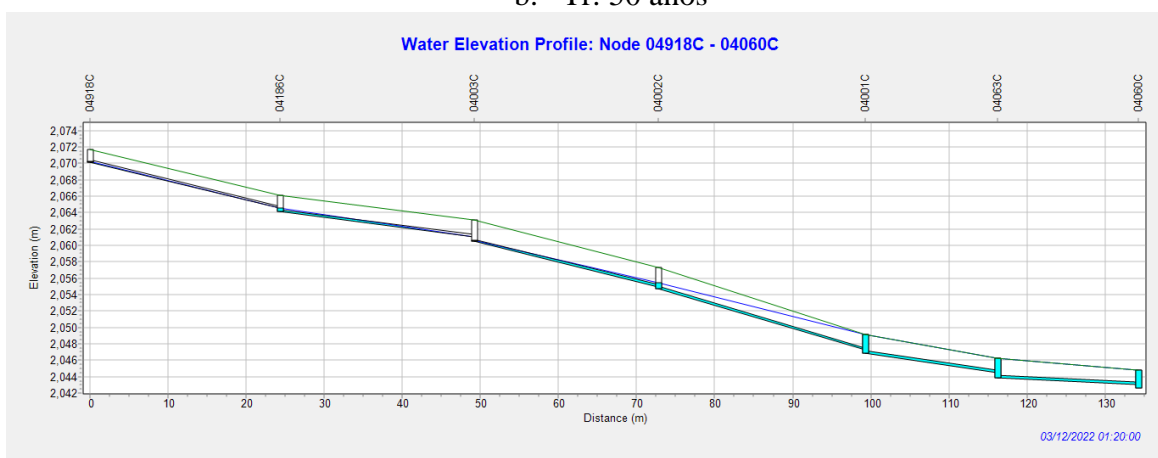
Perfiles de alcantarillado tramo 17



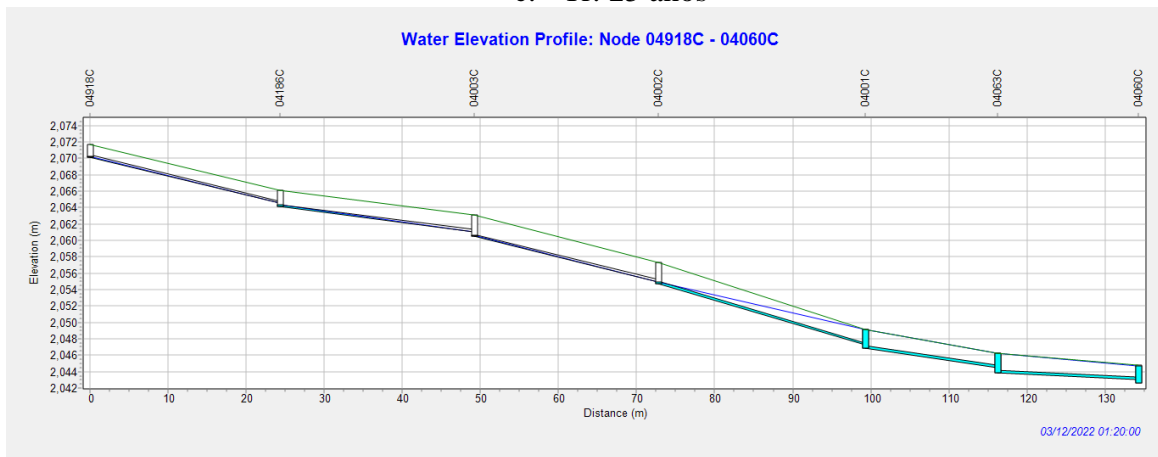
a. Tr: 100 años



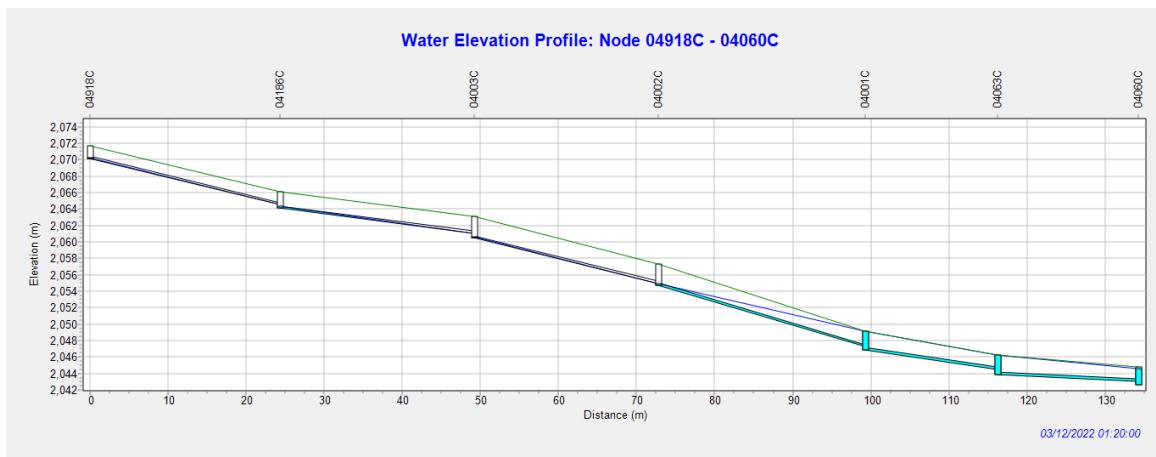
b. Tr: 50 años



c. Tr: 25 años



d. Tr: 10 años



e. Tr: 5 años

Nota: El gráfico muestra la línea de terreno y energía, las cámaras con inundación y la capacidad hidráulica de las tuberías. Perfiles de alcantarillado extraídos de SWMM

8.6 Priorización de criterios

En concordancia con los criterios escogidos y las respuestas obtenidas del panel de expertos se presentan los resultados obtenidos para cada grupo de estos (ver Tabla 46 y Tabla 47). Los expertos que participaron en la investigación fueron hombres y mujeres y se relacionan con el campo de la ingeniería y han ejercido sus profesiones en el ámbito académico, en el sector público teniendo incluso cargos de secretarios de despacho y gerentes de empresas de servicios públicos y en el sector privados siendo incluso gerentes y dueños de empresas. Además, los temas relacionados con su labor se enfocaron principalmente en la planificación y ejecución de obras de acueducto, saneamiento, infraestructura y servicios públicos domiciliarios. También, es relevante mencionar que participaron expertos internacionales (un experto de Argentina) y nacionales, siendo algunos habitantes de la ciudad de Manizales y sectores aledaños a la zona de investigación.

Tabla 46*Vector prioridad de criterios primarios*

Rótulo	Criterios primarios	%
CSA	Técnico	31.3
CE	Económico	21.7
CT	Social/Ambiental	47.0

Tabla 47

Vector prioridad para cada grupo de criterios: criterios socio/ambientales (a), criterios técnicos (b) y criterios económicos (c)

Rótulo	Criterios socio/ambientales	%
CSA1	Ciclo de vida de la alternativa	20.1
CSA2	Vida útil	24.0
CSA3	Intervención civil	8.4
CSA4	Beneficios comunitarios	26.0
CSA5	Aceptabilidad de alternativa SUDS	22.5

(a)

Rótulo	Criterios técnicos	%
CT1	Topografía	6.9
CT2	Área	10.7
CT3	Periodicidad de mantenimiento	6.5
CT4	Modelado	5.8
CT5	Fiabilidad del sistema	14.4
CT6	Integridad	14.1
CT7	Facilidad de diseño	6.8
CT8	Control	14.2
CT9	Eficiencia	11.4
CT10	Normalización	9.3

(b)

Rotulo	Criterios económicos	%
CE1	Costos de implementación	17.5
CE2	Costos de mantenimiento	28.8
CE3	Costos de operación	53.7

(c)

La información presentada en la Tabla 46, evidencia los porcentajes obtenidos en cada criterio primario y permite priorizar de acuerdo con los valores asignados por el panel de expertos, por lo tanto, el valor que le corresponde a cada criterio primario sería el siguiente: en primer lugar, el criterio socio/ambiental (47.0%), seguido del técnico (31.3%) y se finaliza con el económico (21.7%). En la Tabla 47 se presentan los resultados obtenidos de los criterios provenientes de cada grupo primario y su valoración, donde a partir de estos se inicia la construcción de la matriz de selección general, además la priorización de criterios primarios, socio/ambientales, técnicos y económicos se verifico con el índice de inconsistencia para cada uno de los expertos mostrado (Ver Anexo 13.2).

El análisis de los expertos refleja que el criterio económico para el sector netamente privado es más relevante que el técnico y el socio/ambiental, haciendo que prime más las soluciones estructurales cuando se tengan inversiones. En contraste, para el sector académico y público el criterio de mayor importancia es el socio/ambiental y el de menor importancia el económico, haciendo que las alternativas de solución que salgan de estas entidades sean integrales, combinando propuestas estructurales y no estructurales en los proyectos. También, se exhibe en el análisis de los expertos que el criterio técnico es un punto intermedio entre lo económico y lo socio/ambiental, demostrando que trabajos como el de la presente investigación sean relevantes para orientar y encaminar hacia la aplicación de nuevas alternativas de solución en este caso para los drenajes pluviales mediante la aplicación de SUDS.

8.6.1 Selección de alternativa

En la Tabla 48 se presentan los resultados obtenidos de la priorización de alternativas SUDS realizada, las cuales podrían ser aplicadas a la cuenca Olivares de la ciudad de Manizales.

Tabla 48

Priorización de alternativas

Ítems	Nombre	Puntaje
A10	Tanques de almacenamiento	3,82
A1	Pavimentos permeables	3,64
A9	Alcorques	3,51
A8	Zonas de bioretención	3,40
A3	Depósitos de infiltración	3,25
A7	Techos verdes	3,24
A6	Franjas filtrantes	3,08
A2	Pozos y zanjas de infiltración	3,07
A5	Cunetas verdes	3,01
A4	Drenes filtrantes	2,88

Los resultados presentados en la Tabla 48 concluyen que, dado los juicios subjetivos de cada experto, a pesar de que las alternativas tienen un nivel de cumplimiento similar, las alternativas que más se ajustan a los criterios propuestos son la A10, A1 y A9 las cuales corresponden a tanques de almacenamiento, pavimentos permeables y alcorques.

De acuerdo con CIIA (2017) y CIRIA C753 (2015) los tanques de almacenamiento son estructuras rígidas en forma de prismas, utilizados para crear un espacio vacío para el almacenamiento temporal de agua superficiales antes de su infiltración. El agua almacenada es posteriormente evacuada mediante una liberación controlada o utilizada en actividades que no requieren calidad de agua y su diseño varía dependiendo del objetivo que quiere ser alcanzado, mientras que los pavimentos permeables tienen como objetivo principal reemplazar el pavimento convencional por un tipo de pavimento que permita drenar el agua hacia el subsuelo, de manera

que la escorrentía no se acumule en la superficie y su diseño se basa en las cargas de tráfico esperadas y la apariencia visual que se requiere. Finalmente, los alcorques son esencialmente sistemas de bio-retención con árboles en su interior, para mejorar su capacidad y rendimiento, tiene como objetivo incrementar la habilidad del árbol para reducir la escorrentía y proveer condiciones para que éste pueda soportar problemas asociados a las inundaciones y la interacción con estructuras circundantes.

8.7 Alternativas “SUDS” seleccionadas

La modelación de las estructuras SUDS se realizó para el tramo 1 de la cuenca de estudio, debido a que obedece a un sector alto de la cuenca, donde se logra identificar los aportes específicos de las áreas aferentes y reúne todos los tipos de zonas de la cuenca como son vías, vivienda y áreas blandas y duras, presenta cámaras con inundación y tuberías con problemas de capacidad hidráulica, además se tuvo en cuenta los periodos de retorno estudiados de 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Tabla 49 se muestran las características principales de cada tipo de alternativa SUDS simulada.

Tabla 49

Características principales de los SUDS simulados

Tipología	Volumen unitario (m ³)	Cantidad	Observación
Alcorque inundable	2.40	103	El volumen de agua a tratar considero todos los tipos de áreas.
Pavimento permeable	2.99	32	El volumen de agua a tratar considero todos los tipos de áreas. Se simulo dos alternativas, con 3 y 6 m de ancho de vía.
Tanque de detención	10.0	20	El volumen de agua lluvia a tratar se basó únicamente en el aportante por las viviendas.

Tipología	Volumen unitario (m ³)	Cantidad	Observación
Combinación de SUDS	2.4 – 2.99 – 10.0	21 – 9 – 20	El volumen de agua a tratar considero todos los tipos de áreas. El ancho de vía fue de 3 m. Para las viviendas se implementó tanques de detención, para las vías pavimentos permeables y para los demás alcorques inundables.

8.7.1 SUDS periodo de retorno 100 años

En la Figura 57 se muestra el hidrograma de salida del tramo 1, es decir, caudal presente en la cámara 06393C. Aquí el caudal pico se retrasa para los SUDS de pavimentos permeables y combinación de alternativas 5 y 10 minutos respectivamente.

En la Tabla 50 se indica el porcentaje de reducción del caudal pico para cada tipología de SUDS, donde se muestra que los tanques de detención y la combinación de alternativas presentan el mayor porcentaje de reducción con valores de 9.21 y 8.69% respectivamente.

Figura 57

Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 100 años

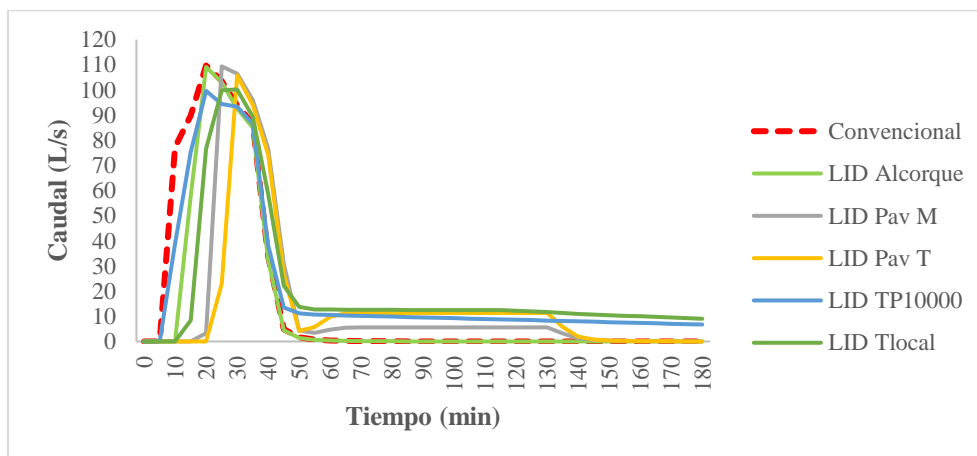


Tabla 50

Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 100 años

Condición	Caudal pico L/s	Tiempo Min	% de reducción
Convencional	109.7	20	----
LID Alcorque	109.1	20	0.55
LID Pav 1*	109.35	25	0.32
LID Pav 2*	105.78	30	3.57
LID Tanque	99.60	20	9.21
LID T_{comb}*	100.17	30	8.69

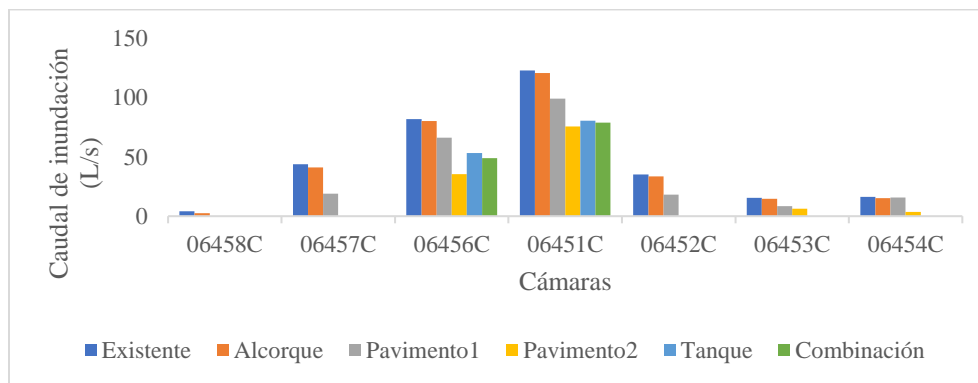
Nota: * Pav 1 corresponde a tipología con mitad de ancho de vía (3 m). Pav 2

corresponde a tipología con ancho de vía completo (6 m). TComb corresponde a combinación de alternativas.

