

TESIS II DE MAESTRIA - INGENIERIA CIVIL

**Análisis de la Posibilidad de Localización de Tanques de Tormenta
en Sectores Propensos a Inundación en Sabaneta (Antioquia).**

RUBÉN MAURICIO ROBAYO ARAQUE

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2024**

Tabla de contenido

Introducción:	7
Objetivos	9
Objetivo General:	9
Objetivos Específicos:	9
Antecedentes:	9
Caso de Estudio:	10
Metodología:	12
Modelo Hidráulico de la Red:	12
Eventos de Precipitación:	13
Localización de Taques de Tormenta:	13
OptSU:	13
OptiTank:	16
Manual:	18
OptSU:	18
OptiTank:	24
Resultados:	32
Modelo Hidráulico de la Red:	32
Características Principales de la Red de Sabaneta:	32
Aliviaderos:	35
Cuerpos de Agua:	37
Puntos de Descarga:	37
Cálculo de Caudal de Aguas Residuales:	38
Eventos de Precipitación:	39
IDOM:	40
EPM:	43
Cambio Climático:	44
Comportamiento de la Red ante los Escenarios Evaluados:	45
IDOM:	46
EPM:	47
Cambio Climático:	47
Modelación de Escenarios Evaluados:	49
Eliminación de Alivios:	49

Calculo 24H:	54
Calculo 6H:	54
Optimización con control Hidráulico:	57
Optimización sin control Hidráulico:	63
Análisis de Resultados:	66
Conclusiones:	67
Referencias	68
Anexos:	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes de Ajuste.....	18
Tabla 2: Distribución de las Redes según el Tipo de Red.....	33
Tabla 3: Distribución de las Redes según Diámetro de Tubería	33
Tabla 4: Distribución de las Redes según Material de la Tubería.....	34
Tabla 5: Distribución de las Redes según Tipo de Agua.....	34
Tabla 6: Distribución de las Redes según el Rango de Edad	35
Tabla 7: Tipos de Aliviaderos en Sabaneta	36
Tabla 8: Numero de Curva Según Uso de Suelo.....	41
Tabla 9: Resultados de Volumen de Inundación red con vs red sin alivios.	50
Tabla 10: OPTSU - Parámetros físicos de los Posibles Tanques de Tormenta.....	58
Tabla 11: OPTSU - Visualización de la Localización de los Posibles Tanques a Diseñar. .	59
Tabla 12: Resultados OptSU - 24H.....	59
Tabla 13: Resultados OptSU - 6H.....	60
Tabla 14: OPTSU - Caso 3 Ampliación del Área en Planta Máxima Disponible para los Tanques de Tormenta a Diseñar.	61
Tabla 15: Resultados OptSU - 6H - Doble de Área	62
Tabla 16: Nodos seleccionados como potenciales convertirse en Tanques de Tormenta	64
Tabla 17: Resultados de diseño y localización optima de Tanques de Tormenta - OptiTank.	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la Zona de Estudio.	11
Figura 2: Interfaz de OptSU	15
Figura 3: Cambio de Nudo a Deposito	19

Figura 4: Creación del Nuevo Nudo.....	20
Figura 5: Ventana de Aportes del Nudo	21
Figura 6: Asignación del Nudo de Entrada	21
Figura 7: Creación del Orificio.....	22
Figura 8: Tabla de Datos, entrada a OptSU.....	23
Figura 9: Archivo cargado en OptiTank.....	24
Figura 10: Ventana de Opciones de Optimización.....	25
Figura 11: Función de costos de almacenamiento en red.....	25
Figura 12: Función de costo de los tanques.....	26
Figura 13: Función de costo de conductos	26
Figura 14: Intervalos de discretización.....	27
Figura 15: Funciones de costo de Inundación	28
Figura 16: Selección de tuberías y nudos potenciales	29
Figura 17: Parámetros del algoritmo Pseudo-genético.....	30
Figura 18: Visualización de resultados.....	31
Figura 19: Resumen de los resultados de OptiTank.....	32
Figura 20: Localización de Aliviaderos dentro de la Red de Alcantarillado de Sabaneta ...	36
Figura 21: Mapa de Recursos Hídricos de Sabaneta.....	37
Figura 22: Mopa de Aliviaderos y Outfalls de la Red.....	38
Figura 23: Grafica de Patrón de Vertimiento Utilizado en el Modelo	39
Figura 24: Áreas de Drenaje.....	41
Figura 25: Estaciones de Precipitación Analizadas.....	42
Figura 26: Hietograma de Precipitación La Ayurá T25	43
Figura 27: Hietograma de Precipitación San Antonio de Prado T25	43
Figura 28: Hietograma de Precipitación HUFF Tr25.....	44
Figura 29: Hietogramas de Precipitación Cambio Climático.....	45
Figura 30: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - Bloques Alternos.....	46
Figura 31: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - Huff.....	47
Figura 32: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - CIACUA SSP 245.....	47
Figura 33: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - CIACUA SSP 585.....	48
Figura 34: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios – PULGARIN SSP 245.....	48
Figura 35: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - PULGARIN SSP 585.....	49
Figura 36: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - Bloques Alternos.....	51
Figura 37: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - Huff.....	51
Figura 38: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - CIACUA SSP 245.....	52
Figura 39: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - CIACUA SSP 585.....	52
Figura 40: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - PULGARIN SSP 245.....	53
Figura 41: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - PULGARIN SSP 585.....	53
Figura 42: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - Bloques Alternos.....	55
Figura 43: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - Huff.....	55

Figura 44: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - CIACUA SSP 245.	56
Figura 45: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - CIACUA SSP 585.	56
Figura 46: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - PULGARIN 245.	57
Figura 47: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - PULGARIN 585.	57
Figura 48: OPTSU – Huff 24 Horas- Localización de Inundaciones.	69
Figura 49: OPTSU – Huff 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	70
Figura 50: OPTSU – Bloques Alternos 24 Horas- Localización de Inundaciones.	70
Figura 51: OPTSU – Bloques Alternos 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	71
Figura 52: OPTSU – CIACUA SSP 245 24 Horas- Localización de Inundaciones.	71
Figura 53: OPTSU – CIACUA SSP 245 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	72
Figura 54: OPTSU – CIACUA SSP 585 24 Horas- Localización de Inundaciones.	72
Figura 55: OPTSU – CIACUA SSP 585 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	73
Figura 56: OPTSU – PULGARIN SSP 245 24 Horas- Localización de Inundaciones.	73
Figura 57: OPTSU – PULGARIN SSP 245 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	74
Figura 58: OPTSU – PULGARIN SSP 585 24 Horas- Localización de Inundaciones.	74
Figura 59: OPTSU – PULGARIN SSP 585 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	75
Figura 60: OPTSU – Huff 6 Horas- Localización de Inundaciones.	75
Figura 61: OPTSU – Huff 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	76
Figura 62: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas- Localización de Inundaciones.	76
Figura 63: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	77
Figura 64: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas- Localización de Inundaciones.	77
Figura 65: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	78
Figura 66: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas- Localización de Inundaciones.	78
Figura 67: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	79
Figura 68: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas- Localización de Inundaciones.	79
Figura 69: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	80
Figura 70: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas- Localización de Inundaciones.	80
Figura 71: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.	81
Figura 72: OPTSU – Huff 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	81
Figura 73: OPTSU – Huff 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	82
Figura 74: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	82

Figura 75: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	83
Figura 76: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	83
Figura 77: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	84
Figura 78: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	84
Figura 79: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	85
Figura 80: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	85
Figura 81: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	86
Figura 82: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.	86
Figura 83: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.	87
Figura 84: OptiTank - Huff 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.	87
Figura 85: OptiTank - Bloques Alternos 6 Horas - Localización de Tanques diseñados. ...	88
Figura 86: OptiTank - CIACUA SSP 245 6 Horas - Localización de Tanques diseñados. .	88
Figura 87: OptiTank - CIACUA SSP 585 6 Horas - Localización de Tanques diseñados. .	89
Figura 88: OptiTank - PULGARIN SSP 245 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.	89
Figura 89: OptiTank - PULGARIN SSP 585 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.	90

Introducción:

El cambio en las dinámicas poblacionales de los últimos años ejemplificado en la expansión y densificación de áreas urbanas ha sido causa de un determinado número de variaciones en como los seres humanos interactúan con el medio en el que habitan. Casos como: alteraciones en los ciclos hidrológicos producto del aumento de la permeabilidad del suelo y disminución de la interceptación de agua lluvia por parte de la vegetación son causa del aumento en la producción de escorrentía. De esta manera, por medio de estructuras antropogénicas como los son los sistemas de drenaje, el ser humano ha respondido de forma rápida y eficaz a la probabilidad de ocurrencia de posibles inundaciones en su habitat.

En la actualidad el transporte de agua ocurre por medio de sistemas de tuberías subterráneos conocidos como alcantarillado que a su vez, estos pueden ser de uso exclusivo pluvial, residual o combinado. En los dos primeros el agua lluvia (o residual) es transportada por una única red de manera que, la materia orgánica y la escorrentía jamás tienen algún tipo de interacción entre sí. Por otro lado en los alcantarillados combinados, las aguas residuales y las aguas lluvias comparten el mismo sistema de redes de transporte y en consecuencia, ocurre una mezcla entre ambos tipos de fluido mientras se transporta el flujo combinado hasta el cuerpo receptor. Cabe mencionar que, los sistemas en que el fluido es separado presentan múltiples beneficios como: producción de un menor impacto ambiental dado el hecho que se prioriza el trazado de las corrientes naturales, se reduce el tamaño de las plantas de tratamiento de aguas residuales y presentan una menor probabilidad de ocurrencia de inundación producto de sobrecarga en el sistema. Sin embargo, en la actualidad es bien conocido que un gran número de ciudades a nivel mundial aun cuentan con redes combinadas para el manejo de sus aguas lluvias y de uso residual.

Los sistemas de alcantarillado se diseñan teniendo como base un caudal calculado a partir de periodos de retorno, tanto de proyecciones poblacionales como de cambio en la intensidad, frecuencia y volumen de las precipitaciones futuras. De esta manera, a través de la hidrología del lugar y de proyecciones en el cambio en el número de habitantes se logra dimensionar el sistema de transporte de agua, con el objetivo de suplir las demandas tanto medioambientales como del hombre. Adicionalmente, a los diseños y sistemas construidos se les ha venido incorporando cierto tipo de ampliaciones y/o modificaciones, pues bien, la expansión y densificación de las ciudades ha causado que muchas de las redes queden subdimensionadas con relación a los requerimientos que la población allí presente demanda. De esta manera, hoy en día tareas como el mantenimiento y monitoreo de estas estructuras llega a ser más que una necesidad; ahora se tiene en cuenta el hecho de que día a día son más los seres humanos que habitan las grandes ciudades y en consecuencia, efectos sobre los ecosistemas e hidrología producto del Cambio Climático pueden llegar a acentuarse.

Con el fin de evitar la posible saturación de las redes de drenaje a causa de cualquiera de los eventos previamente descritos, el aumento en la capacidad de las tuberías ha sido una de las

primeras soluciones que los ingenieros han implementado, sin embargo, lo anterior termina siendo costoso debido a las altas implicaciones conexas a estas intervenciones como los son: el rompimiento de calles y andenes, la excavación, el manejo del material, los equipos y el personal necesario para realizar dicha actividad. De ahí que como alternativa, en años recientes se ha propuesto a los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS por sus siglas en inglés) como el método más apropiado para el manejo del agua lluvia, pues bien, se ha visto como estos logran reducir el riesgo de inundación en las ciudades, mejoran la calidad del agua que llega a los cuerpos receptores y regulan los caudales que se liberan en las plantas de tratamiento de agua residual.

En este trabajo se va a estudiar un tipo de SUDS conocido como tanques de tormenta donde el objetivo de estos es reducir la escorrentía al integrar controles de agua lluvia en toda el área de drenaje. Los tanques de tormenta son estructuras adjuntas al alcantarillado diseñados para detener y retener el agua lluvia dado eventos de precipitación para los cuales la red no está en la capacidad de responder. De esta manera, estos tanques se diseñan para entrar en operación cuando la precipitación es intensa y la capacidad del sistema de drenaje se ve sobrepasada. Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de asegurar un buen funcionamiento tanto de la red como de estas estructuras, una modelación hidráulica precisa, la cual garantice el manejo adecuado del agua lluvia a través de toda la vida útil del sistema es de vital importancia en cualquier plan de intervención o rehabilitación que se piense.

El presente trabajo se enfocará en encontrar la ubicación óptima de tanques de tormenta diseñados para un municipio en específico. Lo anterior tiene como objetivo reducir las inundaciones puntualmente haciendo uso de dos metodologías desarrolladas durante el proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro” encabezado por la Universidad de los Andes (Universidad de Los Andes; PAVCO, 2016). Las metodologías fueron planteadas teniendo en cuenta dos configuraciones del tanque de tormenta; en la primera, la entrada está regulada por el tamaño del orificio (control hidráulico), a través del programa OptSu (Cunha, Zaferinho, & Saldarriaga, 2016), y en la segunda, se regula con referencia al nivel del agua residual (sin control hidráulico), a través del programa OptiTank (Iglesias & Saldarriaga, Localización de tanques de tormenta para control de inundaciones mediante un algoritmo pseudo-genético., 2014). Estos dos software son capaces de simular el efecto de localizar de forma óptima tanques de tormenta en determinados puntos de la red de estudio con el fin de disminuir las inundaciones.

El presente trabajo hará uso de la red de alcantarillado del municipio de Sabaneta, ubicado en el departamento de Antioquia, Colombia; como objeto de estudio en la simulación de eventos de precipitación intensos. De esta manera, al final se propondrá una determinada configuración de la red teniendo en cuenta dos criterios: el porcentaje de disminución en la frecuencia de inundación de la zona y la minimización del costo asociado a dicha inundación producto de posibles precipitaciones más intensas dado escenarios de cambio climático aplicado.

Objetivos

Objetivo General:

Conseguir dar con la localización óptima de tanques de tormenta en la red de alcantarillado combinado del municipio de Sabaneta (Antioquia) de manera que, esta logre la mayor reducción en la probabilidad de presentar inundaciones consecuencia de eventos de precipitación con alta probabilidad de ocurrencia futura.

Objetivos Específicos:

- Diseño completo de la red de alcantarillado de estudio actualizado en SWMM: coordenadas y acotación de nodos y longitud, tipo de sección y material de las tuberías.
- Selección de los eventos de precipitación y curvas IDF relacionados a la zona de estudio.
- Localización de los sectores con mayor ocurrencia de inundación dado lo escenarios de precipitación establecidos.
- Localización óptima de los tanques de tormenta por medio del uso de los programas OptSU y OptiTank.
- Cuantificar la reducción de inundaciones debido al uso de los tanques de tormenta implementados.
- Análisis y selección del tipo de tanque de tormenta que logra la mayor reducción en la probabilidad de un escenario de inundación.

Antecedentes:

Debido al aumento del volumen de precipitaciones durante los últimos años, muchas de las poblaciones a nivel mundial se han visto en la tarea de realizar distintos tipos de adecuaciones a las redes de alcantarillado de manera que, se logre suplir tanto con las demandas de caudal residual de la población creciente como con el transporte de la escorrentía superficial sin afectar el bienestar de cada uno de los usuarios. De esta manera, en la actualidad es más que conocido que el número de ciudades y entes administrativos los cuales optan por la implementación de SUDS y estructuras reductoras de caudal pico como alternativa y solución ante eventos de inundaciones ha ido en aumento a nivel mundial.

La principal ventaja de los SUDS frente a otras alternativas radica en la utilidad remanente sobre los costos de instalación, de esta forma, estas estructuras logran disminuir el volumen y caudal de la escorrentía de formas mucho más económicas en comparación con otros métodos más tradicionales. El aumento de diámetros de tuberías, construcción de nuevas redes en paralelo o reubicación de la población residente en las zonas afectadas son solo algunas de las viejas metodologías que se han querido cambiar.

Con relación al uso de tanques de tormenta y, con el objetivo de minimizar la inversión asociada a su construcción e instalación, estos se diseñan como estructuras en forma de depósitos modulares, estos son hechos de polipropileno con conductos en su interior. La unión de varios módulos conforma una estructura con una alta porosidad donde, gracias a la ayuda de una geomembrana que cubre la estructura se logra el objetivo de que el agua no se infiltre en el terreno y de esta manera quede retenida en su interior. Estos tanques se construyen dependiendo del volumen de caudal al que van a ser sometidos, la disponibilidad de espacio, la eficiencia de reducción de inundaciones y la viabilidad financiera ante su implementación.

Teniendo en cuenta lo anterior, ahora está dentro de las posibilidades del diseñador el realizar un estudio más detallado de la viabilidad de instalar este tipo de estructuras en diferentes ciudades. Para esto, se debe tener en cuenta factores como las condiciones hidrológicas, los cambios futuros en la precipitación producto del cambio climático local, la topología y topografía de la red, el nivel de urbanización, uso de suelo, entre otros. A partir de esta información y con la ayuda de una buena herramienta computacional es posible localizar y dimensionar tanques de tormenta de forma óptima, además de determinar el porcentaje de reducción en la inundación que se logra con la implementación de estas estructuras.

En el proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro” se desarrollaron dos programas conocidos como OptSU y OptiTank. La diferencia entre OptSu y Optitank es que el primero tiene control hidráulico mientras que el segundo no. Para utilizar cualquiera de los dos es necesario partir de un modelo hidráulico de la red en el Stormwater Management Model (SWMM) y de un estudio hidrológico que permita conocer los caudales de entrada a cada nudo de la red.

Caso de Estudio:

El área de estudio está ubicada al sur del Valle de Aburrá y comprende toda la infraestructura del sistema de alcantarillado del Municipio de Sabaneta. Este tiene como cuerpo receptor al canal conocido como la Doctora el cual presenta colectores a lo largo de todo su cauce. De igual forma, hay otras quebradas o pequeños ríos cuyos nombres son: La Escuela y La Honda para las cuales también presentan colectores en la parte baja de la cuenca, y la Quebrada Cien Pesos y Las Lomitas que no tienen red de transporte de agua residuales anexas como tal, pero si tienen redes de aguas pluviales.

Sabaneta es un municipio que inició su desarrollo urbanístico en la parte baja del mismo y cercano al río Medellín y que, como se pudo observar en distintos estudios realizados por la empresa prestadora de servicio de alcantarillado para esta población (EPM), se detalló que las redes en la parte central del municipio son combinadas y en los sectores periféricos son separadas. De igual forma, vale la pena mencionar que las redes de alcantarillado para esta población se clasificaron en redes de recolección o secundarias y de transporte que a su vez

pueden ser colectores o interceptores. Las redes secundarias recogen las aguas residuales de los usuarios y, los colectores son las redes de transporte que reciben de las redes secundarias el agua, estos generalmente se diseñan paralelo a los cuerpos de agua pluvial o quebradas principales. De esta manera, en total el municipio cuenta con 110 km de red de alcantarillado en los estados de: operación, construcción y/o propuesto a modificar y propuesto a retirar. De estos, 5.3 km son de colectores, 1.18 km de interceptores y el resto de las redes secundarias.