En la Figura 58 se muestra la reducción del caudal de inundación que presenta cada una de las tipologías SUDS respecto a la simulación inicial. Para la cámara 06458C todas las tipologías menos alcorques inundables (39.06%) mitigan la inundación en su totalidad. Para la cámara 06457C y 05452C se atenúa la inundación para pavimentos permeables 2 (6 m de vía, ancho de vía completo), tanques de detención y combinación de alternativas en su totalidad, en los alcorques inundables se reduce el caudal de inundación en menos del 10% y para los pavimentos permeables 1 en 56.63 y 48.16%. Para las cámaras 06456C y 06451C no se logra mitigar la inundación con ninguna tipología, pero se reduce el caudal de inundación en mayor porcentaje con pavimentos permeables 2, tanques de detención y combinación, la cámara 06456C con valores de 56.78, 35.07 y 40.36% y la cámara 06451C con valores de 38.52, 34.42 y 35.83%. Y para las cámaras 06453C y 06454C se logra atenuar el caudal de inundación con las tipologías de tanque de detención y combinación en su totalidad, los pavimentos permeables 2 alcanzan porcentajes de 58.40 y 77.96%, los pavimentos permeables 1 alcanzan porcentajes de 45.30 y 4.46% y los alcorques inundables no alcanzan el 10%.

Figura 58

Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología periodo de retorno de 100 años



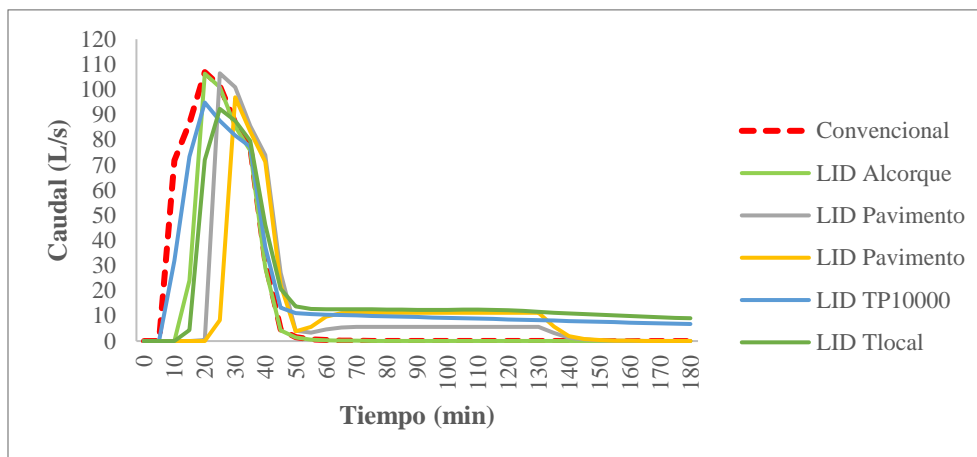
8.7.2 SUDS periodo de retorno 50 años

En la Figura 59 se muestra el hidrograma de salida del tramo 1, es decir, caudal presente en la cámara 06393C. Aquí el caudal pico se retrasa para los SUDS de pavimentos permeables y combinación de alternativas 5 y 10 minutos respectivamente.

En la Tabla 51 se indica el porcentaje de reducción del caudal pico para cada tipología de SUDS, donde se muestra que los tanques de detención y la combinación de alternativas presentan el mayor porcentaje de reducción con valores de 11.33 y 13.67%.

Figura 59

Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 50 años

**Tabla 51**

Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 50 años

Condición	Caudal pico L/s	Tiempo Min	% de reducción
Convencional	106.93	20	----
LID Alcorque	106.29	20	0.60
LID Pav 1*	106.44	25	0.46
LID Pav 2*	96.91	30	9.37
LID Tanque	94.82	20	11.33
LID T_{comb}*	92.31	25	13.67

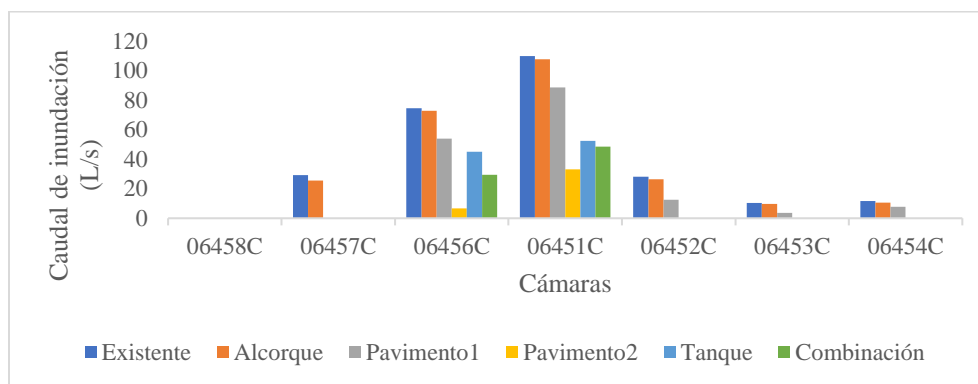
Nota: * Pav 1 corresponde a tipología con mitad de ancho de vía (3 m). Pav 2 corresponde a tipología con ancho de vía completo (6 m). TComb corresponde a combinación de alternativas.

En la Figura 60 se muestra la reducción del caudal de inundación que presenta cada una de las tipologías SUDS respecto a la simulación inicial. Para la cámara 06458C no se presenta inundación para este evento de lluvia. Para la cámara 06457C se atenúa la inundación en su totalidad para todas las tipologías menos alcorques inundables que reduce el caudal de

inundación en 12.72%. Para las cámaras 06456C y 06451C no se logra mitigar la inundación con ninguna tipología, pero se reduce el caudal de inundación en mayor porcentaje con pavimentos permeables 2, tanques de detención y combinación, la cámara 06456C con valores de 91.04, 39.54 y 60.50% y la cámara 06451C con valores de 69.84, 52.22 y 55.94%. Y para las cámaras 06452C, 06453C y 06454C se logra atenuar el caudal de inundación con las tipologías de pavimentos permeables 2, tanque de detención y combinación en su totalidad y se reduce el caudal de inundación para pavimentos permeables 1 en 55.31, 65.47 y 32.82% y alcorques inundables en 5.92, 7.06 y 9.66%.

Figura 60

Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 50 años



8.7.3 SUDS periodo de retorno 25 años

En la Figura 61 se muestra el hidrograma de salida del tramo 1, es decir, caudal presente en la cámara 06393C. Aquí el caudal pico se retrasa para los SUDS de pavimentos permeables y combinación de alternativas 5 y 15 minutos respectivamente.

En la Tabla 52 se indica el porcentaje de reducción del caudal pico para cada tipología de SUDS, donde se muestra que los pavimentos permeables 2, tanques de detención y la

combinación de alternativas presentan el mayor porcentaje de reducción con valores de 25.60, 13.88 y 17.48%.

Figura 61

Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 25 años

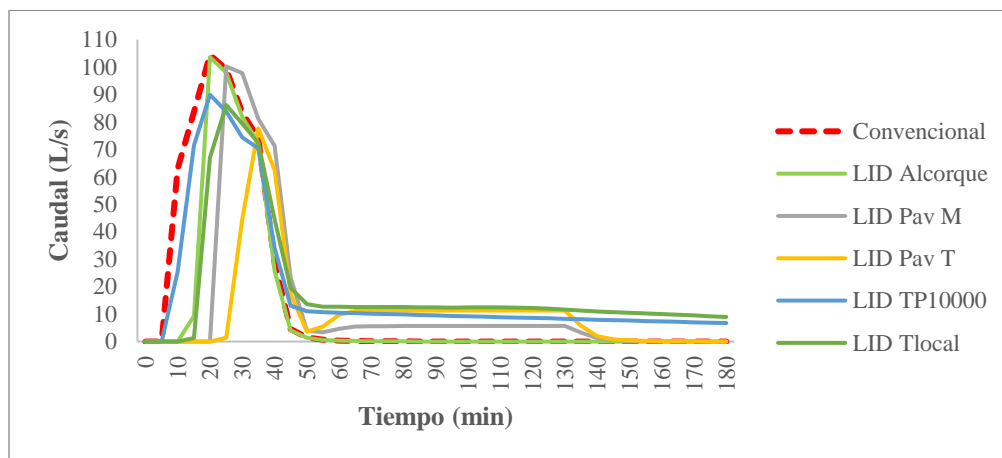


Tabla 52

Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 25 años

Condición	Caudal pico L/s	Tiempo Min	% de reducción
Convencional	104.45	20	----
LID Alcorque	103.68	20	0.74
LID Pav 1*	100.25	25	4.02
LID Pav 2*	77.71	35	25.60
LID Tanque	89.95	20	13.88
LID T_{comb}*	86.19	25	17.48

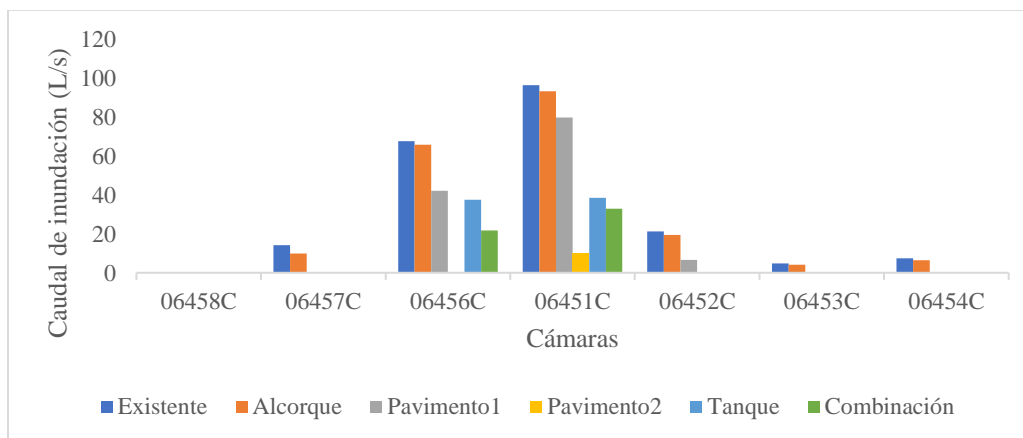
Nota: * Pav 1 corresponde a tipología con mitad de ancho de vía (3 m). Pav 2 corresponde a tipología con ancho de vía completo (6 m). TComb corresponde a combinación de alternativas.

En la Figura 62 se muestra la reducción del caudal de inundación que presenta cada una de las tipologías SUDS respecto a la simulación inicial. Para la cámara 06458C no se presenta

inundación para este evento de lluvia. Para la cámara 06457C, 06453C y 06454C se atenúa la inundación en su totalidad para todas las tipologías menos alcorques inundables (29.66, 15.91 y 14.93%). Para la cámara 06456C se mitiga la inundación con la tipología de pavimento permeable 2, se reduce el caudal de inundación en gran medida para la alternativa de combinación en un 67.74% y para las demás tipologías no se alcanza a reducir el caudal de inundación en un 50%. Para la cámara 06451C no se logra mitigar la inundación con ninguna tipología, pero se reduce el caudal de inundación con un porcentaje mayor al 50% con pavimentos permeables 2, tanques de detención y combinación (89.72, 60.12 y 65.89%) y para pavimentos permeables 1 y alcorques inundables no se alcanza a reducir en un 20%. Y para las cámaras 06452C se logra atenuar el caudal de inundación en su totalidad con las tipologías de pavimentos permeables 2, tanque de detención y combinación y para pavimentos permeables 1 y alcorques inundables se alcanza a reducir en un 69.22 y 8.4%.

Figura 62

Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 25 años



8.7.4 SUDS periodo de retorno 10 años

En la Figura 63 se muestra el hidrograma de salida del tramo 1, es decir, caudal presente en la cámara 06393C. Aquí el caudal pico se retrasa para los SUDS de pavimentos permeables y combinación de alternativas 10 y 20 minutos respectivamente.

En la Tabla 53 se indica el porcentaje de reducción del caudal pico para cada tipología de SUDS, donde se muestra que los pavimentos permeables 2, tanques de detención y la combinación de alternativas presentan el mayor porcentaje de reducción con valores de 68.21, 17.31 y 24.65%.

Figura 63

Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 10 años

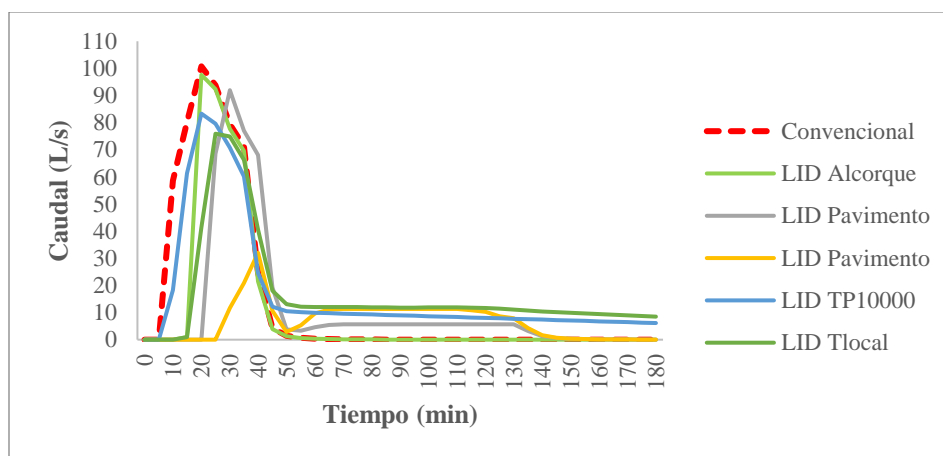


Tabla 53

Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 10 años

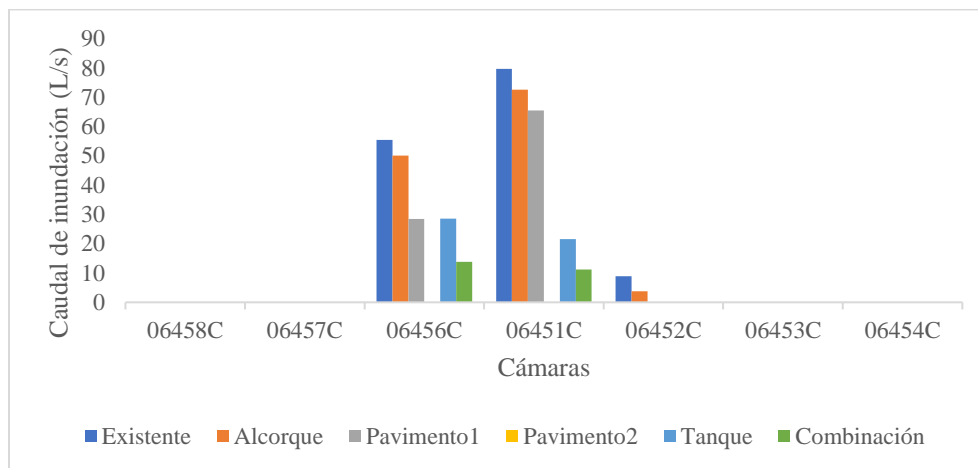
Condición	Caudal pico L/s	Tiempo Min	% de reducción
Convencional	100.76	20	----
LID Alcorque	97.63	20	3.11
LID Pav 1*	91.97	30	8.72
LID Pav 2*	32.03	40	68.21
LID Tanque	83.32	20	17.31
LID T_{comb}*	75.92	25	24.65

Nota: * Pav 1 corresponde a tipología con mitad de ancho de vía (3 m). Pav 2 corresponde a tipología con ancho de vía completo (6 m). TComb corresponde a combinación de alternativas.

En la Figura 64 se muestra la reducción del caudal de inundación que presenta cada una de las tipologías SUDS respecto a la simulación inicial. Para la cámara 06458C, 06457C, 06453C y 06454C no se presenta inundación para este evento de lluvia. Para la cámara 06456C y 06451C se atenúa la inundación en su totalidad con los pavimentos permeables 2, se reduce el caudal de inundación en la tipología combinada en 75.17 y 86%, para tanques de detención en 48.55 y 72.87%, para pavimentos permeables 1 en 48.66 y 17.9% y para los alcorques inundables no se alcanza el 10%. Y para las cámaras 06452C se logra atenuar el caudal de inundación en su totalidad con todas las tipologías menos los alcorques inundables que alcanza a reducirlo en un 58.25%.

Figura 64

Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 10 años



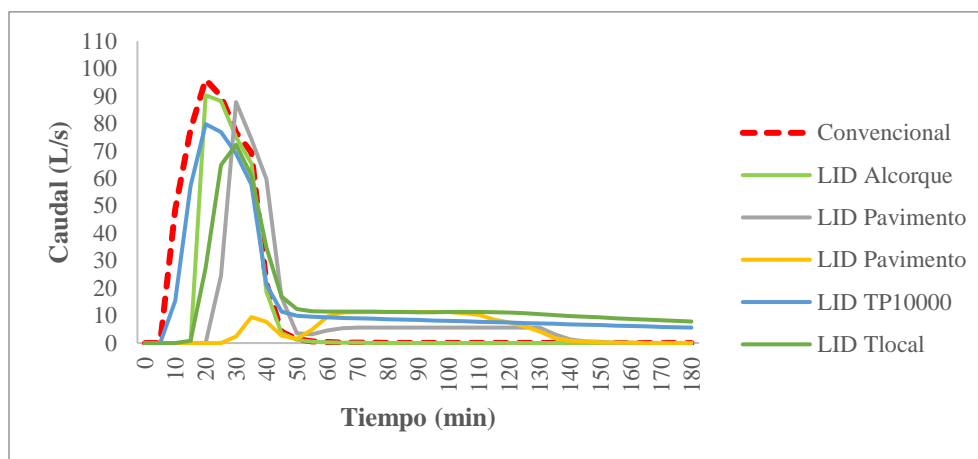
8.7.5 SUDS periodo de retorno 5 años

En la Figura 65 se muestra el hidrograma de salida del tramo 1, es decir, caudal presente en la cámara 06393C. Aquí el caudal pico se retrasa para los SUDS de pavimentos permeables y combinación de alternativas 10 y 15 minutos respectivamente.