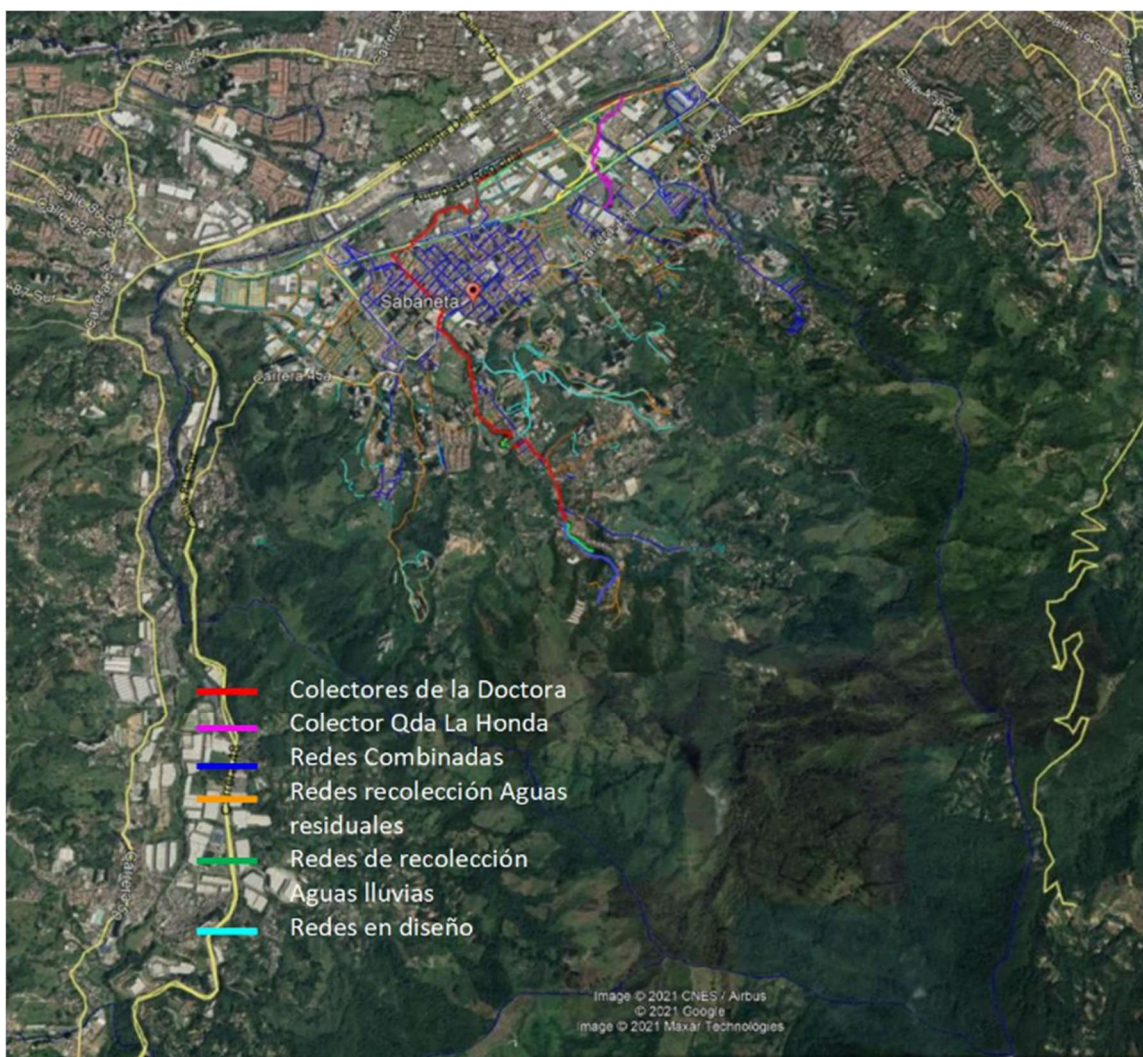


Figura 1: Ubicación de la Zona de Estudio.

Metodología:

La metodología de este proyecto de investigación se plateo con tres subdivisiones. La primera está relacionada con la investigación y descripción de las características detalladas del caso de estudio, la segunda enfatiza en el análisis de la precipitación que se plantea modelar analizar en la cuales se tomara como base trabajos existentes previamente aplicados a la red los cuales ejemplificaran el comportamiento de las inundaciones presentadas y de manera paralela posibles escenarios de precipitación con modelos meteorológicos de cambio climático aplicado, por último se elegirán las zonas más propensas a la instalación de posibles tanques de tormenta para una posterior evaluación de eficiencia ante reducción de inundaciones en el municipio.

Modelo Hidráulico de la Red:

El modelo hidráulico de la red se obtiene gracias a la ayuda de la empresa encargada de la gestión de alcantarillado de la zona de estudio. Empresas Públicas de Medellín (EPM) proporciono el modelo hidráulico el cual se tiene estructurado tan solo en un 30% del total de la extensión con la que se cree el municipio de Sabaneta cuenta. Dado que hay zonas que se construyeron hace varios años, conexiones ilegales y la dificultad que presenta la validación de datos en campo de toda la cuenca, hay zonas con información incompleta y por ende no fueron tenidas en cuenta tanto en los estudios previos ni en el análisis de los escenarios de inundación que EPM ha evaluado. De esta manera, dichos tramos tampoco son tenidos en cuenta en el presente estudio ni en los trabajos futuros ligados a este.

Es por lo anterior que, con base en el modelo hidráulico realizado por el consultor IDOM en junio de 2019 para EPM en el software SewerGEMS se ejecutó el análisis pertinente de las características de la red de alcantarillado con las cuales se trabajara.

A partir de esta información se procede a seguir los siguientes pasos:

1. Determinar la localización de la red para las cuales se tiene registro de las características hidráulicas como coordenadas de los nudos y tuberías, cotas de fondo, rasantes y batea, diámetro, longitud, material y tipo de sección de los conductos.
2. Localizar los puntos de arranque y descarga con las cuales opera el modelo, así como, puntos en los cuales se cuenta con aliviaderos o reguladores de caudal.
3. Localizar cuerpos de agua (ríos, quebradas, canales o interceptores) que funcionan como receptores del caudal modelado en el sistema.
4. Investigar a cerca de la metodología de cálculo de caudal de aguas residuales y la relevancia de la magnitud de este en los escenarios de evaluación.

Eventos de Precipitación:

La metodología general de obtención de aguaceros de diseño busca calcular Curvas IDF con las cuales se pueda determinar hietogramas de precipitación. Para esto se hacen necesario los siguientes insumos: el primero corresponde a los registros de lluvia histórica normalmente registrada con una temporalidad diaria; el segundo son las curvas IDF actuales de la zona de estudio; y el tercero es la selección de un Modelos Climatológicos Global (MCGs) aplicable a la zona de estudio (si lo que se quiere es obtener un escenario de evaluación que tenga en cuenta las incidencias del cambio climático en la zona).

Cabe resaltar que, Los Modelos Climatológicos Globales son algoritmos matemáticos que simulan la respuesta del clima al incremento de los gases de efecto invernadero. Existen una gran cantidad de MCGs que representan los procesos climáticos, donde se incluyen procesos físicos, químicos y biológicos de la atmosfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre (Roa, 2010)- Este tipo de modelos como son de carácter global no simulan con la misma precisión todas las regiones del planeta, por lo tanto, es necesario validar qué modelo se ajusta mejor a las condiciones climáticas de la zona de estudio.

Cabe resaltar que, el alcance del presente trabajo no acapara el cálculo de dichas curvas IDF ni la selección de algún Modelo Climatológico global para el cálculo de hietogramas. Dentro de este informe se procederá:

1. Presentar cada uno de los escenarios de precipitación implementados por la del modelo de evaluación en SewerGEMS, tanto MCG's como los utilizados en trabajos previos.
2. Presentar y contrastar los escenarios de precipitación seleccionados a aplicar a la red de alcantarillado de estudio.

Localización de Taques de Tormenta:

Con el ánimo de calcular y obtener la localización optima de los tanques de tormenta en la red se trató de hacer uso de las siguientes herramientas de soporte: la primera se conoce como OptSU y la segunda como OptiTank. Estos dos programas fueron diseñados ligados al programa SWMM, específicamente la versión 5.0 en español, el cual es de uso público y gratuito.

OptSU:

Fue desarrollado por expertos de la Universidad de Coímbra en Portugal y es un modelo de optimización que busca instalar tanques de almacenamiento en la red de drenaje pluvial de forma inteligente. Para esto tiene en cuenta las restricciones hidráulicas, de espacio y normativas asociadas a cada red.

Este programa se formuló con un único propósito y se implementó haciendo uso de dos

funciones objetivo. La primera se basa en la minimización de volúmenes, tanto de los tanques de almacenamiento como de la inundación y la segunda se centra en la minimización de costos, en donde se incluyen los costos asociados a la construcción de los tanques de almacenamiento y los daños potenciales generados por las inundaciones en la zona de estudio.

La función que se desea minimizar con el fin de reducir los volúmenes es:

$$\sum_{j \in N_u} V_j + \theta \sum_{i \in N} V_i^{surc}$$

1

Donde el primer término corresponde a la sumatoria del volumen de cada tanque de tormenta, mientras que el segundo término representa los volúmenes de inundación. El factor θ permite al usuario asignarle un peso a la inundación.

Por otro lado, la función de costos que se desea minimizar es:

$$\sum_{j \in N_u} CS_j(V_j) + \omega \sum_{i \in N} CF_I(V_i^{surch})$$

2

El primer término corresponde a la sumatoria de los costos asociados a la construcción de los tanques de tormenta. Por otro lado, el segundo término representa la sumatoria de los costos asociados a la inundación. El término ω tiene el objetivo de asignarle a la inundación un peso, el cual está ligado al objetivo de la investigación que se esté realizando.

Al tener en cuenta la incertidumbre asociada a las variables de entrada, se incluye un enfoque estocástico que se ajuste a la gran variedad de escenarios posibles, para esto se agrega el término P_s el cual representa la probabilidad de ocurrencia de cada escenario.

$$\text{Min} \sum_{j \in N_u} CS_j(V_j) + \omega \sum_{s \in S} P_s \sum_{i \in N} CF_I(V_i^{surch})$$

3

OPtSU requiere una serie de datos de entrada en los que se encuentra el archivo inp de SWMM con la red montada, el peso de inundación, el número máximo de unidades de almacenamiento, la restricción de la inundación total y local, los parámetros de algoritmo y el número de semillas. En la Figura se puede observar los valores de entrada por defecto que muestra el programa.