En la Tabla 54 se indica el porcentaje de reducción del caudal pico para cada tipología de SUDS, donde se muestra que los pavimentos permeables 2, tanques de detención y la combinación de alternativas presentan el mayor porcentaje de reducción con valores de 88.24, 16.90 y 24.72%.

Figura 65

Hidrograma de salida del tramo 1 – Periodo de retorno de 5 años

**Tabla 54**

Caudal pico y % de reducción para cada tipología de SUDS – Periodo de retorno 5 años

Condición	Caudal pico L/s	Tiempo Min	% de reducción
Convencional	96.02	20	----
LID Alcorque	90.30	20	5.96
LID Pav 1	87.80	30	8.56
LID Pav 2	11.29	40	88.24
LID Tanque	79.79	20	16.90
LID T _{comb}	72.28	25	24.72

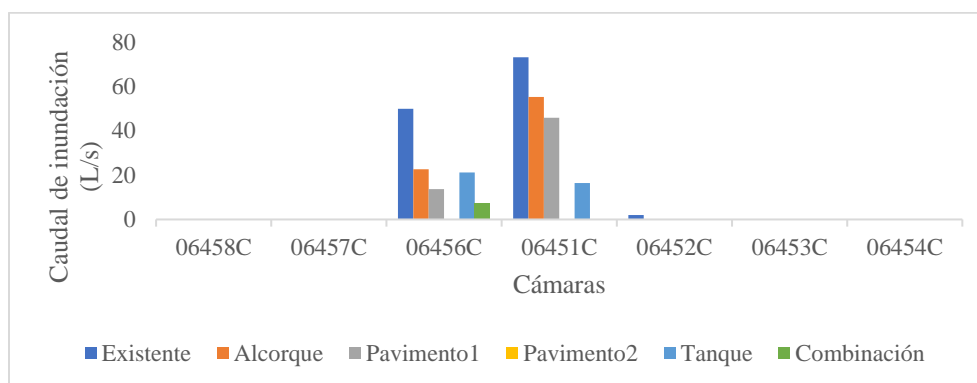
Nota: * Pav 1 corresponde a tipología con mitad de ancho de vía (3 m). Pav 2 corresponde a tipología con ancho de vía completo (6 m). TComb corresponde a combinación de alternativas.

En la Figura 66 se muestra la reducción del caudal de inundación que presenta cada una de las tipologías SUDS respecto a la simulación inicial. Para la cámara 06458C, 06457C, 06453C y 06454C no se presenta inundación para esta condición de lluvia. Para la cámara 06451C se atenúa la inundación en su totalidad con los pavimentos permeables 2 y combinación

de alternativas, se reduce el caudal de inundación en gran medida para los tanques de detención en 77.59% y para los alcorques y pavimentos permeables 1 en 24.37 y 37.23%. Para la cámara 06456C se atenúa la inundación con los pavimentos permeables 2 y se reduce el caudal de inundación por encima del 50% para las demás alternativas. Y para las cámaras 06452C se logra atenuar el caudal de inundación en su totalidad para todas las tipologías.

Figura 66

Caudal de inundación presente en las cámaras del tramo 1 por tipología – periodo de retorno de 5 años



8.7.6 SUDS para el tramo 1 de la cuenca de estudio

De acuerdo con los resultados anteriores se identifica que para la cuenca de estudio en su tramo 1, las tipologías que presentan mejor comportamiento en reducción del caudal pico en la salida de la cuenca para los periodos de retorno de 100 y 50 años son tanques de detención y combinación de alternativas (9.21 y 8.96% - 11.33 y 13.67%), que aunque no alcanzan a cumplir con la normatividad vigente de reducir el caudal pico en un 30% (Resolución 0799 de 2021), se obtienen mayores resultados que los presentados por Rey (2019) en su estudio realizado en la cuenca quebrada Palogrande, donde concluye que la implementación de tanques de detención 1100 y 10000 L prefabricados aunque resultan una buena alternativa no logran llegar a reducir el

caudal pico en un 25%, esto se debe a las diferencias en la metodología de predimensionamiento utilizada para dimensionar las estructuras de detención. Del mismo modo, Martínez (2013) seleccionó como mejor alternativa de control y regulación de agua lluvias en la ciudad de Palmira los tanques de detención, logrando evitar los problemas de inundaciones para un periodo de retorno de 25 años en la zona de estudio. Por tanto, se demuestra que estas alternativas propuestas lograron reducir el caudal de inundación en su totalidad, exceptuando las cámaras 06456C y 06451C que presentaron un valor de reducción menor al 30% para los periodos de retorno de 100 y 50 años.

Por otra parte, para los periodos de retorno de 25, 10 y 5 años la tipología de alternativa que mejor desempeño presenta en la reducción del caudal pico son los pavimentos permeables 2 (ancho de vía 6 m) con valores de 25.60, 68.21 y 88.24%, cumpliendo con la reducción del caudal pico por normativa para los periodos de retorno de 10 y 5 años. Real (2021) en su estudio realizado en el sector Ciudadela El Recreo 5ta (ciudad Durán, Ecuador) observa que el pavimento permeable es la estructura más eficiente, logrando obtener porcentajes de reducción de caudales pico de 13, 12 y 9% en periodos de 5, 10 y 25 años respectivamente. También, añade que los resultados de estas tipologías varían de acuerdo con las características de espacio, ubicación geográfica, topografía, intensidad de lluvia, niveles de inundación, entre otras que puedan estar presentes en la zona de estudio.

Cabe destacar que a pesar de que los alcorques inundables no presentan reducciones significativas en caudales pico respecto a las otras alternativas, su implementación añade otros beneficios ecológicos y sociales como la regulación de temperatura (islas de calor), mejora en la calidad del aire, disminución de la contaminación paisajística y reducción de la impermeabilización del suelo (CIRIA C753, 2015).

Para todos los tiempos de retorno las alternativas SUDS propuestas logran retrasar el caudal pico entre 5 y 15 minutos respectivamente, siendo este factor importante para las instituciones y entes involucrados en la toma de decisiones respecto al futuro de los drenajes sostenibles y desarrollo de las ciudades, porque estas alternativas favorecen al sistema convencional existente, ya que uno de los objetivos principales de los SUDS es no afectar negativamente el medio receptor tratando en lo posible conservar las condiciones de drenaje pre urbanizadas y el ciclo hidrológico. Lo anterior, debe ser visto desde la óptica alternativa de que el drenaje urbano hace referencia a manejar el agua lluvia tan pronto como caiga (Alferink & Wavin Overseas, 2012) y así conseguir beneficios integrales y no solo en términos de cantidad de agua con reducción de caudales pico e inundaciones, sino también con mejoras en el funcionamiento del alcantarillado existentes y reducción de velocidades, sedimentos y contaminantes, del mismo modo que se obtienen ventajas económicas, ambientales, recreacionales, biológicas, técnicas, estéticas y silvestres.

Los SUDS se conciben como alternativas complementarias a los sistemas convencionales, que permitirán proyectar soluciones holísticas para proteger la calidad del agua subterránea, preservar el paisaje, mejorar la salud, fomentar la educación ecológica en los habitantes, mejorar la apariencia de las zonas urbanas, cuidar los regímenes naturales de los cuerpos de agua superficiales, entre otros. De igual forma, se destaca la posibilidad de uso en zonas con poco desarrollo y previamente urbanizadas para lo cual se lleva a cabo un proceso de rehabilitación. Algunas de las estructuras requieren poco espacio y pueden tener múltiples usos maximizando así el uso del suelo (Lovado, 2013).

9 Productos

En el proceso de desarrollo del presente trabajo de investigación se obtuvieron tres productos relevantes: el primero consistió en una ponencia virtual en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México 2021 (ver anexo 13.4); el segundo es la obtención de una Beca del fondo de becas de investigación de Manizales + Innovadora, siendo uno de los 20 trabajos de investigación de maestría seleccionados en la cohorte 1 y un tercero que es un artículo de corte científico que fue publicado en febrero de 2023.

10 Conclusiones

El uso de nuevas alternativas de drenaje urbano como complemento a los sistemas convencionales permite mejorar las condiciones de funcionamiento de los sistemas de recolección y transporte de aguas lluvias de la ciudad de Manizales, reduciendo para el tramo 1 de la cuenca de estudio los porcentajes de caudales pico para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años en el orden de 9, 13, 25, 68 y 88% respectivamente.

El uso de las alternativas SUDS mitigan los caudales de inundación presentes en las cámaras de inspección del tramo 1 de la cuenca de estudio y se logra evitar o reducir la inundación en todas las cámaras, donde la reducción más baja es del 2% para un periodo de retorno de 100 años.

En la cuenca estudiada se identificaron 14 inundaciones reportadas entre los años 1953 y 2019, donde los eventos de inundación se reparten entre los barrios Villa Pilar (7), Chipre (6) y Sacatín (1), mostrando que investigaciones como la presente, son de gran relevancia para proyectar ciudades más sostenibles. Además, ayudan a identificar zonas de estudio en la ciudad, donde son recurrentes las inundaciones.

La impermeabilización de la zona de estudio alcanzó un valor del 80% de zonas duras abarcando principalmente vías y viviendas, lo cual ocasiona que la infiltración natural sea limitada, se disminuyan los tiempos de concentración y aumenten las velocidades de escorrentía y ante eventos de lluvias intensos las redes del sistema de drenaje urbano sean insuficientes, ocasionando inundaciones como se detectó en la investigación.

El sistema de drenaje en relación con sus colectores está conformado por 17458.58 m de longitud de tubería, donde el 11.33% corresponde a material tipo PVC y el restante a concreto/hormigón, 190.22 m box culvert y los diámetros oscilan entre 6 y 36”.

El sistema de drenaje en relación con sus cámaras de inspección presentó profundidades de instalación entre 0.6 y 15.1 m, donde el 5.77% es menor a 1.2, 42.70% entre 1.2 y 2, 38.02% entre 2 y 3, 7.75% entre 3 y 4, 3.72% entre 4 y 5 y 2.34% mayores a 5m.

Se seleccionaron nueve eventos de lluvia para calibración y validación, donde se seleccionaron ocho eventos clasificados como fuertes y un evento clasificado como moderado, debido a que la investigación se orienta a conocer el comportamiento del sistema de drenaje bajo condiciones de eventos extremos de caudal que generen inundaciones. Para los eventos escogidos se obtuvieron índices de Nash-Sutcliffe entre 0.21 y 0.78, considerándose el ajuste como satisfactorio.

Mediante la implementación y simulación del modelo hidráulico para los diferentes periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años fue posible verificar el funcionamiento del sistema existente en relación con capacidad de las tuberías, de velocidades, determinación de cámaras susceptibles a inundación, donde, de los 589 conductos existentes, 320, 308, 296, 263 y 240 sobrepasan el 93% de la capacidad de las tuberías y 88, 86, 81, 79 y 76 sobrepasan la velocidad máxima permitida de 5 m/s de acuerdo con la Resolución 0330 de 2017. De igual manera, se presentó inundación en las cámaras para los periodos de retorno de 100, 50, 25, 10 y 5 años en porcentajes de 43.96, 42.34, 40.18, 34.23 y 29.37% respectivamente, del total de 555 cámaras.

El análisis hidráulico de la cuenca de estudio llevó a la identificación de 17 zonas críticas, donde se presentaron cámaras con inundación para todos los periodos de retorno con valores de caudal de inundación que pueden sobrepasar los 1000 L/s.

Los resultados obtenidos permitieron, con la ayuda de un panel de expertos y un análisis multicriterio, realizar una valoración y calificación de diferentes alternativas de SUDS, bajo

criterios socioambientales, económicos y técnicos aplicables a la zona de estudio. Además, condujeron a identificar que las alternativas con mayor puntuación y aplicables a la zona de estudio son tanques de almacenamiento, pavimentos permeables y alcorques.

Las diferentes alternativas de SUDS propuestas mitigan en cierto grado el caudal pico y de inundación presente en la cuenca de estudio para los diferentes periodos de retorno evaluados como se demostró para el tramo 1; aunque no reducen para todos los casos el caudal pico en un 30%, añaden otros beneficios ecosistémicos y de comunidad indirectos relacionados con la disminución de la impermeabilización del suelo, regulación de temperaturas, mejora de la calidad del aire, reducción de la contaminación paisajística, entre otras.

Para el periodo de retorno de 100 años las alternativas de SUDS que mejor resultados presentaron en reducción del caudal pico fueron los tanques de detención (9.21%) y la combinación de alternativas (8.69%). De igual manera, mitigaron significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 2 cámaras, donde se redujo el caudal de inundación entre un 34 y 40%.

Para el periodo de retorno de 50 años las alternativas de SUDS que mejor resultados presentaron en reducción del caudal pico fueron los tanques de detención (11.33%) y la combinación de alternativas (13.67%). De igual manera, mitigaron significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 2 cámaras, donde se redujo el caudal de inundación entre un 39 y 60%.

Para el periodo de retorno de 25 años las alternativas de SUDS que mejor resultados presentaron en reducción del caudal pico fueron los pavimentos permeables 2 (25.6%), tanques de detención (13.88%) y la combinación de alternativas (17.48%). De igual manera, los pavimentos permeables 2 mitigaron significativamente la inundación de las cámaras,

exceptuando 1 cámara, donde se redujo el caudal de inundación en un 89.72%, y los tanques de detención y la combinación de alternativas mitigaron significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 2 cámaras, donde se redujo el caudal de inundación por encima del 40%.

Para el periodo de retorno de 10 años las alternativas de SUDS que mejor resultados presentaron en reducción del caudal pico fueron los pavimentos permeables 2 (68.21%), tanques de detención (17.31%) y la combinación de alternativas (24.65%). De igual manera, los pavimentos permeables 2 mitigaron la inundación de todas las cámaras y los tanques de detención y la combinación de alternativas mitigaron significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 2 cámaras, donde se redujo el caudal de inundación por encima del 48%.

Para el periodo de retorno de 5 años las alternativas de SUDS que mejor resultados presentaron en reducción del caudal pico fueron los pavimentos permeables 2 (88.24%), tanques de detención (16.90%) y la combinación de alternativas (24.72%). De igual manera, los pavimentos permeables 2 mitigaron la inundación de todas las cámaras, la combinación de alternativas mitigó significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 1 cámara, donde se redujo el caudal de inundación por encima del 84% los tanques de detención mitigaron significativamente la inundación de las cámaras, exceptuando 2 cámara, donde se redujo el caudal de inundación por encima del 57%.

Para los periodos de retorno analizados de 100, 50, 25, 10 y 5 años el caudal pico se alcanza a los 20 minutos de iniciada la lluvia e incrementa su valor de caudal en promedio en un 2.9%.

Todas las alternativas de SUDS simuladas logran mitigar en cierto grado el caudal pico y de inundación estimado, donde el porcentaje de reducción se ve influenciado de acuerdo con la tipología de SUDS y periodo de retorno seleccionado. Sin embargo, la implementación de estas

alternativas debe trascender y verse desde una óptica integral, porque trae consigo beneficios y ventajas adicionales relacionadas con ámbitos económicos, ambientales, sociales y técnicos.

Se construyó un modelo hidrodinámico del sistema de drenaje existente en SWMM, donde las características de las superficies de drenaje (viviendas, vías y zonas duras y blandas), condiciones topográficas y distribución de las redes de alcantarillado influyen directamente el nivel de discretización y limitan el tamaño de las áreas de drenaje, generando incertidumbre en el rango apropiado para la discretización y así condicionando los resultados obtenidos en las simulaciones.

Dada las características propias de la cuenca referente a su superficie, donde se combinan viviendas, vías y zonas blandas y duras con condiciones topografía relevantes, la discretización fue compleja, sin embargo, este nivel de discretización permitió la implementación de los SUDS en el modelo SWMM, sin realizar modificaciones posteriores a esta.

El modelo construido en SWMM para la cuenca de estudio fue más sensible a los parámetros de coeficiente de Manning impermeable, pendiente, ancho y porcentaje de impermeabilidad.

La construcción del modelo implica la obtención y el procesamiento de grandes volúmenes de información, donde las herramientas complementarias a SWMM y los sistemas de información geográfica ayudan a reducir el tiempo de análisis y cambio de parámetros para ejecutar las diferentes simulaciones.

11 Recomendaciones

En términos de instrumentación de la cuenca de estudio es necesario aumentar los esfuerzos entre los diferentes organismos y proponer diferentes estudios investigativos para optimizar los datos de medición de las estaciones existentes y aumentar la cantidad de estas en la zona (más cuencas experimentales), con el fin de mejorar los procesos de calibración y validación de los modelos hidrodinámicos. De igual manera, se recomienda realizar juntamente con la calibración manual una automática que permita ajustar en mayor grado los parámetros y de esa forma replicar el estudio en otros lugares de la ciudad de Manizales o con características similares.

Se recomienda continuar con la validación de las propuestas de SUDS en la ciudad de Manizales empleando modelación hidrodinámica, con el fin de ajustar y normalizar las tipologías aplicables a la zona, con un ajuste de parámetros de diseño de tipo hidrológico e hidráulico.

Se recomienda a menor escala realizar investigaciones que permitan validar específicamente las propuestas planteadas, donde se diseñe a detalle las estructuras SUDS y así definir para estas tipologías las dimensiones y características adecuadas para mitigar las inundaciones de acuerdo con lo que establece la normatividad.

Se exhorta a la ampliación de este trabajo investigativo desde el punto de vista de validar las mismas o diferentes tipologías de SUDS y compararlas, no solo para el sector de estudio, sino para otros sectores de la ciudad (u otras localidades), donde se mejore y afine la calibración, validación y dimensionamiento de los SUDS y se establezcan escenarios que logren alcanzar los porcentajes de reducción de caudales picos establecidos por la normatividad y mitiguen las inundaciones en su totalidad y de igual manera mejoren las condiciones de funcionamiento de los sistemas de drenaje existentes. Por tanto, es relevante que las investigaciones futuras contemplen

la posibilidad de realizar análisis técnico-económicos que permitan definir en qué condiciones son aplicables alternativas SUDS en la ciudad o con características similares.

Se recomienda a las diferentes instituciones de la ciudad de Manizales la posibilidad de que ejercicios como el de la presente investigación se repliquen en los estudios de planificación de ciudad (realización u actualización del POT y planes maestros de acueducto y alcantarillado), es decir, que se combine la consulta de expertos, análisis multicriterio y modelación exhaustivas para la generación de políticas y lineamientos enfocados directamente en los SUDS, debido a que estas se encuentran inmersamente en un “limbo”, en que no existe claridad o al menos en lo revisado hasta la fecha y encontrado a lo largo de esta investigación en cuanto a tipologías y parámetros de diseños hidrológicos e hidráulicos que ayuden a los consultores/investigadores a proponer diferentes alternativas para las edificaciones existentes y proyectos futuros que permitan mitigar en cierto grado las inundaciones y mejoren las condiciones de funcionamiento de los sistemas convencionales existentes, y así, alcanzar un desarrollo urbano controlado y enfocado sosteniblemente.

Se recomienda la implementación de SUDS tanto en zonas donde se evidencie problemas con el drenaje convencional existente como de futura expansión de la ciudad, porque favorecen al funcionamiento de este y presentan beneficios integrales como prevención frente a inundaciones, mantenimiento y restauración del flujo natural en corrientes urbanas, menor interferencia en los regímenes naturales de las masas de aguas receptoras, recarga de acuíferos, creación de entornos naturales de valor paisajístico, mejora la calidad estética de zonas urbanas, mejora la calidad de las aguas de esorrentía, reducción de la cantidad de contaminantes que llegan al medio receptor, enriquecimiento de la biodiversidad, reducción del efecto “isla de calor” en las ciudades, contrarrestando el aumento de temperatura provocado por superficies

asfaltadas y hormigonadas, permite el desarrollo urbano en espacios con el sistema de alcantarillado colapsado, soluciona la incapacidad hidráulica de la red de colectores convencional debida al rápido crecimiento urbano de una zona, evitando la necesidad de desdoblamiento de la red, embellecen la construcción urbana, son considerados como sistemas de drenaje de aguas pluviales de bajo coste por requerir de una menor inversión en su construcción comparada con otros métodos convencionales, disminuyen las pérdidas económicas por daños provocados por inundaciones al pasar a ser el agua de precipitación un recurso disponible e incluirse en la gestión de recursos hídricos, disminuye el gasto en la captación y otras obras hidráulicas, incremento del valor añadido de las urbanizaciones, debido a la mejora del paisaje del entorno y de la dotación de zonas recreacionales adicionales, reducen los costes en de funcionamiento de las depuradoras al disminuir la cantidad de agua a tratar que llega a las mismas, la cantidad de energía invertida en el tratamiento y al no alterarse frecuentemente el patrón de contaminantes para el que la depuradora ha sido diseñada.

Es oportuno generar una base de datos abierta que recopile la información obtenida por las diferentes investigaciones realizadas en SUDS, en relación con metodologías planteadas y modelación hidrodinámica, donde se guarden archivos de los sistemas de información geográfica (shape) y software de modelación (inp) empleados, y así permitir, facilitar y actualizar la información de la ciudad con las investigaciones futuras.

Es necesario realizar modelaciones hidrodinámicas que establezca la eficiencia de captación de agua pluvial por los sumideros para las condiciones propias de la zona de estudio, con la finalidad de ejecutar un modelo que ayude a evaluar el flujo superficial en las vías y la influencia que puede tener esta variable en el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje, además, compararlo con los resultados obtenidos con este trabajo investigativo.

12 Bibliografía

Aguas de Manizales. (2019). *Informe final de auditoria externa de gestión y resultados Aguas de Manizales S.A E.S. P 2018*.

https://www.aguasdemanizales.com.co/Portals/Aguas2016/AtencionUsuario/Transparencia/Auditoria_entes_externos_2018.pdf?ver=2019-06-25-162156-850

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(7), 4253–4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>

Alcaldía de Manizales. (2020). *Plan de Desarrollo Manizales 2020 - 2023*.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2011). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS para el plan de ordenamiento zonal norte POZN*.

<http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>

Alferink, F., & Wavin Overseas. (2012). *Urban Water Management: Principles, desing and applicattion*. Aprocof.

Arteaga, G. (2015). Análisis de indicadores de densidad en el municipio de Manizales, Colombia. *Revista Ciudad. Estados Política*, 2(2462–9103), 43–53.

<https://www.researchgate.net/publication/288827494>

Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), 6787–6798.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>

BC Noticias. (2018). *En Manizales Cayó Aguacero Acompañado de Granizo*.

<https://www.bcnoticias.com.co/en-manizales-cayo-aguacero-acompanado-de-granizo/>

- BC Noticias. (2019). *Aguacero Ocasiona Inundaciones en Manizales*.
<https://www.bcnoticias.com.co/aguacero-ocasiona-inundaciones-en-manizales/>
- Betancourth, A. (2019). *Informe de Actividades. Traslado Sensor de Nivel Quebrada El Triunfo Mirador de Villapilar*.
- Butler, D., & Parkinson, J. (1997). Towards sustainable urban drainage. *Water Science and Technology*, 35(9), 53–63. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00184-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00184-4)
- Caldas al día. (2019). *Inundaciones y Daños por Fuerte Tempestad en Manizales*.
<https://www.caldasaldia.co/inundaciones-y-danos-por-fuerte-tempestad-en-manizales/>
- Camargo Ramírez, E. A., & Lozada Chamorro, J. H. (2018). *Diseño de sistema urbano de drenaje sostenible en Bogotá, calle 127 con Autopista Norte*.
<http://hdl.handle.net/10983/16424>
- Cárdenas, E., Albiter, Á., & Jaramillo, J. (2016, December 14). *Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua*. <https://www.redalyc.org/journal/104/10450491009/html/>
- Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballester, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible. *Interciencia*, 30(5), 255–260. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33910403.pdf>
- Cecilia, D., & Ávila, M. (2012). *Techos verdes como sistemas de urbanos sostenibles*.
- Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Lavoisier Tec & Doc.
- Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M. R., Rauch, W., Schilling, W., & Urbonas, B. (2007). Toward the sustainable management of urban storm-water. *Indoor and Built Environment*, 16(3), 273–285. <https://doi.org/10.1177/1420326X07078854>
- CIIA. (2017). *Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje*

Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Producto 3 - Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje

Sostenible . Universidad de los Andes.

CIRIA C523. (2001). *Sustainable urban drainage systems, best practice manual for England.*

Scotland, Wales and Northern Ireland. Construction Industry Research and Information

Association Londres.

CIRIA C696. (2007). *The SUDS manual* (CIRIA (ed.); Issue 0).

CIRIA C753. (2015). *The SuDS Manual* (CIRIA). CIRIA.

Department of Environmental Conservation. (2010). *Stewart airport pervious asphalt pavement.*

<https://www.dec.ny.gov/lands/73105.html>

Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and

recommendations for future directions. In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 186, Issues

1–4, pp. 351–363). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>

EAAB ESP. (2018). *NS 166 Criterios para Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de*

Drenaje Sostenible SUDS. [https://www.cccs.org.co/wp/download/1-ns-166-criterios-para-](https://www.cccs.org.co/wp/download/1-ns-166-criterios-para-diseño-y-construcción-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-pdf/?wpdmdl=15970&refresh=631cc9eea0c531662831086)

[diseño-y-construcción-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-](https://www.cccs.org.co/wp/download/1-ns-166-criterios-para-diseño-y-construcción-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-pdf/?wpdmdl=15970&refresh=631cc9eea0c531662831086)

[pdf/?wpdmdl=15970&refresh=631cc9eea0c531662831086](https://www.cccs.org.co/wp/download/1-ns-166-criterios-para-diseño-y-construcción-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-pdf/?wpdmdl=15970&refresh=631cc9eea0c531662831086)

Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater

drainage. *Environmental Modelling and Software*, 22(3), 394–405.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>

EMCALI E.S.P. (2018). *Lineamientos Generales para el Control de los Caudales de Aguas*

Lluvias EEntrEgados al Sistema de Drenaje de la Ciudad de Cali.

<https://es.scribd.com/document/483014152/Lineamientos-SUDS-v2018-pdf>

- EPA. (2005). *SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 VE. Manual de Usuario*.
http://www.instagua.upv.es/swmm/descargas/Manual_SWMM5vE.pdf
- EPA. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.1. United States Environment Protection Agency*. EPA.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Fresno, D. C., Bayón, J. R., Hernández, J. R., & Muñoz, F. B. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5).
- Garzón, A., & Trivales, A. (2020). *Diseño de piloto de sistema urbano de drenaje sostenible-SUDS* [Universidad Cooperativa de Colombia].
https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/19766/2/2020_Disenio_piloto_sistema.pdf
- Gobernacion de Caldas, Corpocaldas, & UAM. (2019). *Agendas de Cambio Climático*.
https://corpocaldas2022.blob.core.windows.net/webadmin/file_Manizales_DmBHZVWP.pdf
- Gómez, M. (2007). Hidrología urbana. In *Flumen Dinámica fluvial i enginyeria Hidrológica* (Ed.), *Colección CBI* (1st ed.). Distribuidora Alfambra de Papelería S.L.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (S. A. D. C. V. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Sexta).
- HidrologíaSostenible. (n.d.). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS*. Retrieved

October 4, 2020, from <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>

Huong, H. T. L., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 379–394. <https://doi.org/10.5194/hess-17-379-2013>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. In *Cartilla ENA 2018*. http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf

INVIAS. (2009). *Manual de Drenajes para Carreteras*.

<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>

IPWEA. (2016). *Queensland Urban Drainage Manual Fourth Edition*. Institute of Public Works Engineering Australasia, Queensland (IPWEAQ).

La Patria. (2017). *Lluvias provocaron inundaciones en el occidente de Manizales*.

<https://www.lapatria.com/manizales/lluvias-provocaron-inundaciones-en-el-occidente-de-manizales-351995>

La Patria. (2018). *Fin de semana estuvo pasado por agua en Manizales*.

<https://www.lapatria.com/manizales/fin-de-semana-pasado-por-agua-en-manizales-411481>

La Patria. (2017). *Planean Obra para Evitar Inundaciones en Edificio de Villa Pilar*.

<https://www.lapatria.com/manizales/planean-obra-para-evitar-inundaciones-en-edificio-de-villa-pilar-404632>

Leopold, L. (1968). Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. *Geological Survey Circular*, 554, 1–21.

<http://enviro.lclark.edu/resources/Tryon/Water/Hydrology.pdf>

- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Zong, M., Zhao, M., & Walter, M. T. (2019). Characteristics of impervious surface and its effect on direct runoff: A case study in a rapidly urbanized area. *Water Science and Technology: Water Supply*, *19*(7), 1885–1891.
<https://doi.org/10.2166/ws.2019.064>
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros* (B. Mc Graw Hill Latinoamericana S.A. (ed.); Segunda ed).
- Lovado, J. (2013). *Retención de Aguas Lluvias a Nivel Predial para Reducir Picos y Volúmenes de Escorrentía* [Universidad de los Andes]. <https://pavcowavin.com.co/retencion-de-aguas-lluvia-para-reducir-volumenes-de-escorrentia>
- Martínez Acosta, J. A. (2017). Metodología para Determinar el Potencial de Implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de sistemas de información geográfica (Sig). Caso de estudio bogotá D.C., Colombia. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.
- Martínez, G. (2013a). Sistemas urbanos de drenaje sostenible “SUDS” como alternativa de control y regulación de la ciudad de Palmira. *Journal of Petrology*, *369*(1), 1689–1699.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003><https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018><http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005><http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757><http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005>
- Martínez, G. (2013b). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible “SUDS” como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Martínez, G. (2013c). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible “SUDS” como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira* [Universidad Militar

Nueva Granada].

[https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11075/INFORME_FINAL_SUDS-GEINNER MARTINEZ C-23 01_2014.pdf;jsessionid=CCD893302460513003788AB790EFBE53?sequence=1](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11075/INFORME_FINAL_SUDS-GEINNER_MARTINEZ_C-23_01_2014.pdf;jsessionid=CCD893302460513003788AB790EFBE53?sequence=1)

Martínez, J. A. (2017). *Metodología para determinar el potencial de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de sistemas de información geográfica (SIG). Caso de estudio Bogotá D.C., Colombia (tesis de maestría)* [Universidad de los Andes].

https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzMjAxNjk5LzEwODc2LnBkZg%3D%3D

Medina, D. L., Aguilar, L. Y., & Calderón, A. (2018a). *Análisis comparativo de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) caso de estudio carrera 4 y carrera 5 entre calles 68 y 71, sector chapinero alto, Bogotá, Colombia.*

https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22379/1/TRABAJO_DE_GRADO.pdf

Medina, D. L., Aguilar, L. Y., & Calderón, A. (2018b). *Análisis comparativo de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) caso de estudio carrera 4 y carrera 5 entre calles 68 y 71, sector chapinero alto, Bogotá, Colombia.*

Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>

Minister for Natural Resources and Water, & Minister Assisting the Premier in North Queensland. (2007). *Queensland Urban Drainage Manual*. Department of Natural Resources and Water.

- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 8 de junio. “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.”*
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2021). *Resolución 0799 de 2021.*
- Molina, M., Gutiérrez, L., & Salazar, J. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS para el Plan de Ordenamiento Zonal Norte POZN. In *Ambiente, Secretaria Distrital de Medio*.
<http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich.
- Momparler, S. (2008). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Agua y Servicios de Abastecimiento y Saneamiento*.
- Naciones Unidas. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo / ONU DAES / Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales*. 16 de Mayo. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles. *Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>)%0AAbstract : The principles governing the application of the conceptual model technique to river flow

forecasting are discussed. The necess

Ocampo, O., Vélez, J., Forero, T., & Marín, J. (2020). Análisis de Tendencias Climáticas con

RClimdex en el Departamento de Caldas, Colombia. *Scientia Et Technica*, 25(4), 595–603.

<https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.22517/23447214.22771>

Pareja, J., & Osorio, J. (1997). *Estudio Hidrológico de Caldas, Revisión y Actualización de las*

Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Universidad Nacional de Colombia, sede

Manizales.

Perales-Momparler, S, Andrés-Doménech, I., & Fernández, E. (2008). *Los sistemas urbanos de*

drenaje sostenible SUDS en la hidrología urbana.

[https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Escalante-](https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Escalante-3/publication/265057760_Los_sistemas_urbanos_de_drenaje_sostenible_SUDS_en_la_hidrogeologia_urbana/links/542434970cf26120b7a72371/Los-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-SUDS-en-la-hidrogeologia-ur)

[3/publication/265057760_Los_sistemas_urbanos_de_drenaje_sostenible_SUDS_en_la_hidrogeologia_urbana/links/542434970cf26120b7a72371/Los-sistemas-urbanos-de-drenaje-](https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Escalante-3/publication/265057760_Los_sistemas_urbanos_de_drenaje_sostenible_SUDS_en_la_hidrogeologia_urbana/links/542434970cf26120b7a72371/Los-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-SUDS-en-la-hidrogeologia-ur)

[sostenible-SUDS-en-la-hidrogeologia-ur](https://www.researchgate.net/profile/Enrique-Escalante-3/publication/265057760_Los_sistemas_urbanos_de_drenaje_sostenible_SUDS_en_la_hidrogeologia_urbana/links/542434970cf26120b7a72371/Los-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-SUDS-en-la-hidrogeologia-ur)

Perales-Momparler, Sara, & Andrés-Doménech, I. (2007). Los sistemas urbanos de drenaje

sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Equipamiento y Servicio*

Municipales, 24(133), 66–77. <https://doi.org/10.1152/ajpccell.00303.2005>

Perales-Momparler, Sara, Andrés-Doménech, I., Andreu, J., & Escuder-Bueno, I. (2015). A

regenerative urban stormwater management methodology: The journey of a Mediterranean

city. *Journal of Cleaner Production*, 109, 174–189.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.039>

Pratt, C. (2003). *Aplication of geosynthetics in Sustainable Drainage Systems*.