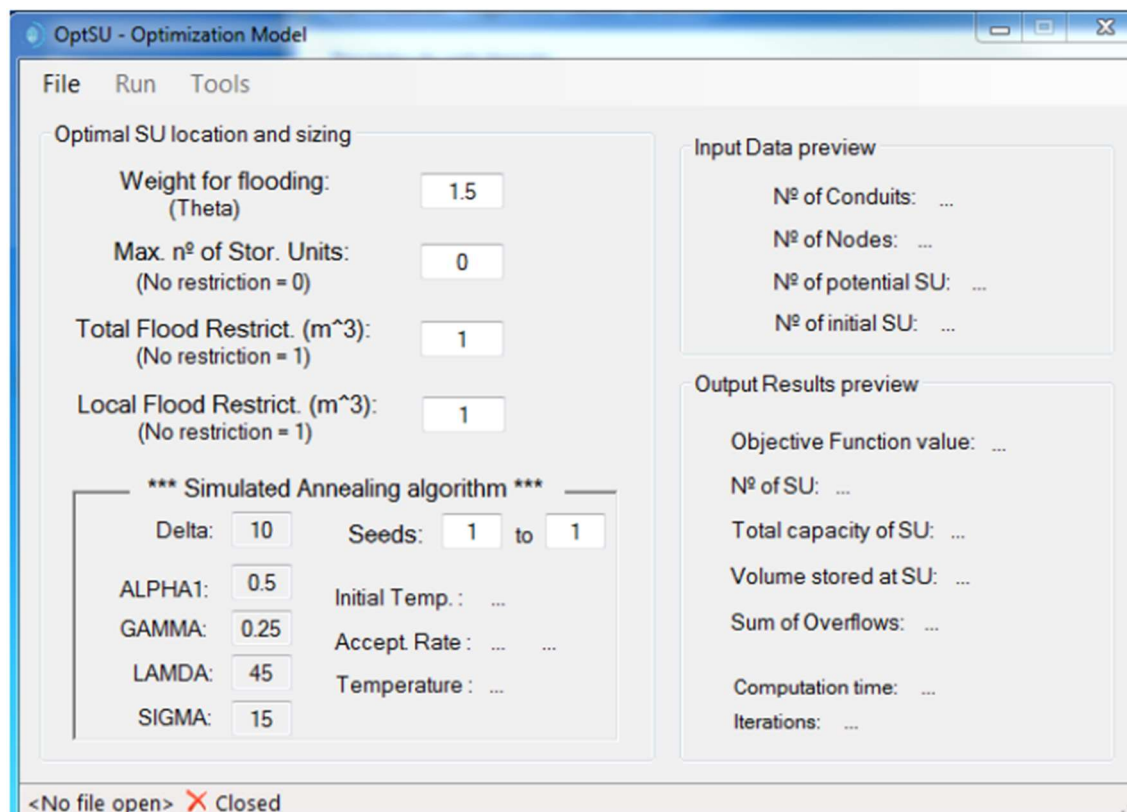


Figura 2: Interfaz de OptSU

Es importante resaltar que al optar por un valor igual a 0 en la casilla asignada al número máximo de unidades, el programa entiende que no hay restricciones y puede utilizar todos los nudos potenciales para incluir tanques. Por otra parte, cuando a las casillas de restricción de la inundación local y total se les asigna un valor igual a 1, no existe restricción en el valor de la inundación.

En cuanto a los parámetros del algoritmo, estos están relacionados con el método que utiliza OptSU para encontrar la solución óptima, el cual se denomina Simulated Annealing. Este algoritmo se basa en un fenómeno físico que reproduce el recocido de acero y cerámicas, en esta técnica el calentamiento genera un incremento en la energía cinética de los átomos lo que les permite desplazarse, el enfriamiento lento brinda una mayor probabilidad de recristalizarse en una configuración con menor energía a la inicial (se encuentra un mínimo). Esto en teoría es lo que reproduce el algoritmo Simulated Annealing para minimizar la función objetivo.

De forma breve, el procedimiento que sigue el algoritmo se resume en los siguientes pasos:

1. Inicialización. Se toma una solución aleatoria.

2. Se evalúa el desempeño de la solución. Si es factible se selecciona como solución inicial, de lo contrario se busca una nueva solución de forma aleatoria.
3. Se perturba la solución obtenida con algún cambio. 4. Se evalúan los resultados generados con la perturbación.
4. Se eligen las soluciones con mejores resultados.
5. Se actualiza la solución y se repite el proceso hasta alcanzar el criterio de parada.

Con el fin de generar una solución aleatoria OptSU utiliza una función de generación de números aleatorios y cada semilla da origen a la cantidad de números aleatorios deseados. Esto con el fin de conocer si los parámetros del algoritmo deben ser calibrados, lo que se determina utilizando diferentes semillas. Si se llega al mismo resultado (o muy similar) se puede confiar en el resultado del programa, de lo contrario se deben calibrar los parámetros, hasta que se lleguen a respuestas similares sin importar el número de semillas empleados.

OptiTank:

Desarrollado por expertos de la Universidad Politécnica de Valencia en España el cual busca minimizar el número y tamaño de los tanques de tormenta que se van a instalar en la red de drenaje de aguas pluviales. Además, tiene la opción de rehabilitar ciertas tuberías de la red. Estas dos funcionalidades buscan reducir la inundación al tener en cuenta las restricciones hidráulicas, de espacio y normativas asociadas a cada red.

La función objetivo es la sumatoria de cuatro funciones: el costo asociado al nivel de inundación en los nudos, el costo de los tanques de tormenta que se van a instalar, el costo de cambiar conductos en la red y el costo asociado al volumen de almacenamiento máximo de agua en la red. Lo anterior se puede expresar matemáticamente con la siguiente función:

$$\lambda_1 \sum_{i=1}^N C(V_I(i)) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_0} C(V_{DR}(i)) + \lambda_3 \sum_{i=1}^M C(D_N(i))L_i + \lambda_4 \sum_{i=1}^M C(V_{max}(i))$$

4

Donde N corresponde a cada uno de los nudos y M a las tuberías de la red considerada. Adicionalmente, el multiplicador de Lagrange permite decidir qué términos de la función objetivo se van a considerar, 1 si se quiere tener en cuenta o 0 de lo contrario (Iglesias, Martínez, & Saldarriaga, Pseudo-Genetic Optimization Model Applied to Urban Storm Water Rehabilitation Projects, 2016).

La función de costo de los tanques se describió en términos de su volumen y tiene la siguiente forma:

$$D(V_{DR}) = A + BV_{DR}^C$$

5

Donde A, B y C son coeficientes de ajustes, los cuales dependen de las condiciones del área de estudio. Para determinar estos valores, en el caso colombiano se utilizó un estudio

realizado por la Universidad de los Andes, el cual se detalla en el segundo informe del proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro”, los resultados indican que $A = 16923$, $B = 318.4$ y $C = 0.5$. Por otro lado, la función de costo de los conductos se formuló en términos del diámetro de las tuberías y tiene la siguiente forma:

$$C(D_N) = AD_N + BV_N^2$$

6

Al igual que en la Ecuación 5, hay unos coeficientes de ajuste (A y B), los cuales dependen de la zona estudiada. En el caso colombiano estos coeficientes son: $A = 237.93$ y $B = 40.685$.

En el caso del costo asociado a la inundación, se definieron tres funciones, la primera es una función proporcional al volumen total de inundación, la segunda es una función polinómica y la tercera es una función de costo adimensional.

La primera función se formuló en la primera parte del desarrollo del modelo y consiste en multiplicar el volumen de inundación por un coeficiente K_I

$$C_{Inundación} = K_I \sum_{i=1}^N (V_I(i))$$

7

De la ecuación anterior se puede afirmar que valores altos de K_I conducen a soluciones con menor inundación, por lo altos costos que representa, por el contrario, valores bajos de K_I generan soluciones con mayores inundaciones.

La función de costos polinómica tomó como punto de partida un estudio realizado por la Universidad de los Andes, el cual se detalla en el informe de la fase II del proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro”. En este estudio se relaciona el costo de inundación con el máximo nivel del agua y a partir de esto se obtiene una curva que representa el costo de inundación por metro cuadrado de superficie en función del nivel del agua. Lo anterior se realizó para los seis estratos económicos presentes en Colombia y para los usos del suelo comercial e industrial. La forma de esta función que se ajustó es:

$$C(V_I) = Ay^4 + By^3 + Cy^2 + Dy$$

8

Los coeficientes de costos están ajustados en euros para cada uno de los estratos y usos del suelo, se muestran en la siguiente tabla. Es importante mencionar que estos coeficientes se ajustaron a curvas que no son las presentadas por el estudio de la Universidad de los Andes; estas curvas se modificaron para considerar polinomios de cuarto grado sin un término independiente.

Tabla 1: Coeficientes de Ajuste

Uso del Suelo	A	B	C	D
Estrato 1	117.6	-363.91	256.91	130.66
Estrato 2	205.12	-623.76	440.79	217.93
Estrato 3	110.58	-308.48	83.54	366.98
Estrato 4	251.56	-701.88	190.07	835.00
Estrato 5	116.00	-208.99	-483.88	1290.7
Estrato 6	184.52	-335.25	-773.28	2064.8
Comercial	4046.00	-12579.00	9830.50	2629.1
Industrial	3836.00	-12068.00	10166.00	1066.7
Promedio	1108.5	-3398.60	2463.8	1075.2

Finalmente, la función de costos adimensional trata de recoger de forma más precisa el comportamiento esperado de una curva de inundación, por lo tanto, se realiza un ajuste potencial de la forma:

$$C_y = C_{max} \left(1 - e^{-\lambda \frac{y}{y_{max}}} \right)^b$$

9

Donde C_{max} representa el costo máximo al que tienden las curvas de inundación cuando se alcanza un nivel de inundación y_{max} , y es el nivel de inundación y λ , b son coeficientes de ajuste de la curva. Después de realizar un análisis se encontró que los valores de estos dos coeficientes que mejor se ajustan son $\lambda = 4.88$ y $b = 2$.

Manual:

OptSU:

A continuación, se describe la metodología que se debe seguir para resolver el problema de dimensionamiento y localización óptima de unidades de almacenamiento en una red con el programa OptiTank.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar la ubicación y dimensión de los tanques de tormenta. Esta selección se realiza teniendo en cuenta los nudos con mayor inundación (nudos críticos), la disponibilidad de espacio, las condiciones geográficas y la reglamentación vigente del área de estudio. Por otro lado, se deben crear los tanques de

almacenamiento en el programa EPA SWMM. Para esto se elige el nudo que se desea convertir a tanque, luego se oprime click derecho se escoge la opción “Convertir a” y luego “Depósito”, tal como se muestra en la siguiente imagen.

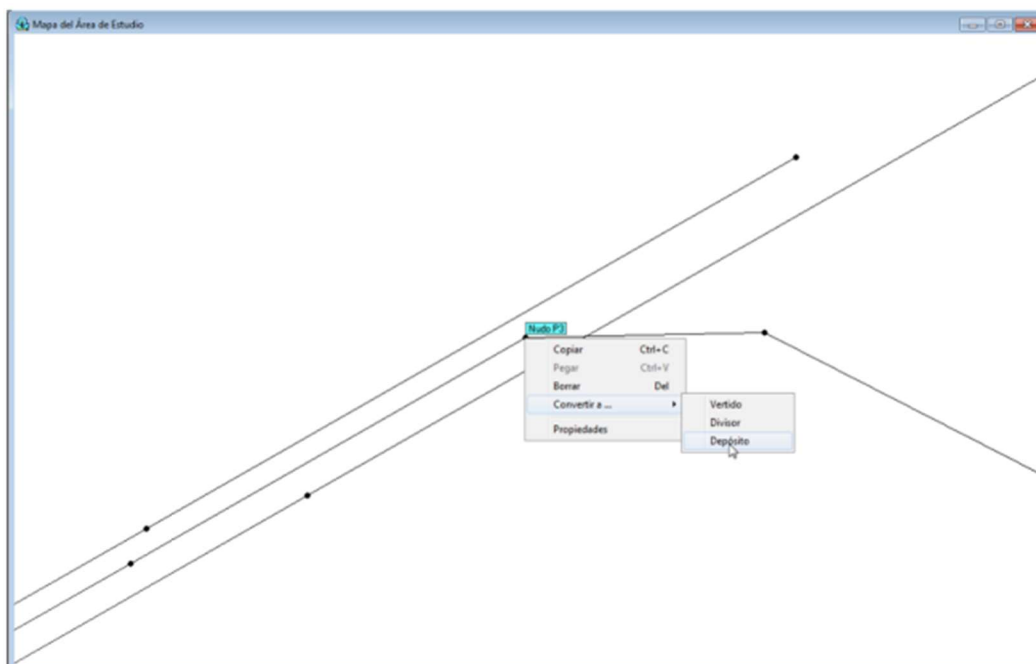


Figura 3: Cambio de Nudo a Deposito

Lo segundo que se hace es crear un nuevo nudo aguas abajo del depósito.

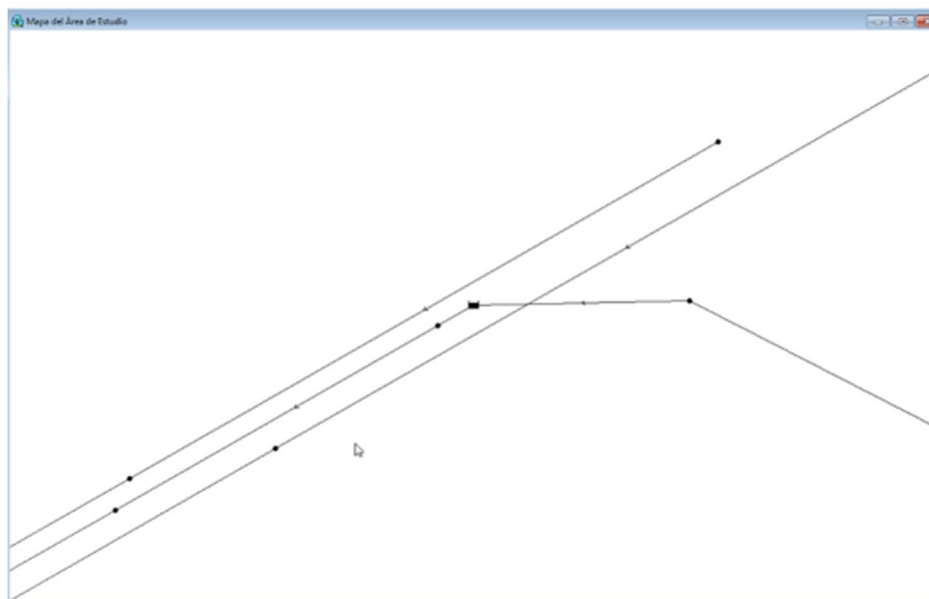


Figura 4: Creación del Nuevo Nudo

El tercer paso consiste en asignarle al nudo creado las propiedades del nudo anterior (aportes, cota de fondo y profundidad máxima). Para esto se da clic sobre el depósito y se copian los valores de cota de fondo y profundidad máxima, para luego dirigirse al nudo e insertar dichos valores. Con el fin de incluir los aportes, es necesario dar clic en el tanque, luego ir a “Aportes (YES)” y se despliega la ventana que se muestra en la Figura 9. A continuación, se copia el contenido de la sección “Serie Temporal”, se da clic en “Aportes (NO)” del nudo creado y se pega el valor copiado en la sección de “Serie Temporal”.

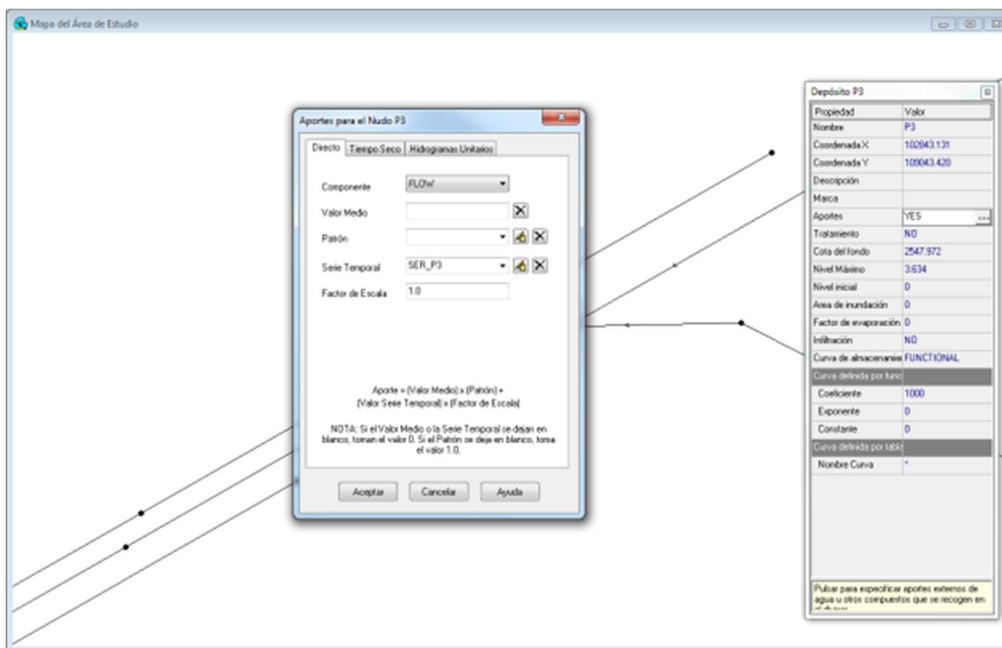


Figura 5: Ventana de Aportes del Nudo

El cuarto paso consiste cambiar el nudo de inicio de la tubería del tanque de almacenamiento al nudo creado.

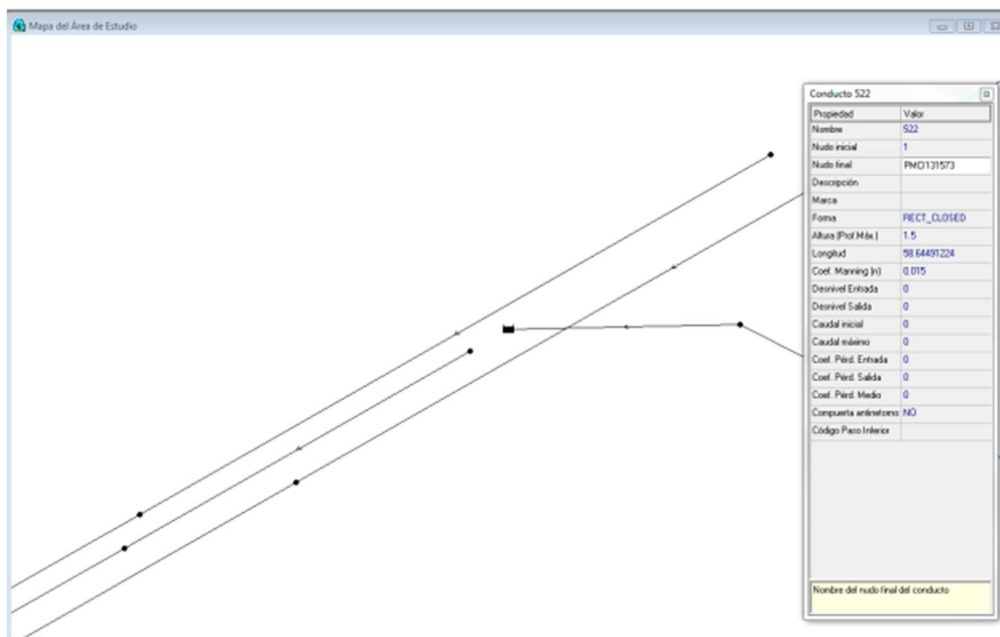


Figura 6: Asignación del Nudo de Entrada

El quinto paso es crear un orificio que vaya desde el tanque de almacenamiento al nudo.