Real, J. (2021). *Evaluación de Infraestructura Verde Urbana Mediante el Uso de la Herramienta*

SWMM. Caso de Estudio: Durán. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Rey, D. (2019). *Propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente (tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Rodríguez, J., Rodríguez, J., Gómez-Ullate, M., & Castro, D. (2008). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). In *Interciencia*. I Congreso de Urbanismo y Ordenamiento del Territorio. "Ciudad Territorio."
- Rodríguez, L. (2011). *Revisión bibliográfica de los sistemas de drenaje sostenible* [Universidad de los Andes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14726/u470664.pdf?sequence=1>
- Rossmann, L. (2015). Storm Water Management Model User'S Manuel. Version Ii. *Environ Prot Technol Ser EPA, 670 /2-75-017*.
- Roy, A. H., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., Shuster, W. D., Thurston, H. W., & Brown, R. R. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States. In *Environmental Management* (Vol. 42, Issue 2, pp. 344–359). Springer.
<https://doi.org/10.1007/s00267-008-9119-1>
- Rudas, D. (2019, April 30). *INGENIERÍA DE DRENAJE - UNC: CUBIERTAS VEGETALES: SUDS*. <https://ingenieriadrenajeunc2019.blogspot.com/2019/04/cubiertas-vegetales-suds.html>
- Santos, E., & Cubides, E. (2018). Urban runoff control through Sustainable Urban Drainage Systems: Wells/ Infiltration Trenches. *Ciencia e Ingeniería, 12*(24), 32–42.
- Sañudo, L., Rodríguez, J., & Castro, D. (2012). *Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1647.6003/1>
- Scraggs, C., & Lemckert, C. (2004). *Preliminary estimation methods for sizing detention basins*

in Queensland. 15 Australasian Fluid Mechanics Conference.

https://www.researchgate.net/publication/29453456_Preliminary_estimation_methods_for_sizing_detention_basins_in_Queensland

Secretaría de Planeación Municipal de Manizales. (2017). *Plan de Ordenamiento Territorial 2017 – 2031 - Manizales*. <https://manizales.gov.co/plan-de-ordenamiento-territorial-2017-2031/>

Sedano, K., Carvajal, Y., & Ávila, Á. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Semillas, Cc*, 47–53.

https://www.researchgate.net/publication/281015880_Variabilidad_climatica_cambio_climatico_y_gestion_integrada_del_riesgo_de_inundaciones_en_Colombia

Silvia, V., & Villegas, S. (2011). *Modelo de priorización de proyectos de inversión pública con enfoque multicriterio : caso seMapa Priority model for investment projects with public multicriteria : study case : semaPa*.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Evaluación Integral de Prestadores Aguas de Manizales S.A. E.S.P.* <http://www.superservicios.gov.co/Acueducto-Alcantarillado->

Te Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada. Traducido al Español Juan Saldarriaga, Revisión Técnica Germán Santos*. (E. N. S.A. (ed.); Primera ed). McGraw Hill Interamericana S.A.

Torres, A. (2004). *Apuntes de clase sobre hidrología urbana* (Primera). Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=Vw1HHmMdvQ4C&oi=fnd&pg=PA9&dq=hidrologia+urbana&ots=N2hXRDnsNd&sig=K1EtnT4v9w4qGnN->

GIBELSgI0js#v=onepage&q=hidrologia urbana&f=false

Trapote, A., & Fernández, H. (2016). Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible. In *Técnicas de drenaje urbano sostenible*. Universidad de Alicante.

<http://www.agroambient.gva.es/documents/163005665/163975683/AGRICULTURA8-16I+memoria/1d8cb413-3eb3-4f5e-a247-e4466a59b21c>

Trapote Jaume, A. (2016). Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible. *Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 26–40.

<https://doi.org/10.22507/jet.v5n2a1>

USDA-ARS. (2008). *STEWARDS*. <https://www.nrrig.mwa.ars.usda.gov/stewards/stewards.html>

Vélez, J., & Botero, A. (2010). Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la Cuenca Experimental Urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(0012–7353), 58–71. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/37667/25640-90010-1-PB.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Vidal, C., Bravo, J., Cajiao, E., Meza, P., Arango, S., Franco, D., & Calderón, J. (2012). *Guía metodológica para la priorización de proyectos: Un enfoque aplicado a la infraestructura, la logística y la conectividad*.

Wanielista, M., & Chopra, M. (2007). *Performance assessment of Portland Cement pervious pavement. Report 4 of 4: Performance assessment of a pervious concrete pavement used as a should for an interstate area parking lot, final report*.

Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water (Switzerland)*, 6(4), 976–992.

<https://doi.org/10.3390/w6040976>

13 Anexos

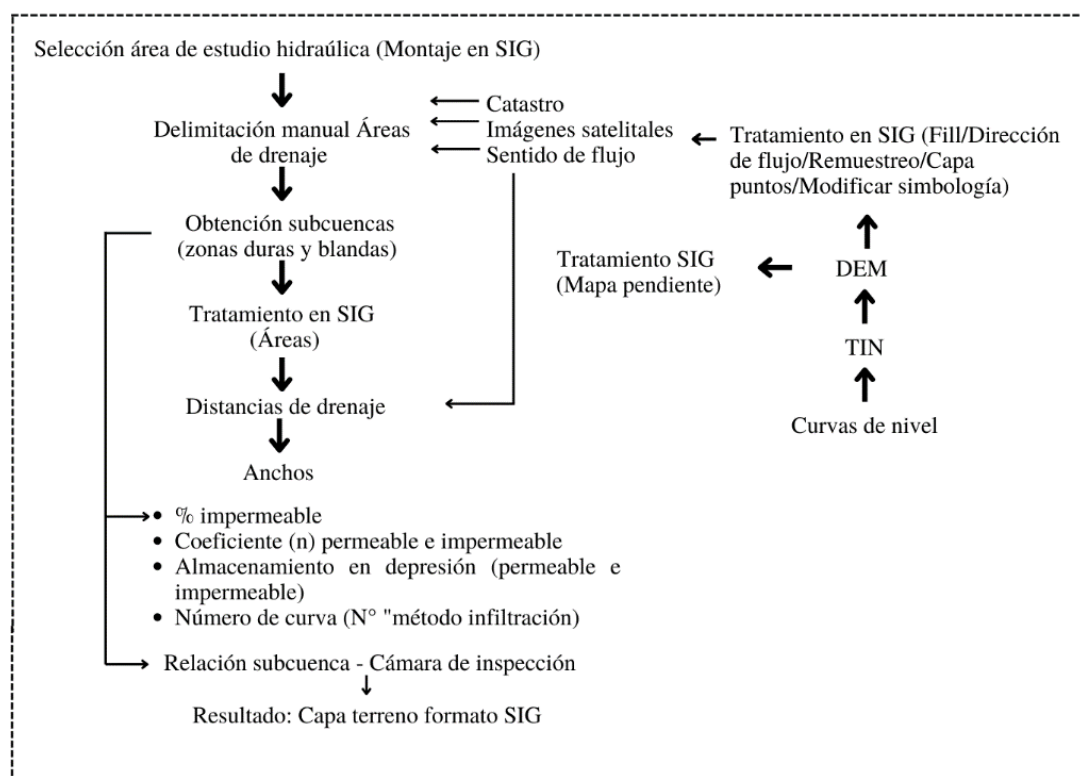
13.1 Flujogramas metodológicos

13.1.1 Discretización

En la Figura 67 se muestra los pasos seguidos para realizar la discretización de la cuenca.

Figura 67

Flujograma metodológico discretización

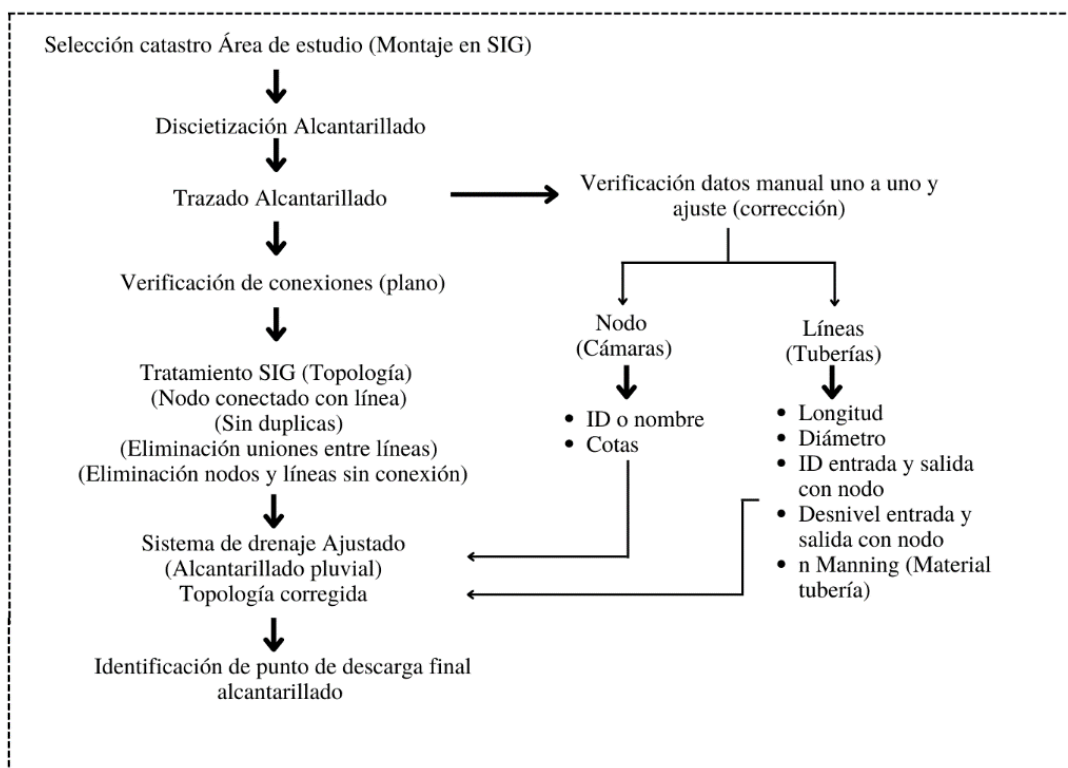


13.1.2 Sistemas de drenaje pluvial

En la Figura 68 se muestra los pasos seguidos para identificar el sistema de drenaje de la cuenca.

Figura 68

Flujograma metodológico sistema de drenaje pluvial

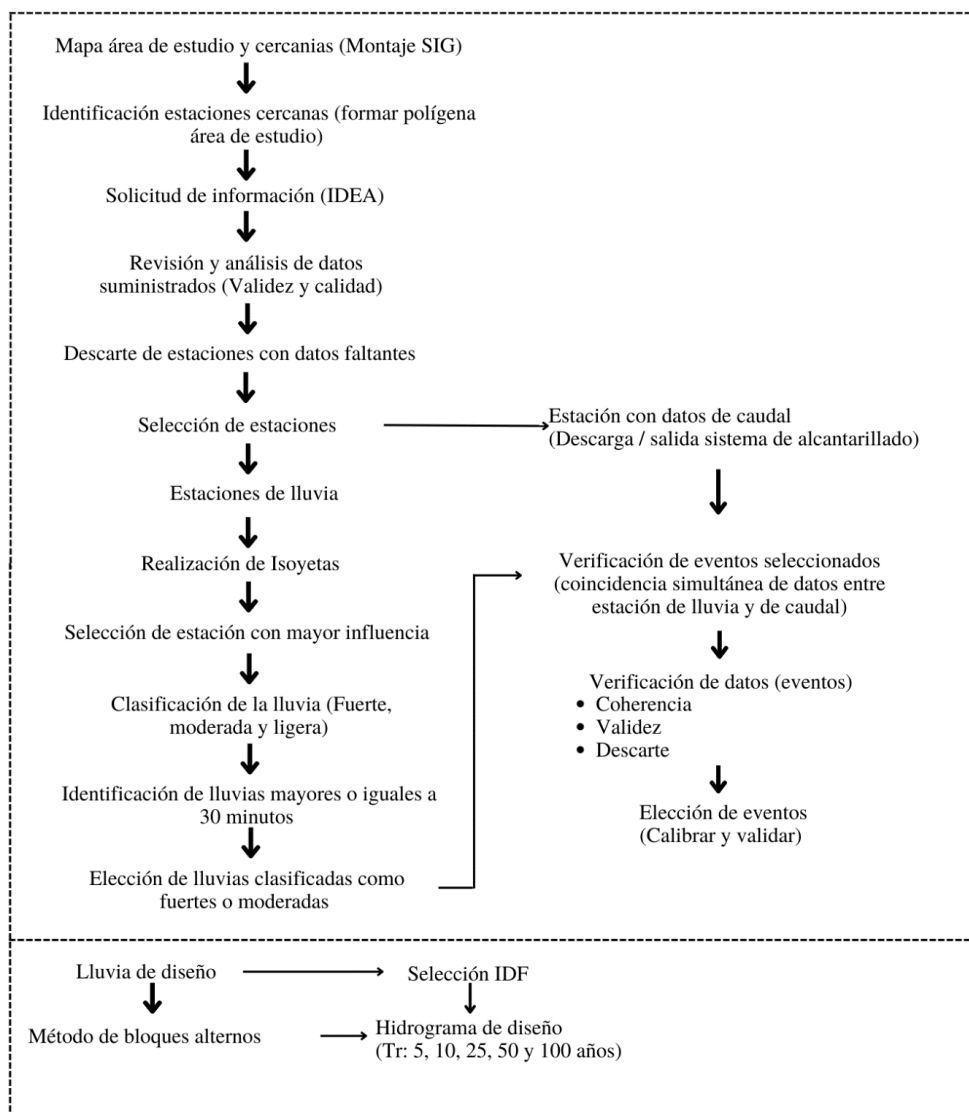


13.1.3 Datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño

En la Figura 69 se muestra los pasos seguidos para identificar los datos de lluvia y caudal y calcular la lluvia de diseño de la cuenca.

Figura 69

Flujograma metodológico datos de lluvia, caudal y lluvia de diseño



En la Tabla 55 se muestra los diferentes tiempos de concentración estimados para la cuenca de estudio y en la Tabla 56 los parámetros definidos previamente al estimativo.

Tabla 55*Tiempos de concentración cuenca de estudio*

#	Autor de la ecuación	Tc (min)
1	Bransby Williams	50.02
2	California culvert practice	17.39
3	Clark	29.84
4	Ec. Retardo SCS	26.24
5	Federal Aviation Agency - FAA	36.04
6	Giandotti	50.92
7	Johnstone Cross	54.37
8	Kerby - Hatheway	12.33
9	Kirpich	16.96
10	Racional generalizado	23.03
11	Passini	22.41
12	Pilgrim	37.63
13	Témez	48.27
14	Valencia y Zulubaga	43.66
15	Ventura - Heras	19.42
	Promedio	32.57
	Desviación estándar	14.20
	Coefficiente de variación	0.44
	Mediana	29.84

El valor medio para los tiempos de concentración es de 33 minutos, con una variación importante de acuerdo con la ecuación seleccionada, es el caso de la ecuación propuesta por Kerby – Hatheway que arroja el valor más bajo (12.33 min), lo cual se debe a que es un método que involucra la rugosidad, lo cual puede haber sido subestimado en la cuenca. En cuanto a la ecuación de Johnstone Cross sobrevalora el valor del tiempo de concentración (54.37 min). Por tanto, el valor del tiempo de concentración asumido será de 30 minutos.

Tabla 56*Parámetros para estimación del tiempo de concentración*

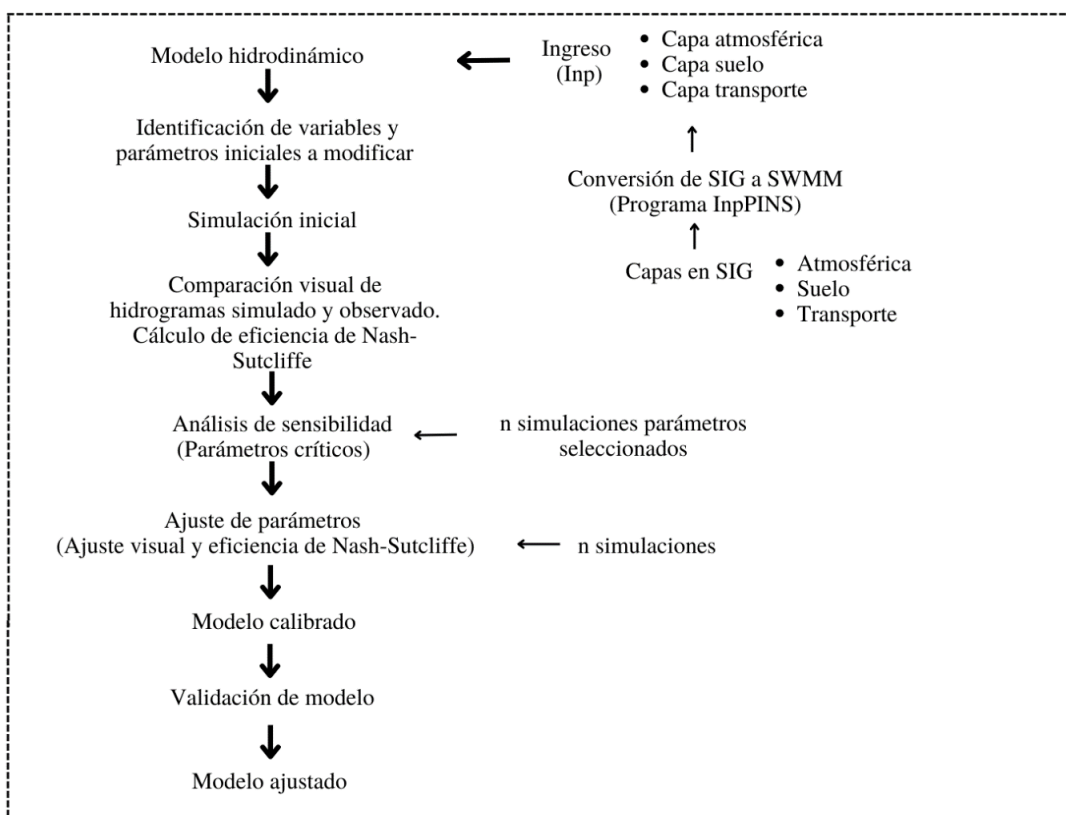
Sigla	Parámetro	Unidad	Valor
L	Longitud de curso de agua más largo	Km	2.0384
H	Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida	m	183.85
S	Pendiente promedio del cauce principal	m/m	0.096
S ₀	Pendiente en porcentaje	%	9.6
A	Área de la cuenca	Km ²	0.6032
L _p	Longitud del cauce	ft	6687.66404
NC	Número de curva	----	95
C	Coefficiente de escorrentía del método racional	----	0.58
L _m	Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida	mi	1.26660304
s	Pendiente promedio de la cuenca	ft/mi	476.220566
n	Coefficiente de rugosidad del cauce	----	0.015
α	Parámetro que depende de la pendiente	----	0.04

13.1.4 Calibración y validación

En la Figura 70 se muestra los pasos seguidos para realizar la calibración y validación de la cuenca.

Figura 70

Flujograma metodológico calibración y validación



13.2 Alternativas de selección SUDS

En la Tabla 57 se muestra el listado de alternativas SUDS propuesta y evaluadas.

Tabla 57

Alternativas SUDS propuestas y evaluadas

Rótulo	Alternativa
A1	Pavimentos permeables
A2	Pozos y zanjas de infiltración
A3	Depósitos de infiltración
A4	Drenes filtrantes
A5	Cunetas verdes
A6	Franjas filtrantes
A7	Techos verdes
A8	Zonas de bioretención
A9	Alcorques
A10	Tanques de almacenamiento

En la Tabla 58 se muestra el listado de criterios primarios y específicos de selección.

Tabla 58

Descripción de criterios primarios y específicos de selección

Criterios Primarios "CP"	Criterios específicos	Descripción
Socio/Ambiental "CSA"	Ciclo de vida de la alternativa	Evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales, durante la vida útil de las alternativas SUDS.
	Vida útil	Cuanto tiempo dura las alternativas SUDS en prestar el servicio para la cual fue diseñada.
	Intervención civil	Afectación que presenta la construcción de los SUDS en el área de implementación, en relación con las obras civiles a ejecutar, tipo de materiales y elementos especiales.
	Beneficios comunitarios	Impacto positivo - negativo que tienen las alternativas SUDS en su implementación en cuanto al paisajismo, estética, amenidad, etc.

Criterios Primarios "CP"	Criterios específicos	Descripción
	Aceptabilidad de la alternativa SUDS	Percepción y actitud de los interesados (comunidad y organizaciones públicas - privadas) frente a los beneficios y riesgos que tienen las alternativas para el bienestar colectivo.
	Topografía	Condiciones del terreno (pendiente) donde se aplicarán las alternativas SUDS.
	Área	Necesidad de espacio requerida por las alternativas SUDS.
	Periodicidad de mantenimiento	Cada cuanto tiempo es necesario realizarles mantenimiento a las alternativas SUDS o al área donde se encuentren para garantizar rendimiento y funcionalidad.
	Modelado	Si es apto para ser modelado en el programa EPA SWWM.
Técnicos "CT"	Fiabilidad	Se refiere a la estabilidad de operación de la alternativa (debe cumplir con los objetivos propuestos).
	Integridad	Reacción frente a daños internos y externos a través del tiempo y su integración con estructuras existentes.
	Facilidad de diseño	Corresponde al nivel de complejidad del diseño e integralidad con otras especialidades. Además, facilidad de uso masivo por consultores.
	Control	Capacidad de los SUDS para regular o minimizar la cantidad del agua.
	Eficiencia	Capacidad de los SUDS para tratar el agua lluvia.
	Normalización	Adopción e implementación de las alternativas SUDS por parte de los entes involucrados a través de normatividad.
	Costos de implementación	Inversión inicial de construcción y puesta en marcha de cada alternativa de SUDS.
Económicos "CE"	Costos de operación	Rubros de personal e insumos necesarios para el funcionamiento de las alternativas SUDS (monitoreo de sedimentos y eliminación).
	Costos de mantenimiento	Rubros de personal, insumos, materiales y equipos necesarios para garantizar el rendimiento de las alternativas SUDS a través del tiempo.

En la Tabla 59 se muestra el resumen de la priorización de criterios realizada por los expertos.

Tabla 59*Priorización de criterios realizada por los expertos*

Criterios primarios	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Pro m
Técnico	0.186	0.405	0.633	0.111	0.283	0.258	0.467	0.31
Económico	0.077	0.480	0.106	0.111	0.074	0.455	0.067	0.22
Socio/ambiental	0.737	0.115	0.260	0.778	0.643	0.287	0.467	0.47
Criterios socio/ambientales	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Pro m
Ciclo de vida de la alternativa	0.188	0.105	0.156	0.327	0.360	0.069	0.157	0.20
Vida útil	0.188	0.189	0.561	0.212	0.054	0.235	0.047	0.24
Intervención civil	0.131	0.037	0.077	0.112	0.081	0.064	0.282	0.08
Beneficios comunitarios	0.296	0.334	0.058	0.283	0.216	0.373	0.233	0.26
Aceptabilidad de alternativa SUDS	0.196	0.334	0.148	0.065	0.288	0.259	0.282	0.22
Criterios técnicos	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Pro m
Topografía	0.024	0.034	0.135	0.101	0.075	0.044	0.078	0.07
Área	0.027	0.026	0.224	0.251	0.069	0.044	0.072	0.11
Periodicidad de mantenimiento	0.070	0.158	0.032	0.046	0.038	0.044	0.076	0.06
Modelado	0.047	0.032	0.191	0.015	0.018	0.044	0.030	0.06
Fiabilidad del sistema	0.103	0.158	0.083	0.112	0.190	0.221	0.217	0.14
Integridad	0.128	0.204	0.076	0.200	0.195	0.044	0.211	0.14
Facilidad de diseño	0.084	0.022	0.068	0.015	0.146	0.074	0.031	0.07
Control	0.228	0.075	0.083	0.109	0.133	0.221	0.040	0.14
Eficiencia	0.228	0.132	0.048	0.112	0.119	0.044	0.211	0.11
Normalización	0.063	0.160	0.060	0.039	0.018	0.221	0.033	0.09
Criterios económicos	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Pro m
Costos de implementación	0.091	0.143	0.106	0.074	0.158	0.480	0.429	0.18
Costos de mantenimiento	0.455	0.429	0.260	0.283	0.187	0.115	0.143	0.29
Costos de operación	0.455	0.429	0.633	0.643	0.655	0.405	0.429	0.54

En la Tabla 60 se muestra la priorización de criterios socio/ambientales.

Tabla 60*Priorización de criterios sociales y ambientales*

CRITERIOS SOCIO/AMBIENTAL											
		0.20		0.24012364		0.083721209		0.259971092		0.215246329	Total
		CSA1		CSA2		CSA3		CSA4		CSA5	
A1	3	0.6028132	4	0.960495	4	0.33488484	2	0.51994218	4	0.86098532	3.279
A2	3	0.6028132	2	0.480247	4	0.33488484	2	0.51994218	3	0.64573899	2.584
A3	3	0.6028132	2	0.480247	4	0.33488484	4	1.03988437	4	0.86098532	3.319
A4	3	0.6028132	2	0.480247	4	0.33488484	2	0.51994218	3	0.64573899	2.584
A5	3	0.6028132	3	0.720371	4	0.33488484	2	0.51994218	3	0.64573899	2.824
A6	3	0.6028132	3	0.720371	4	0.33488484	3	0.77991328	4	0.86098532	3.299
A7	4	0.8037509	2	0.480247	3	0.25116363	4	1.03988437	3	0.64573899	3.221
A8	4	0.8037509	3	0.720371	4	0.33488484	4	1.03988437	3	0.64573899	3.545
A9	4	0.8037509	3	0.720371	4	0.33488484	4	1.03988437	3	0.64573899	3.545
A10	3	0.6028132	5	1.200618	2	0.16744242	2	0.51994218	4	0.86098532	3.352

En la Tabla 61 se muestra la priorización de criterios económicos

Tabla 61*Priorización de criterios económicos*

CRITERIOS ECONÓMICOS										
		%		0.175		0.288		0.537		Total
				CT1		CT2		CT3		
A1	1	0.175	3	0.864	5	2.684	3.723			
A2	4	0.701	1	0.288	5	2.684	3.673			
A3	3	0.526	1	0.288	4	2.147	2.961			
A4	4	0.701	1	0.288	4	2.147	3.136			
A5	4	0.701	1	0.288	4	2.147	3.136			
A6	4	0.701	1	0.288	4	2.147	3.136			
A7	1	0.175	2	0.576	4	2.147	2.898			
A8	4	0.701	1	0.288	4	2.147	3.136			
A9	4	0.701	2	0.576	4	2.147	3.424			
A10	1	0.175	4	1.152	5	2.684	4.011			

En la Tabla 62 se muestra la priorización de criterios técnicos

Tabla 62

Priorización de criterios técnicos

CRITERIOS TÉCNICOS																					
	0.069	0.107	0.065	0.058	0.144	0.141	0.068	0.142	0.114	0.093											
	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT6	CT7	CT8	CT9	CT10	Total										
A1	4	0.274	5	0.535	4	0.258	5	0.288	5	0.722	4	0.564	4	0.272	4	0.566	4	0.456	2	0.187	4.122
A2	2	0.137	4	0.428	1	0.065	5	0.288	4	0.578	3	0.423	4	0.272	3	0.425	5	0.570	2	0.187	3.372
A3	1	0.069	1	0.107	1	0.065	5	0.288	5	0.722	3	0.423	3	0.204	5	0.708	5	0.570	2	0.187	3.342
A4	2	0.137	4	0.428	1	0.065	3	0.173	4	0.578	3	0.423	4	0.272	3	0.425	4	0.456	2	0.187	3.142
A5	1	0.069	4	0.428	1	0.065	5	0.288	4	0.578	3	0.423	4	0.272	3	0.425	4	0.456	2	0.187	3.189
A6	1	0.069	3	0.321	1	0.065	3	0.173	3	0.433	3	0.423	4	0.272	3	0.425	3	0.342	2	0.187	2.708
A7	4	0.274	5	0.535	1	0.065	5	0.288	4	0.578	3	0.423	4	0.272	3	0.425	4	0.456	2	0.187	3.502
A8	2	0.137	4	0.428	1	0.065	5	0.288	4	0.578	3	0.423	4	0.272	3	0.425	5	0.570	2	0.187	3.372
A9	2	0.137	5	0.535	3	0.194	3	0.173	4	0.578	4	0.564	4	0.272	3	0.425	4	0.456	2	0.187	3.519
A10	4	0.274	5	0.535	4	0.258	5	0.288	5	0.722	5	0.705	4	0.272	5	0.708	4	0.456	2	0.187	4.405

En la Tabla 63 se muestra los índices de consistencia para los diferentes criterios de priorización evaluados por los expertos.

Tabla 63

Índices de consistencia de los diferentes criterios de priorización por cada experto

Experto	Genero	País	Índice de consistencia			
			Primarios	Socio/Ambiental	Técnicos	Económicos
1	Masculino	Colombia	0.067	0.09	0.071	0
2	Femenino	Colombia	0.031	0.09	0.088	0
3	Femenino	Colombia	0.048	0.08	0.09	0.05
4	Masculino	Argentina	0	0.07	0.091	0.08
5	Masculino	Colombia	0.083	0.09	0.087	0.04
6	Femenino	Colombia	0.066	0.10	0.082	0.03
7	Masculino	Colombia	0	0.05	0.08	0
			0.042	0.081	0.084	0.029

En la Tabla 64 se muestra la priorización de criterios.

Tabla 64

Priorización general de alternativas SUDS

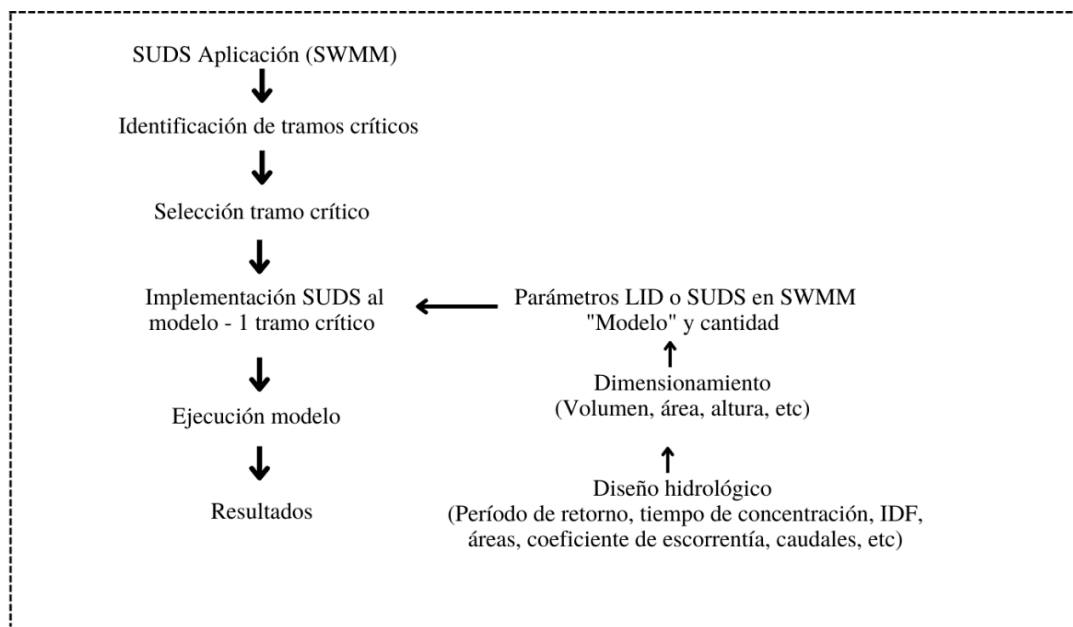
	0,47		0,217		0,313		Total	Prioridad
	CSA		CE		CT			
A1	3.279	1.541	3.723	0.808	4.122	1.289	3.64	2
A2	2.584	1.214	3.673	0.798	3.372	1.055	3.07	8
A3	3.319	1.560	2.961	0.643	3.342	1.045	3.25	5
A4	2.584	1.214	3.136	0.681	3.142	0.983	2.88	10
A5	2.824	1.327	3.136	0.681	3.189	0.998	3.01	9
A6	3.299	1.551	3.136	0.681	2.708	0.847	3.08	7
A7	3.221	1.514	2.898	0.629	3.502	1.095	3.24	6
A8	3.545	1.666	3.136	0.681	3.372	1.055	3.40	4
A9	3.545	1.666	3.424	0.743	3.519	1.101	3.51	3
A10	3.352	1.576	4.011	0.871	4.405	1.378	3.82	1

13.3 Dimensionamiento de las alternativas SUDS

En la Figura 71 se muestra los pasos seguidos para realizar la implementación de los SUDS en la cuenca.