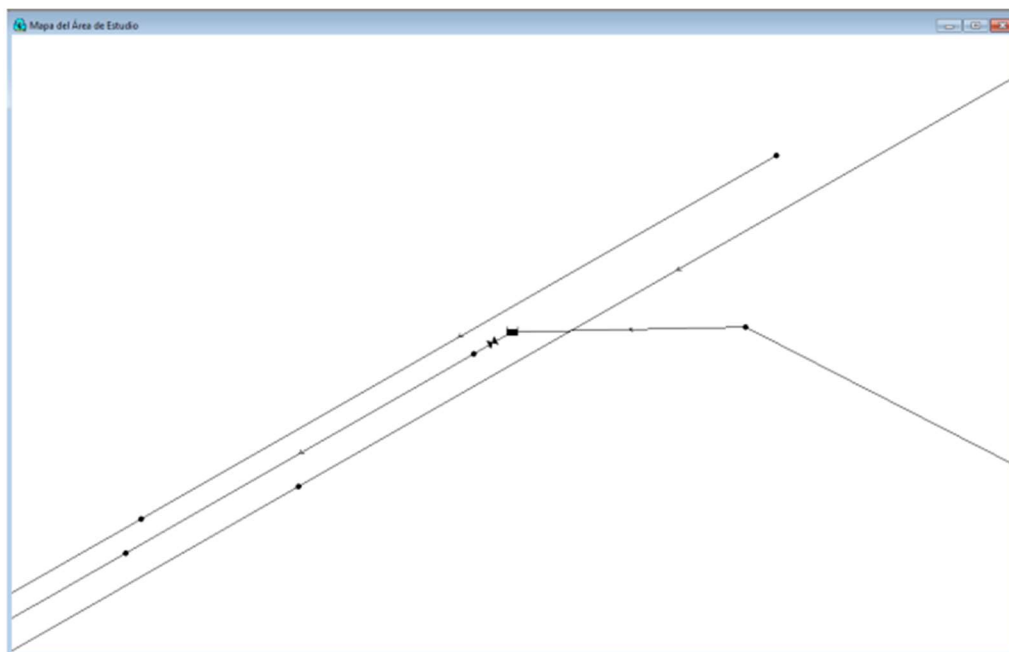


Figura 7: Creación del Orificio

Ahora, se modifican las propiedades del orificio, el valor correspondiente a “Altura” debe ser igual o menor al valor de “Altura (Prof. Máx.)” de la tubería aguas abajo del nudo. El valor de “Anchura” es 0 y el valor del “Coeficiente descarga” se recomienda que sea 1. El quinto paso consiste en cambiar las propiedades del depósito, para esto es necesario dirigirse a la sección de “Curva definida por función” se coloca cero en “Coeficiente” y “Exponente”. Para “Constante” se introduce el valor del área en planta del tanque. Este valor debe encontrarse entre el rango mínimo y máximo que se defina para cada unidad de almacenamiento. Si se coloca un valor de 1, el programa OptSU toma el depósito como un nodo, es decir, no existiría almacenamiento. Esto podría ser útil para saber cuál es la inundación real sin la implementación de ningún tanque de almacenamiento. Además, se debe cambiar el “Nivel máximo” del depósito; para esto se tiene en cuenta si la tubería aguas arriba del depósito tiene o no desnivel de salida. En caso de que cuente con un desnivel de salida, el nivel máximo del depósito debe ser igual a este valor, si el desnivel es menor a 0.10 m, se recomienda no incluirlo. Si la tubería no tiene desnivel de salida, el valor del Nivel Máximo del depósito será igual al diámetro de la tubería aguas arriba del depósito. El sexto paso radica en crear un archivo tipo .txt en el cual se defina la posición y características de los depósitos creados, además de las propiedades de los orificios. El número de la posición de los depósitos es igual a la posición del último nudo creado más el número de descargas más uno. Para saber la posición de los depósitos (nodos), se abre el archivo INP de la red y se copia la sección junctions y outfalls en una hoja de Excel. El archivo .txt está compuesto por siete columnas las cuales se describen a continuación:

- Primera: posición de los depósitos.

- Segunda: área mínima en planta del tanque de tormenta.
- Tercera: área máxima en planta del tanque de tormenta.
- Cuarta: altura mínima de la tubería de salida del tanque de almacenamiento.
- Quinta: altura máxima de la tubería de salida del tanque de almacenamiento. Este valor debe ser igual al de “Profundidad Máxima” del nudo.
- Sexta: diámetro mínimo del orificio de salida del tanque de almacenamiento.
- Séptima: diámetro máximo del orificio de salida del tanque de almacenamiento.

Este valor debe ser igual al de “Altura” del orificio. Finalmente, se crea una fila para cada tanque potencial de almacenamiento creado. En el caso de la red de Sabaneta, se encontró que la posición del primer tanque era 980, dado que se tienen 946 nudos y 33 descargas ($946+33+1=980$). Como se crearon 4 tanques de almacenamiento potenciales, el último tanque deberá encontrarse en la posición 983.

Archivo	Editar	Ver				
SU_NODE	SU_AREA_(m2)		OUTLETOFF_(m)		ORIFICE_(m)	
Node	min_A	Max_A	Offs_0	Off_SU	min_o	Max_o
980	330	5062	0	2.2849	0.1	1.05
981	330	5062	0	3.09	0.1	0.5
982	330	5062	0	3.5859	0.1	0.3
983	330	5062	0	2.8879	0.1	0.2

Figura 8: Tabla de Datos, entrada a OptSU

El séptimo paso consiste en ingresar los datos a OptSU. Para esto se abre el programa y se da clic en “File” luego “Open” y se carga primero el archivo. inp y luego el .txt.

En el octavo paso se ejecuta el programa, para esto es necesario dirigirse a la pestaña “Run” primero elegir la opción “SWMM- Toolkit Test”. Con esto el programa lee los valores de entrada, los cuales se convierten en el número de tuberías, número de nodos, número de unidades de almacenamiento potenciales y número inicial de unidades de almacenamiento. Posteriormente, en la misma pestaña elegir la opción “Optimization Model”. Finalmente se eligen las restricciones del modelo de decisión (peso de la inundación, número máximo de unidades de almacenamiento, restricción de la inundación total y restricción de la inundación local), lo cual depende de las necesidades del modelador. Los resultados se muestran en la ventana principal del programa en la esquina inferior derecha. Sin embargo, el programa permite visualizar los resultados de forma gráfica utilizando la pestaña “Tools” en la cual se puede seleccionar el parámetro que se desea visualizar (localización de las unidades de

almacenamiento potenciales, la localización de las unidades de almacenamiento seleccionadas por el modelo y la inundación). Además, si se desean conocer los resultados en detalle (área, volumen de los tanques y tamaño de orificio) el usuario debe dirigirse a la carpeta en donde se encuentra el ejecutable del programa y luego a “Results”. En este lugar, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en formato .txt.

OptiTank:

El primer paso para utilizar OptiTank consiste en oprimir el botón Abrir, el cual se encuentra en la parte superior izquierda del programa, y cargar la red que se desea optimizar. Una vez se carga el archivo, en la pantalla principal se debe mostrar el volumen de inundación, el volumen de agua en la red, el volumen de los tanques que hay en la red y el valor de la función objetivo, tal como se muestra a continuación.

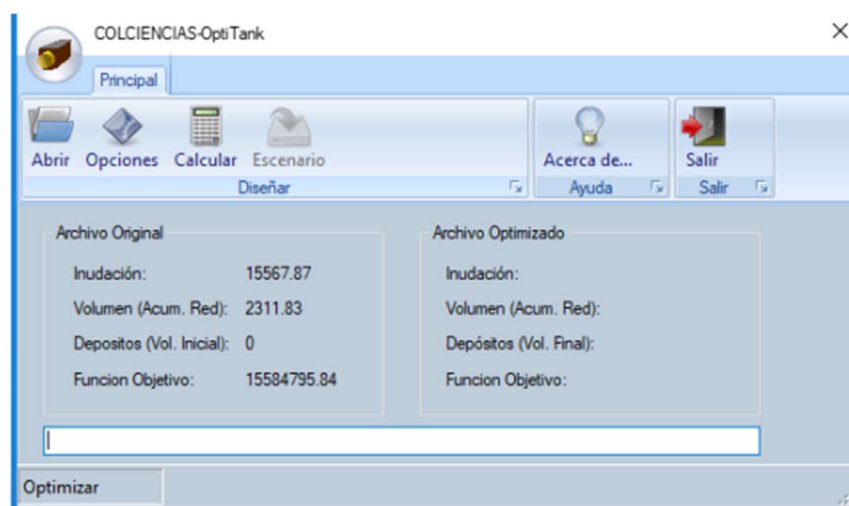


Figura 9: Archivo cargado en OptiTank

El segundo paso es ir al botón Opciones e ingresar los parámetros de la función de costos de almacenamiento en red, la función de costo de los tanques, la función de costos de los

conductos, los intervalos de discretización de las variables continuas y la función de costo de inundación. Es importante resaltar que todas las funciones de costo están en euros.

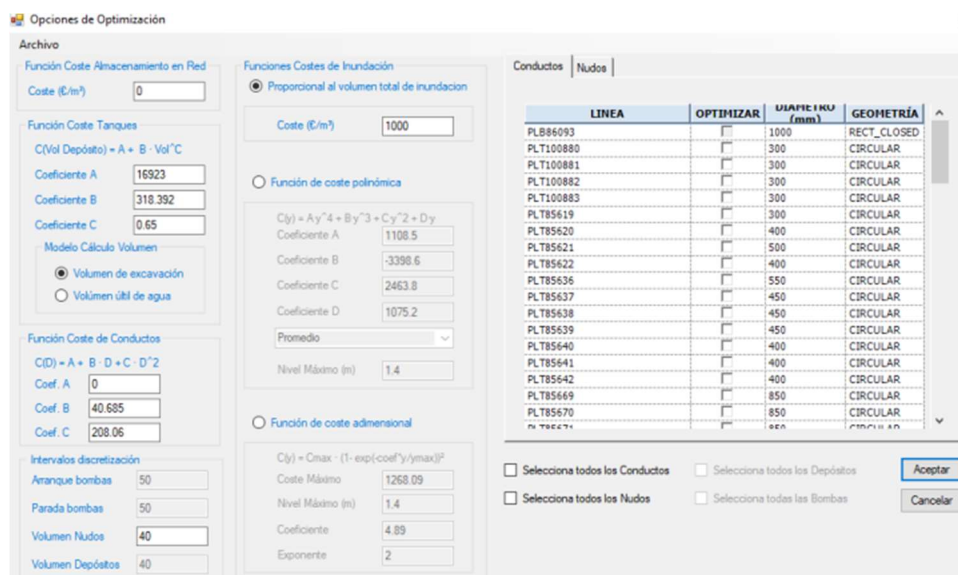


Figura 10: Ventana de Opciones de Optimización

En el caso de la función de costo de almacenamiento en red (Función de costo de los tanques), por defecto el programa le asigna a esta casilla un valor igual a cero. Sin embargo, si se desea penalizar el almacenamiento de agua en la red, para evitar tiempos de retención largos, se le puede asignar un costo.

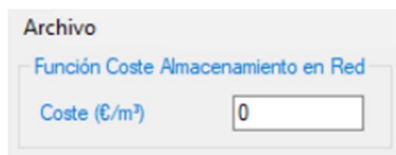


Figura 11: Función de costos de almacenamiento en red

En cuanto a la función de costo de los tanques, es de la forma $A + BV^C$ (donde A, B y C son coeficientes de ajuste, mientras V es el volumen), los valores que se encuentran por defecto son aplicables únicamente al caso colombiano. En este punto se puede seleccionar el modelo de cálculo del volumen, ya sea teniendo en cuenta el volumen de excavación o el volumen útil de agua. El primero representa el volumen total de movimiento de tierras que es necesario

realizar desde la superficie del terreno para la construcción del tanque, mientras que el segundo refleja de forma más cercana el tamaño real del tanque.



Función Coste Tanques

$$C(\text{Vol Depósito}) = A + B \cdot \text{Vol}^C$$

Coeficiente A: 16923

Coeficiente B: 318.392

Coeficiente C: 0.65

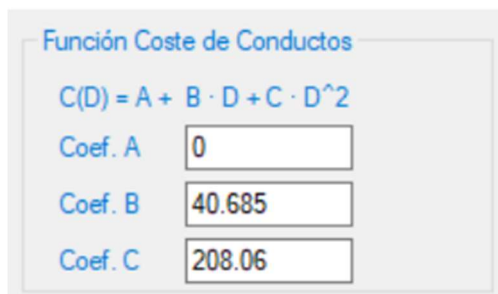
Modelo Cálculo Volumen

Volumen de excavación

Volumen útil de agua

Figura 12: Función de costo de los tanques

La función de costo de conductos es de la forma $AD + BD^2$ (A y B son los coeficientes de ajuste y D el diámetro de la tubería), los valores por defecto del programa son aplicables únicamente al caso colombiano. Esta función se emplea en caso de que se deseen sustituir algunas tuberías por unas de dimensiones diferentes, con el fin de mejorar la solución del programa.



Función Coste de Conductos

$$C(D) = A + B \cdot D + C \cdot D^2$$

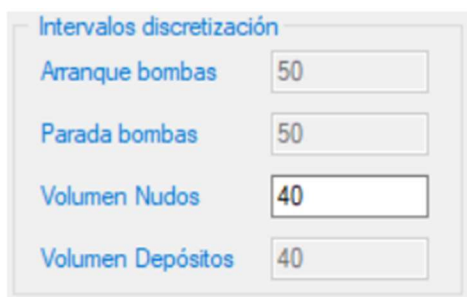
Coef. A: 0

Coef. B: 40.685

Coef. C: 208.06

Figura 13: Función de costo de conductos

Los intervalos de discretización se utilizan en el programa para discretizar las variables continuas como el arranque de las bombas, la parada de las bombas, el volumen de los nudos y el volumen de los depósitos.



Intervalos discretización	
Arranque bombas	50
Parada bombas	50
Volumen Nudos	40
Volumen Depósitos	40

Figura 14: Intervalos de discretización

Hay tres funciones en OptiTank para calcular el costo de inundación. La primera es de carácter lineal y es proporcional al volumen total de inundación, esta es la ecuación más básica y el usuario puede ingresar el valor del costo en euros por metro cúbico de agua. La segunda ecuación es de carácter polinómico y se puede seleccionar una de las funciones dependiendo del uso del suelo (comercial, residencial o industrial), en caso de ser residencial se debe elegir el estrato, en caso de no contar con información suficiente se puede elegir la opción de genérica o promedio y cambiar los valores de los coeficientes de ajuste. Es necesario resaltar que los valores por defecto del programa sólo son aplicables al caso colombiano, si se desea optimizar una red que no se encuentre en Colombia se debe hacer un estudio en donde se encuentren los parámetros del ajuste polinómico e ingresar estos valores al programa. La última función es la de costo adimensional y los coeficientes λ , b , el costo y

nivel máximos pueden ser calculados e ingresados al programa con el fin de alterar la forma de la curva.

Funciones Costes de Inundación

Proporcional al volumen total de inundación

Coste (€/m³)

Función de coste polinómica

$C(y) = Ay^4 + By^3 + Cy^2 + Dy$

Coeficiente A

Coeficiente B

Coeficiente C

Coeficiente D

Promedio

Nivel Máximo (m)

Función de coste adimensional

$C(y) = C_{max} \cdot (1 - \exp(-coef \cdot y / y_{max}))^2$

Coste Máximo

Nivel Máximo (m)

Coeficiente

Exponente

Figura 15: Funciones de costo de Inundación

Una vez se suministra la información de costos al programa, se le debe indicar qué tuberías o nudos se desean reemplazar. Para esto, en el programa es necesario dirigirse a la sección que se encuentra a la derecha en la Figura 15, buscar las tuberías o nudos que se podrían reemplazar y dar click en la segunda columna que se titula Optimizar. Si el usuario desea

seleccionar todos los nudos o conductos, OptiTank permite hacerlo de forma rápida dando un click en la parte inferior izquierda, tal y como se muestra.

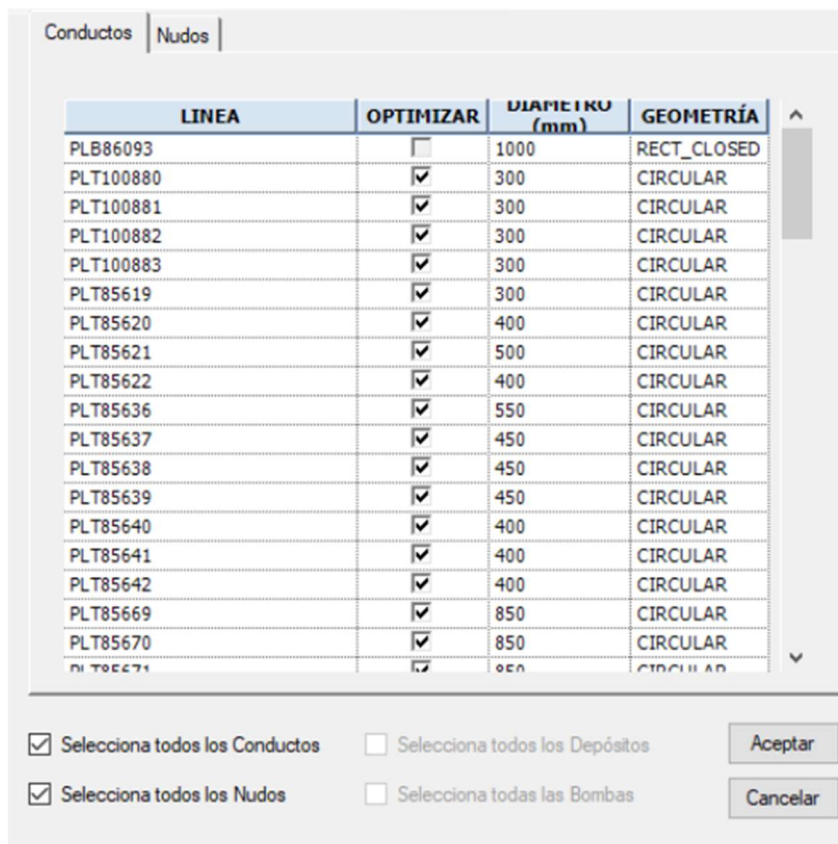


Figura 16: Selección de tuberías y nudos potenciales

Para el tercer paso es necesario dirigirse a la opción Calcular e ingresar los parámetros del algoritmo Pseudo-genético (probabilidad de mutación, probabilidad de cruce, tamaño de la población y generaciones sin cambio). Una vez se tienen estos valores es necesario dirigirse a la parte inferior donde se encuentra el icono del ADN e ingresar el archivo donde se desea

que se almacenen las respuestas, la extensión de este archivo es (.res), pero se puede utilizar un archivo de texto (.txt) para recopilar la información.

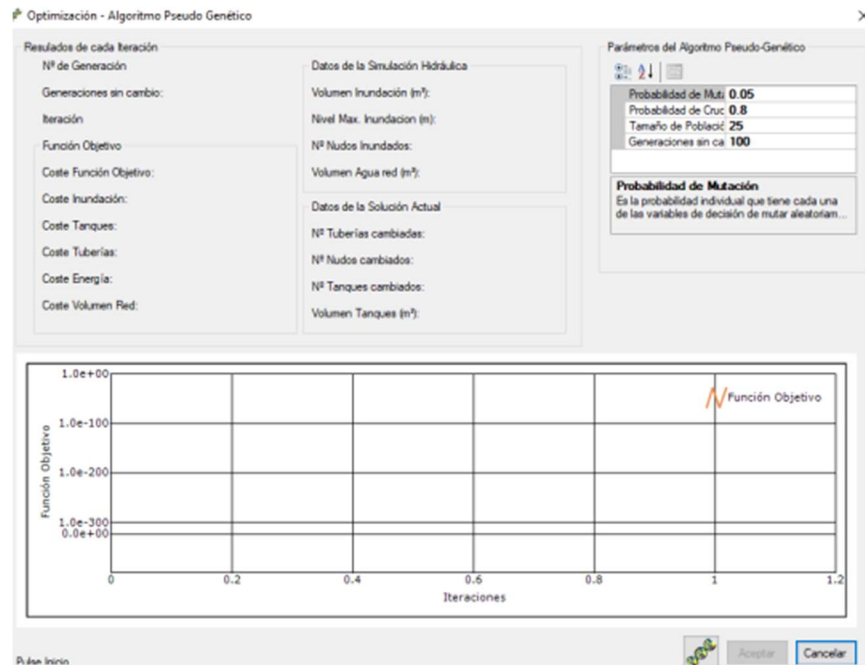


Figura 17: Parámetros del algoritmo Pseudo-genético

Después de ingresar el archivo donde se van a almacenar las respuestas, OptiTank empieza a realizar las corridas y a medida que las va haciendo muestra los resultados en la pantalla.

Cuando finalmente encuentra la solución óptima, el número de generaciones se detiene y se muestran los resultados en la pantalla tal como se observa.