Figura 71

Flujograma metodológico implementación de SUDS



13.3.1 Alcorques inundables

Diseño hidrológico

Los alcorques inundables se diseñan por medio de tres variables (área de drenaje, coeficiente de escorrentía y profundidad de lluvia) que permiten estimar un volumen de almacenamiento denominado para este caso volumen de calidad de agua (CIIA, 2017) (ver Ecuación 5).

Ecuación 5

$$V_C = h_p * A_d * C$$

Donde:

V_C : Volumen de calidad de agua (m³)

h_p : Profundidad de lluvia (mm)

A_d : Área tributaria (m²)

C : Coeficiente de escorrentía

La profundidad de lluvia se obtiene a partir de las curvas IDF de la zona de estudio, teniendo en cuenta un balance técnico y económico que representa la mejor relación entre el costo de inversión y la cantidad de agua tratada por los alcorques inundables, el área de drenaje se delimita por medio de áreas tributarias que puedan definir el flujo del agua y el coeficiente de escorrentía se obtiene de acuerdo con el tipo de cobertura dentro del área de drenaje (CIIA, 2017).

El área de diseño y el coeficiente de escorrentía se estimó a partir de las viviendas, vías, zonas duras y blandas del tramo 1 de la cuenca de estudio mostradas en la Tabla 65.

Tabla 65*Área y coeficiente de escorrentía del tramo 1*

Tipo	Área (ha)	Área (m²)	C	C Ponderado
Vía	0.05	500	0.85	0.0306
Vivienda	0.1	1000	0.85	0.0612
Vivienda	0.09	900	0.85	0.0550
Vivienda	0.04	400	0.85	0.0245
Dura y blanda	0.12	1200	0.6	0.0518
Dura y blanda	0.05	500	0.6	0.0216
Vivienda	0.06	600	0.85	0.0367
Dura y blanda	0.18	1800	0.6	0.0777
Vivienda	0.09	900	0.85	0.0550
Vía	0.14	1400	0.85	0.0856
Vía	0.03	300	0.85	0.0183
Vivienda	0.07	700	0.85	0.0428
Dura y blanda	0.16	1600	0.6	0.0691
Vivienda	0.06	600	0.85	0.0367
Blanda	0.01	100	0.35	0.0025
Blanda	0.01	100	0.35	0.0025
Vía	0.04	400	0.85	0.0245
Blanda	0.02	200	0.35	0.0050
Vía	0.06	600	0.85	0.0367
Blanda	0.01	100	0.35	0.0025

El área total del tramo 1 es de 13900 m² y el coeficiente ponderado es de 0.74.

La estimación de la profundidad de lluvia se realiza a partir de la transformación de la profundidad de lluvia con un periodo de retorno de 1.2 años y una duración de 360 minutos mediante las siguientes ecuaciones (CIHA, 2017) (ver Ecuación 6 y Ecuación 7).

Ecuación 6

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

Donde:

h_p : Profundidad de la lluvia (mm).

$h_{1.2,360}$: Profundidad de lluvia con un periodo de retorno de 1,2 años y una duración de 360 minutos (mm).

Ecuación 7

$$h_{1.2,360} = (i) * \left(\frac{360}{60}\right)$$

Donde:

$h_{1.2,360}$: Profundidad de lluvia con un periodo de retorno de 1,2 años y una duración de 360 minutos (mm).

i : Intensidad de la lluvia para Manizales - IDF (mm).

Reemplazando los valores se tiene que:

$$h_{1.2,360} = \left(\frac{3896 * 1.2^{0.154}}{(360 + 25)^{1.02}}\right) * \left(\frac{360}{60}\right) = 55.44 \text{ mm}$$

$$h_p = 10.19 - \ln(55.44) - 16.785 = 24.13 \text{ mm}$$

Con lo anterior, se puede estimar el volumen de calidad o de tratamiento para el tramo 1, dando como resultado un valor de 248.30 m³.

Predimensionamiento

Para el predimensionamiento se emplea la metodología descrita y los parámetros de diseño recomendados por la norma técnica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, NS-166 (EAAB ESP, 2018) mostrados en la Tabla 66. La metodología presenta el paso a paso que requiere el diseño de la estructura, diferentes criterios de viabilidad de las zonas de instalación, la geometría, el área superficial de la estructura y la profundidad de la cuenca (CIIA, 2017).

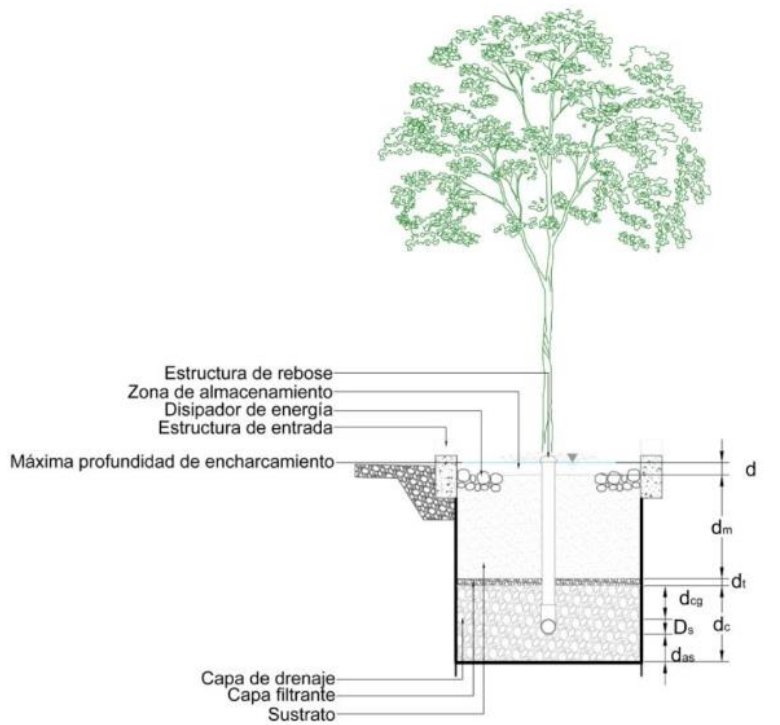
Tabla 66*Parámetros de diseño de alcorques inundables*

Rango de parámetros para diseño	Valor	Unidades
Profundidad del sustrato (d_m)	0.6 - 1.0	m
Tiempo de vaciado del filtro (T_d)	< 12	h
Permeabilidad del sustrato (K)	> 70	mm/h
Porosidad efectiva del sustrato (n_m)	0.4	----
Máxima profundidad de encharcamiento (d)	0.15 - 0.3	m
Diámetro de la tubería perforada (D_s)	0.1 - .015	m
Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería perforada (d_{cg})	> 0.15	m
Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería perforada (d_{as})	> 0.08	m
Profundidad de la capa de drenaje (d_c)	$d_c = d_{cg} + d_{as} + D_s$	
Profundidad de la capa filtrante (d_t)	> 0.05	m
Porosidad efectiva de la capa de grava (n_g)	0.4	----

El prediseño propuesto corresponde a una estructura típica de sección rectangular como se muestra en la Figura 72, sin considerar infiltración en el terreno dadas las condiciones de riesgo de deslizamientos que presenta Manizales. También, se proyecta que las áreas de encharcamiento y de sustrato sean iguales de acuerdo con la geometría seleccionada para la caja del alcorque y no se considera algún tipo de pretratamiento.

Figura 72

Diagrama esquemático de una estructura de un alcorque inundable



Nota: Adaptado de CIIA, 2017.

El primer paso corresponde al volumen tratado que se obtiene con la siguiente Ecuación 8 (CIIA, 2017).

Ecuación 8

$$V = A_{sm}(d_m * n_m + d_c * n_g) + \frac{A_f + A_s}{2} * d + V_{pt}$$

Donde:

V: Volumen tratado (m³)

A_{sm}: Área superficial de la parte superior del sustrato (m²)

d_m: Profundidad del sustrato (m)

n_m : Porosidad efectiva del sustrato (%)

d_c : Profundidad de la capa de drenaje y almacenamiento de grava (m)

n_g : Porosidad efectiva de la capa de grava (%)

A_s : Área superficial de la parte más baja del área de encharcamiento (m^2)

A_f : Área superficial a la máxima profundidad de encharcamiento (m^2)

d : Máxima profundidad de encharcamiento (m)

V_{pt} : Volumen de pretratamiento (m^3)

Teniendo en cuenta las consideraciones de predimensionamiento anteriores, la Ecuación 8 anterior se puede simplificar de la siguiente manera.

$$V = A_{sm}(d_m * n_m + d_c * n_g) + A_{sm} * d$$

La profundidad de la capa de drenaje se estima mediante la siguiente Ecuación 9 (CIIA, 2017).

Ecuación 9

$$d_c = d_{cg} + d_{as} + D_s$$

Donde:

d_c : Profundidad de la capa de drenaje y almacenamiento de grava (m)

d_{cg} : Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería de salida (m)

d_{as} : Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería de drenaje (m)

D_s : Diámetro de la tubería perforada (m)

Comprobación de diseño

A partir de los resultados anteriores, se debe realizar una comprobación del diseño, donde el área superficial mínima de la parte superior del medio debe ser menor o igual al área superficial de la capa más baja del área de encharcamiento. Si la condición no se satisface, se

recomienda cambiar las variables iniciales del proceso de cálculo hasta cumplir con las condiciones mencionadas (CIIA, 2017). El área superficial más baja se estima de la siguiente manera (ver Ecuación 10).

Ecuación 10

$$A_{smin} = \frac{V * d_m}{T_d * k * \left(\frac{d}{2} + d_m\right)}$$

Donde:

A_{smin} : Área superficial mínima de la parte superior del medio (m^2)

V: Volumen total a tratar (m^3)

d_m : Profundidad del sustrato (m)

T_d : Tiempo de vaciado del filtro (h)

k: Permeabilidad del medio filtrante (mm/h)

d: Máxima profundidad de encharcamiento (m)

d_m : Profundidad del sustrato (m)

Con la estimación de parámetros para el alcorque tipo, se procede a determinar la cantidad de alcorques necesarios para tratar el volumen de calidad definido para cada una de las áreas de drenaje, dividiendo el volumen de calidad sobre el volumen tratado por el alcorque. En la Tabla 67 se presenta el dimensionamiento del alcorque tipo con un ancho de 1.4 m, una largo en sentido de vía de 2.0 m, una profundidad total hasta el fondo de la estructura de 1.5 m, con lo cual la estructura tiene la capacidad de tratar $2.4 m^3$.

Tabla 67*Predimensionamiento del alcorque permeable tipo*

Parámetro	Valor
Ancho de alcorque b	1.4 m
Longitud de alcorque L	2.0 m
Área superficial ($A_{sm}=A_s=A_f$)	2.8 m ²
Profundidad del sustrato (d_m)	1.0 m
Tiempo de vaciado del filtro (T_d)	12 h
Permeabilidad del sustrato (k)	70 mm/h
Porosidad efectiva del sustrato (n_m)	0.4
Máxima profundidad de encharcamiento (d)	0.3 m
Capa filtrante (d_t)	0.05 m
Diámetro de tubería perforada (D_s)	0.15 m
Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería (d_{cg})	0.15 m
Porosidad efectiva de la capa de grava (n_g)	0.4 m
Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería (d_{as})	0.08 m
Profundidad de la capa de drenaje (d_c)	0.38 m
Volumen de calidad (V_c)	248.30 m ³
Volumen a tartar por alcorque (V)	2.4 m ³
Área superficial mínima (A_{smin})	2.48 m ²
Cantidad de alcorques	103

13.3.2 Pavimentos permeables

Diseño hidrológico

Los pavimentos permeables se diseñan de igual manera que los alcorque inundables, empleando el área de drenaje, coeficiente de escorrentía y la profundidad de lluvia (CIIA, 2017), dando como resultado un volumen de calidad para el tramo 1 de 248.30 m³.

Predimensionamiento

Para el predimensionamiento se emplea la metodología descrita y los parámetros de diseño recomendados por la norma técnica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, NS-166 (EAAB ESP, 2018) mostrados en la Tabla 68. Es importante determinar el tipo

de estructura a emplear mostrada en la Figura 73, donde para el caso de estudio no se considerará infiltración.

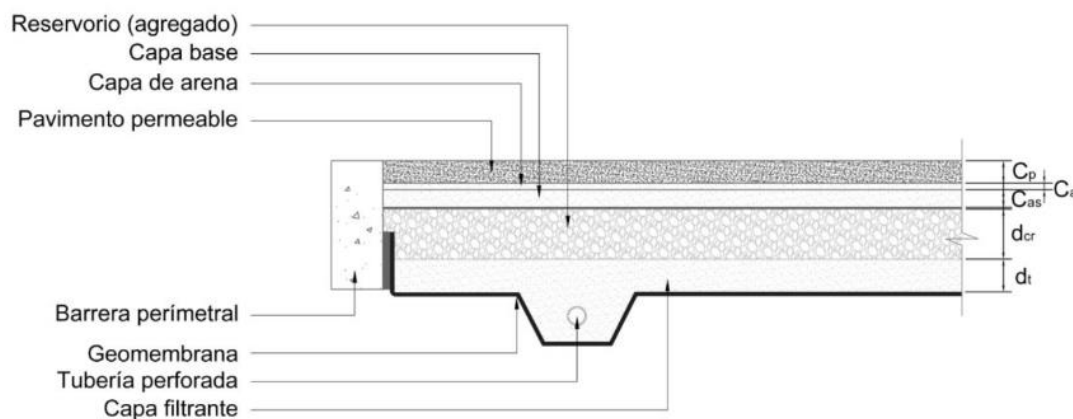
Tabla 68

Parámetros de diseño de pavimentos permeables

Rango de parámetros para diseño	Valor	Unidades
Porosidad del reservorio (n_{cr})	0.4	----
Profundidad del reservorio (d_{cr})	> 0.15	m
Profundidad del borde libre (d_L)	0.0254	m
Área que ocupará el pavimento permeable (A_s)	> 5	%
Relación tributaria impermeable (R_i)	< 2	----
distancias entre barreras laterales (L_{bd})	10	m

Figura 73

Diagrama esquemático de una estructura de pavimento permeable sin infiltración



Nota: Adaptado de CIHA, 2017.

El primer paso corresponde a determinar el área total de la cuenca y el área que será empleada por la estructura del pavimento permeable, con el fin de estimar la relación de impermeabilidad del área total y la relación tributaria impermeable mediante la siguiente Ecuación 11 y Ecuación 12 (CIHA, 2017).

Ecuación 11

$$R_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * C_i}{A_d}$$

Ecuación 12

$$R_t = \frac{(A_s - A_d) * R_{im}}{A_s}$$

Donde:

R_{im} : Relación de impermeabilidad del área total

A_s : Área del pavimento permeable (m²)

A_d : Área total (m)

A_i : Área de drenaje sub i (m²)

C_i : Coeficiente de escorrentía sub i

R_t : Relación tributaria impermeable

En segundo lugar se estima el volumen del pavimento permeable previsto para el reservorio, mediante la siguiente Ecuación 13 (CIIA, 2017).

Ecuación 13

$$V = n_{cr} * \left(d_{cr} - \frac{S_f * L_{bd}}{2} - d_l \right) * A_s$$

Donde:

V : Volumen provisto a partir del reservorio (m³)

S_f : Pendiente del reservorio (m/m)

L_{bd} : Longitud entre barreras laterales (m)

d_{cr} : Profundidad del reservorio (m)

d_l : Profundidad del borde libre (m)

A_s : Área del pavimento (m^2)

n_{cr} : Porosidad del reservorio (%)

Comprobación de diseño

Se debe chequear que las distancias entre barreras laterales sea menor a lo estimado por la siguiente Ecuación 14 (CIIA, 2017).

Ecuación 14

$$L_{bd} < \frac{2 * V_c}{S_f * A_s * n_{cr}}$$

Donde:

L_{bd} : Longitud entre barreras laterales (m)

V_c : Volumen de diseño (m^3)

S_f : Pendiente del reservorio (m/m)

A_s : Área del pavimento (m^2)

n_{cr} : Porosidad del reservorio (%)

Con la estimación de parámetros para el pavimento permeable, se procede a determinar la cantidad de estructuras necesarias para tratar el volumen de calidad definido para cada una de las áreas de drenaje, dividiendo el volumen de calidad sobre el volumen tratado por el pavimento permeable. En la Tabla 69 se presenta el dimensionamiento del pavimento permeable tipo con un ancho de 6 y 3 m (vía total y media), un largo 10.0 m, una profundidad de reservorio de 0.3 m, con lo cual la estructura tiene la capacidad de tratar 2.99 y 1.5 m^3 para los anchos de 6 y 3 m respectivamente.

Tabla 69*Predimensionamiento del pavimentos permeables tipo*

Parámetro	Ancho 6 m	Ancho 3 m
	Valor	Valor
Longitud pavimento permeable (L)	10.0 m	10.0 m
Ancho pavimento permeable (a)	6.0 m	3.0 m
Área del pavimento permeable (A_s)	60.0 m ²	30.0 m ²
Pendiente del reservorio (S_f)	3.0 %	3.0 %
Porosidad del reservorio (n_{cr})	0.03 m/m	0.03 m/m
Longitud entre barreras (L_{bd})	0.40	0.40
Profundidad del reservorio (d_{cr})	10.0 m	10.0 m
Profundidad del borde libre (d_l)	0.30 m	0.30 m
Volumen tratado (V)	0.0254 m	0.0254 m
Cantidad de Pavimentos necesarios	2.99 m ³	1.5 m ³
Longitud de vía necesaria para el pavimento	83	166
Longitud de vía del tramo 1	830 m	1660 m
Cantidad de Pavimentos seleccionados	320	320
Chequeo L_{bd}	32	32
Chequeo A_s	21.55 m	43.11 m
	13.81 %	6.91 %

Nota: La cantidad de pavimentos permeables a emplear se seleccionó a partir de la longitud de vía del tramo 1 existente, limitante para el uso de esta estructura.

13.3.3 Tanques de detención

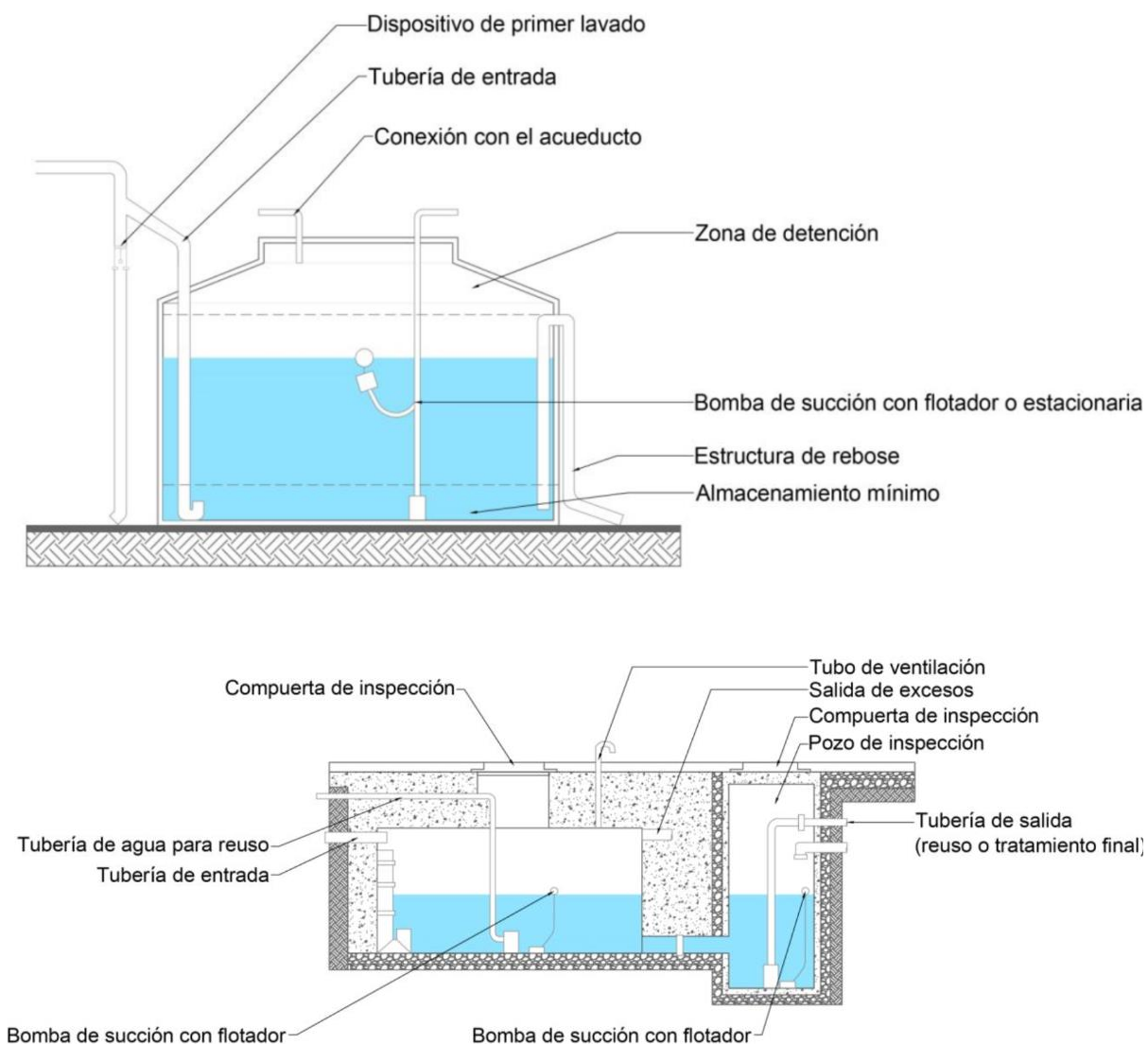
Diseño hidrológico

Los tanques de detención se diseñan con base al método racional, donde se estiman para el tramo 1 las áreas tributarias y el coeficiente de escorrentía de igual manera que para los sistemas de alcorques inundables y pavimentos permeables (ver Tabla 65). La intensidad de la lluvia se proyectó para un tiempo de concentración de 20 minutos de acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones realizadas para alcanzar el pico del hidrograma y el periodo de retorno para una condición hidrológica mínima de 20 años, de acuerdo con lo recomendado por Empresas Municipales de Cali en sus lineamientos generales para el control de

los caudales de aguas lluvias entregados al sistema de drenaje de la ciudad de Cali (EMCALI E.S.P., 2018). En la Figura 74 se muestra el esquema típico de un tanque de detención superficial y enterrado.

Figura 74

Esquema general de tanque de detención superficial y enterrado



Nota: Adaptado de CIIA, 2017. Parte superior tanque de detención superficial, parte inferior tanque de detención enterrado.

Predimensionamiento

Para el predimensionamiento se emplea la metodología descrita por el manual de drenaje urbano de Queensland, donde se proponen cuatro métodos (Boyd, Basha, Carroll, Cup) para el predimensionamiento preliminar de una cuenca de detención (Scraggs & Lemckert, 2004)(Minister for Natural Resources and Water & Minister Assisting the Premier in North Queensland, 2007; Scraggs & Lemckert, 2004). La estimación del volumen se realiza mediante la siguiente Ecuación 15, Ecuación 16, Ecuación 17 y Ecuación 18.

Ecuación 15

$$V_{s1} = \frac{r * (1 + 2r)}{3} * V_i \text{ Boyd}$$

Ecuación 16

$$V_{s2} = r * V_i \text{ Basha}$$

Ecuación 17

$$V_{s3} = \frac{r * (3 + 5r)}{8} * V_i \text{ Carroll}$$

Ecuación 18

$$V_{s4} = \frac{r * (2 + r)}{3} * V_i \text{ Cup}$$

Donde:

V_s : Volumen de almacenamiento (m^3)

V_i : Volumen de entrada (m^3)

r : Tasa de reducción

La tasa de reducción se estima aplicando la siguiente Ecuación 19 (Minister for Natural Resources and Water & Minister Assisting the Premier in North Queensland, 2007; Scraggs & Lemckert, 2004).

Ecuación 19

$$r = \frac{(Q_i - Q_0)}{Q_i}$$

Donde:

Q_i : Caudal máximo de entrada (m^3/s)

Q_0 : Caudal máximo de salida (m^3/s)

Al emplear el método racional para estimar el caudal de entrada, la estimación del volumen de entrada se determina con la siguiente Ecuación 20 (Minister for Natural Resources and Water & Minister Assisting the Premier in North Queensland, 2007).

Ecuación 20

$$V_i = \frac{4 * t_c Q_i}{3}$$

En la Tabla 70 se muestran los parámetros de diseño estimados.

Tabla 70

Parámetros de diseño del tanque de detención (almacenamiento/regulación)

Parámetro	Valor	Unidad
T_r	20	años
t_c	20	min
i	127.26	mm/h
Q_i	0.364	m^3/s
	363.76	L/s
Q_0	0.109	m^3/s
	109.13	L/s
V_i	582.01	m^3
r	0.70	----

Nota: De acuerdo con la Resolución 0799 de 2021 el caudal máximo de salida del tanque de detención no debe ser menor del 30%, con el fin de evitar sobrecargas de los sistemas pluviales y posteriores inundaciones.

Comprobación de diseño

Para chequear el volumen del tanque de detención se verifica que los valores de volumen obtenidos estén en el orden de 180 a 400 m^3 por hectárea (EMCALI E.S.P., 2018; IPWEA, 2016).

En la Tabla 71 se presenta los volúmenes estimados del tanque de detención.

Tabla 71

Estimación del volumen del tanque de detención por varios métodos

Parámetro	Valor
V_{s1}	325.93 m^3
V_{s2}	407.41 m^3
V_{s3}	331.02 m^3
V_{s4}	366.67 m^3
$V_{promedio}$	357.76 m^3
$V_{chequeo}$	250.20 m^3

El volumen de detención se seleccionó a partir de lo recomendado para el uso de los métodos mostrado en la Tabla 72.

Tabla 72

Recomendaciones para el uso de los métodos de estimación del volumen de detención preliminar

Condición	Método
0.00 = r = 0.25	Boyd
0.25 = r = 0.45	Basha
0.45 = r = 0.60	Carrol
0.60 = r = 1.00	Culp

El volumen de detención para el tramo 1 es de 366.67 m³. Con lo anterior y teniendo en cuenta sistemas de detención tipo de 10 m³ máximo (tanques comerciales prefabricados o de concreto) se procede a determinar la cantidad de estructuras necesarias para tratar el volumen total de agua lluvia calculado, dividiendo el volumen de total sobre el volumen de detención tipo, dando como resultado 39 estructuras de detención, sin embargo, solo se propone estructuras para detener el agua lluvia proveniente de las viviendas y una solo zona blanda y dura, dando un total de tanques de detención de 20 unidades.

13.3.4 Simulación de alternativas en SWMM

Cantidad de tipologías SUDS por área

En la Tabla 73 se muestra la cantidad de estructuras proyectadas por cada área del tramo 1 para su ingreso en el modelo SWMM y en la Tabla 74 se muestra la combinación de alternativas SUDS ingresadas al modelo SWMM.

Tabla 73*Cantidad de SUDS ingresados al modelo de SWMM*

Nombre	Tipo	Área (m²)	Alcorque inundable	Pavimento permeable	Tanques detención
229	Vivienda	1000	9.00	3.00	3
231	Vivienda	900	8.00	2.00	3
235	Vivienda	400	3.00	1.00	1
248	Vivienda	600	5.00	2.00	2
264	Vivienda	900	8.00	2.00	3
267	Vivienda	700	6.00	2.00	2
268	Dura y blanda	1600	10.00	3.00	4
269	Vivienda	600	5.00	2.00	2

Tabla 74*Combinación de SUDS ingresados al modelo de SWMM*

Nombre	Tipo de área	Tipo de SUDS	Cantidad
229	Vivienda	Tanque	3
231	Vivienda	Tanque	3
235	Vivienda	Tanque	1
239	Dura y blanda	Alcorque	7
240	Dura y blanda	Alcorque	3
248	Vivienda	Tanque	2
251	Dura y blanda	Alcorque	11
264	Vivienda	Tanque	3
265	Vía	Pavimento	4
266	Vía	Pavimento	1
267	Vivienda	Tanque	2
268	Dura y blanda	Tanque	4
269	Vivienda	Tanque	2
321	Pavimento	Pavimento	1
323	Pavimento	Pavimento	2

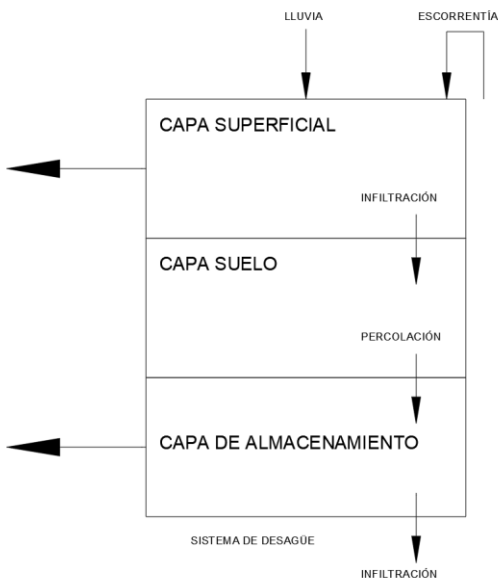
El ingreso de las estructuras SUDS al modelo de SWMM se realizó por medio del módulo LID (Low Impact Development) con el objetivo de establecer el grado de impacto de las tipologías dimensionadas anteriormente en el tramo 1 de la cuenca de estudio.

Herramienta LID de SWMM

Las herramientas de sistemas de drenaje sostenible se incorporaron en la versión 5 del software SWMM, donde se emplea una combinación de capas verticales de superficie, suelo y almacenamiento con propiedades especiales que permiten simular el comportamiento hidráulico de las diferentes tipologías mostrada en la Figura 75. La totalidad de las capas para cada SUDS pueden no requerirse.

Figura 75

Diagrama conceptual de estructuras LID



Nota: Adaptado de Rossman, 2015.

La simulación de las estructuras LID en SWMM requiere de dos fases, la primera es la definición de parámetros para cada capa vertical de la tipología SUDS que se desea simular,

donde se puede incorporar varias tipologías a un mismo modelo, cuenca de drenaje y áreas tributarias. Y la segunda fase corresponde a la asignación de cada una de las tipologías a las áreas tributarias, para este caso las áreas del tramo 1, donde se asigna la tipología en función del porcentaje del área que se espera que cada estructura SUDS trate efectivamente.

En la Tabla 75 se muestran los parámetros ingresados al modelo SWMM para cada tipología SUDS simulada.

Tabla 75

Parámetros ingresados al modelo SWMM para cada tipología SUDS

Capa	Parámetro	Tipología		
		Alcorque	Pavimento	Tanque
Superficie	Berm height – profundidad de almacenamiento antes de desbordamiento (mm).	300	150	0
	Vegetation volumen – fracción de volumen dentro de la profundidad de almacenamiento (Fration).	0.1	0	
	Surface Roughnes – n de Manning para flujo superficial (n).	0.15	0.01	
	Surface slope - pendiente de la zona aferente (%).	0	3	
	Swale side slope – talud de las pendientes laterales de la sección transversal.	0	0	0
Pavimento	Thickness – espesor del pavimento (mm).	0	100	0
	Void ratio – volumen del espacio vacío relativo al volumen de sólidos en el pavimento (Voids/solids).	0	0.17	
	Impervious surface – proporción de material impermeable (Fraction)	0	0	
	Permeabilidty – permeabilidad del material de pavimento (mm/h).	0	120	

Capa	Parámetro	Tipología		
		Alcorque	Pavimento	Tanque
Suelo	Clogging factor – factor de números vacíos.	0	0	
	Regeneration intervals – regeneración de los espacios vacíos (days).	0	0	
	Regeneration – porción de regeneración de los espacios vacíos (Fraction).	0	0	
	Thickness – espesor de la capa de suelo (mm).	1000	0	0
	Porosity – volumen de espacios poroso relativo al volumen total del suelo (volume fraction).	0.4		
	Field capacity – volumen de agua intersticial en relación con el volumen total después de que se ha drenado el suelo por completo.	0.062		
	Wilting point – volumen de agua intersticial relativo al volumen total para un suelo seco donde solo queda agua ligada (volumen fraction).	0.024		
	Conductivity – conductividad hidráulica para un suelo saturado (mm/h).	70		
	Conductivity slope – pendiente de la curva de log frente al contenido de humedad del suelo.	45		
	Suction head – valor promedio de la succión capilar del suelo a lo largo del frente húmedo (mm).	49.022		
Almacenamiento	Thickness – espesor de una capa de grava o altura de barril de lluvia (mm).	380	300	2650
	Void ratio – relación de vacíos (Voids/solids).	0.67	0.67	
	Seepage rate – velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo (mm/h).	0	0	
	Clogging factor – volumen de agua que se necesita para obstruir completamente el fondo.	0	0	

Capa	Parámetro	Tipología		
		Alcorque	Pavimento	Tanque
Drenaje	Flow coefficient – coeficiente de drenaje (mm/h).	6.83	3.91	17.16
	Flow exponent – exponente de drenaje.	0.5	0.5	0.5
	Offset – altura de drenaje por encima del fondo (mm).	80	80	80

Nota: los valores y parámetros empleados en las diferentes tipologías SUDS se tomaron con base a lo estimado en el dimensionamiento preliminar y lo recomendado por el manual de usuario de SWMM (Rossman, 2015).

13.4 Artículo presentado en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica México 2021

Compilación de trabajos completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, del 15 al 19 de noviembre de 2021, evento virtual México.

Editores: Moisés Berezowsky Verduzco, Alejandro Mendoza Reséndiz, Maritza Liliana Arganis Juárez.

Libro digital: PDF, descarga y online ISBN 979-888722468-8. 1. Ingeniería hidráulica, 2. Mecánica de fluidos aplicada, 3. Hidrología e hidrosfera.

A continuación, se presenta el artículo presentado, aceptado y expuesto en el congreso.