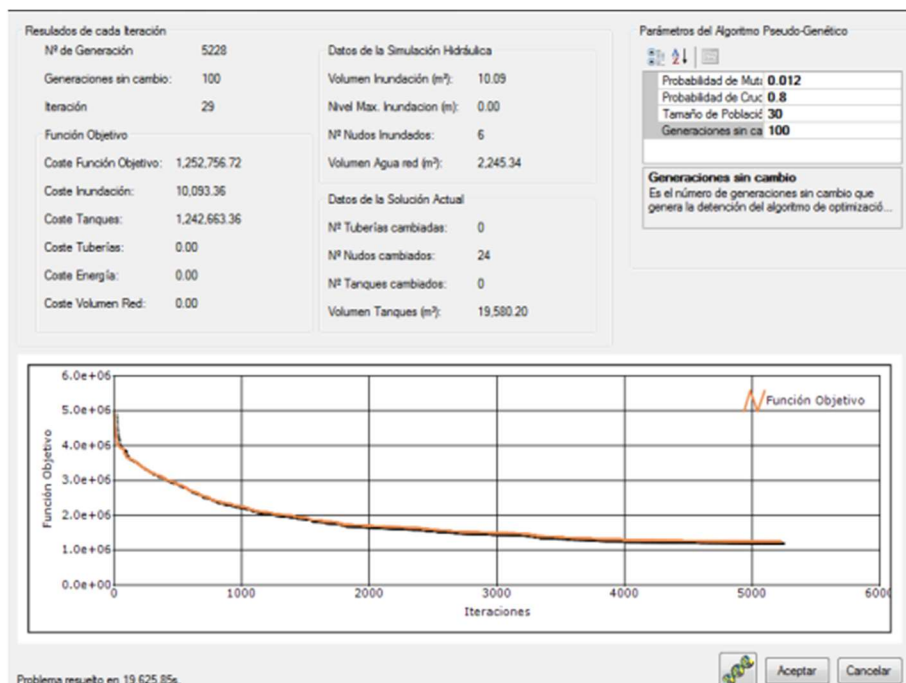


Figura 18: Visualización de resultados

A continuación, se da click en Aceptar y el programa muestra en su pantalla principal un resumen de los resultados (inundación final, volumen de agua en la red, volumen de los tanques y la función objetivo). Adicionalmente, se activa el cuarto botón (Escenario), el cual

permite exportar los resultados a SWMM con el fin de que el usuario pueda manipular la nueva red.

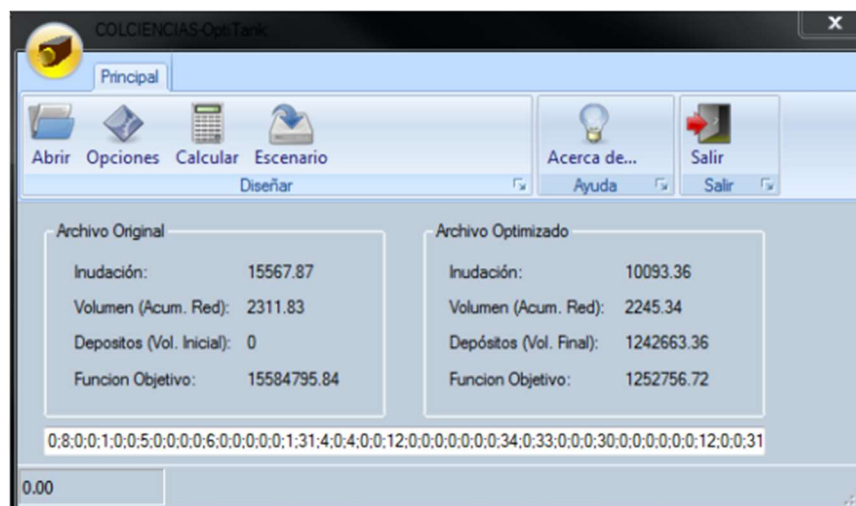


Figura 19: Resumen de los resultados de OptiTank.

Resultados:

Modelo Hidráulico de la Red:

Características Principales de la Red de Sabaneta:

Como se mencionó anteriormente, el municipio de Sabaneta cuenta con distintos tipos de redes las cuales presentan cierto tipo de características específicas para tener en cuenta. A continuación, en la Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se listan varias de ellas con el objetivo de que el lector tenga una idea aproximada de la calidad y estructura de como este sistema de alcantarillado está conformado. Vale la pena recalcar el hecho de dicha información fue facilitada por la empresa prestadora del servicio (EPM) producto de informes y trabajos previos realizados.

Tabla 2: Distribución de las Redes según el Tipo de Red

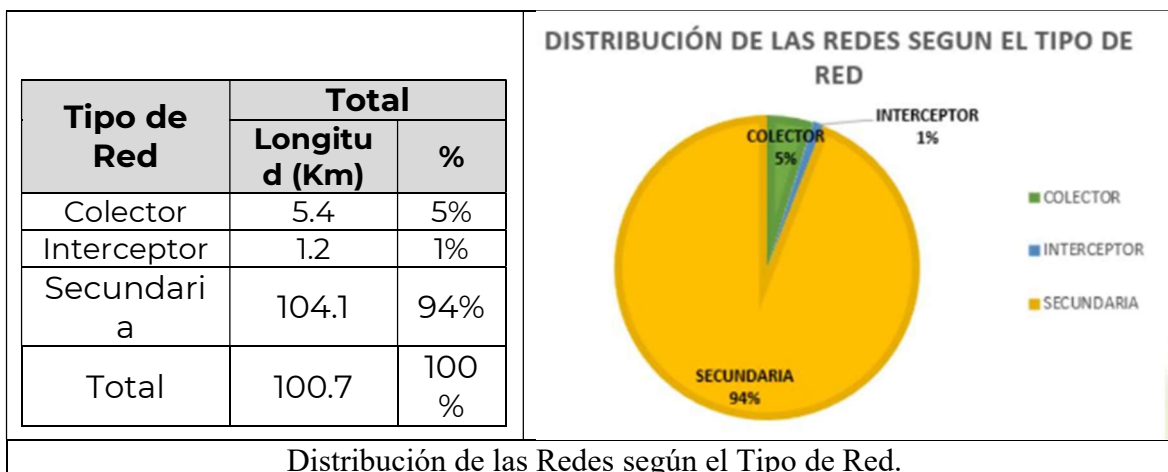


Tabla 3: Distribución de las Redes según Diámetro de Tubería

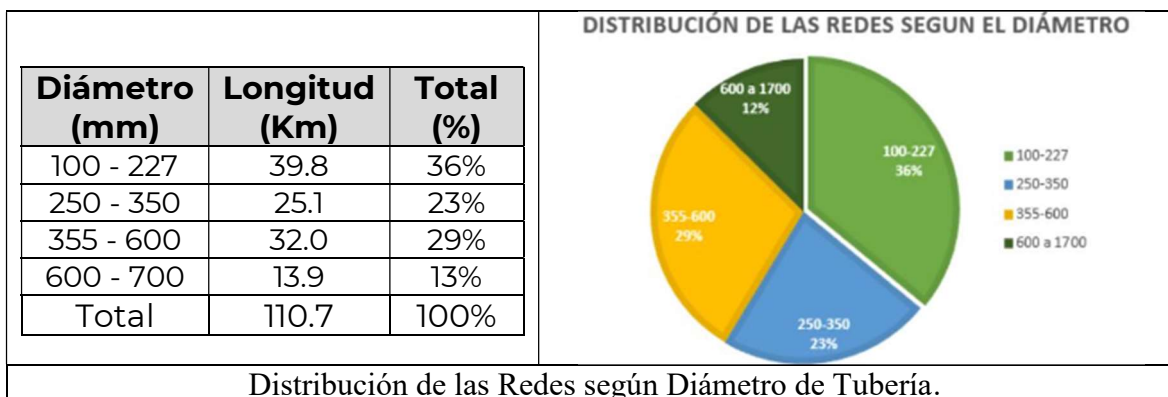
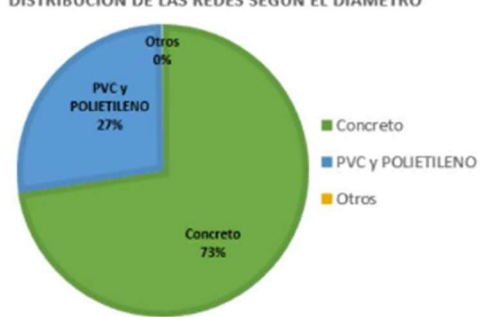


Tabla 4: Distribución de las Redes según Material de la Tubería

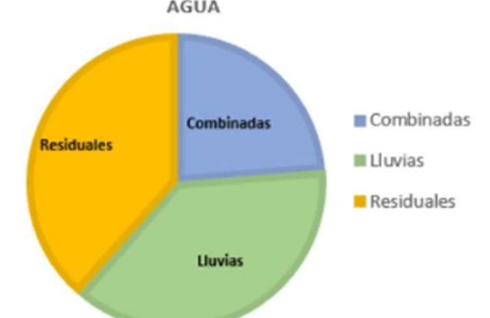
Material	Longitud (Km)	Total (%)
Concreto	76.8	72%
PVC Y Polietileno	33.6	27%
Otros	0.3	0.2%
Total	110.7	100%



Distribución de las Redes según Material de la Tubería.

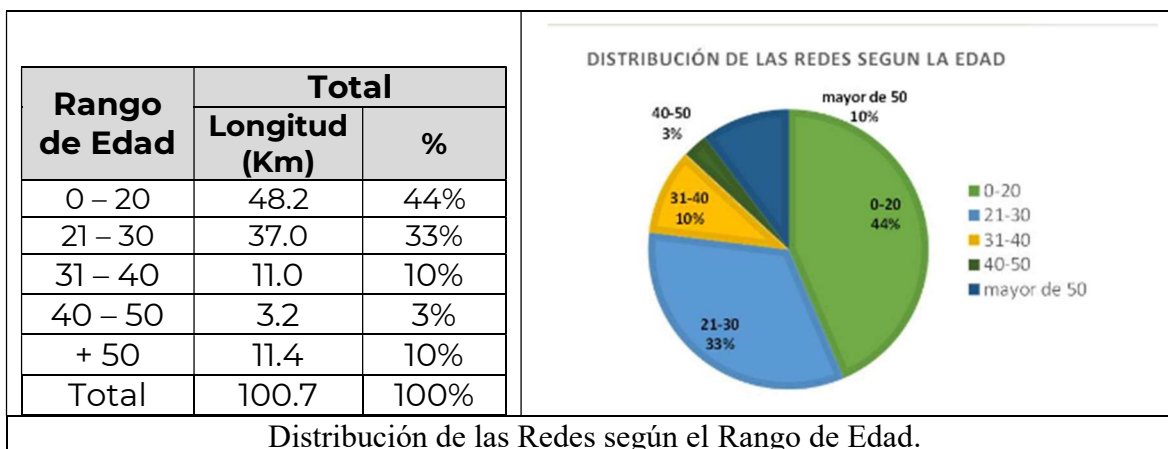
Tabla 5: Distribución de las Redes según Tipo de Agua

Tipo de Red	Longitud (Km)	Total (%)
Combinadas	26.24	24%
Lluvias	41.78	38%
Residuales	42.69	39%
Total	110.7	100%



Distribución de las Redes según Tipo de Agua.

Tabla 6: Distribución de las Redes según el Rango de Edad

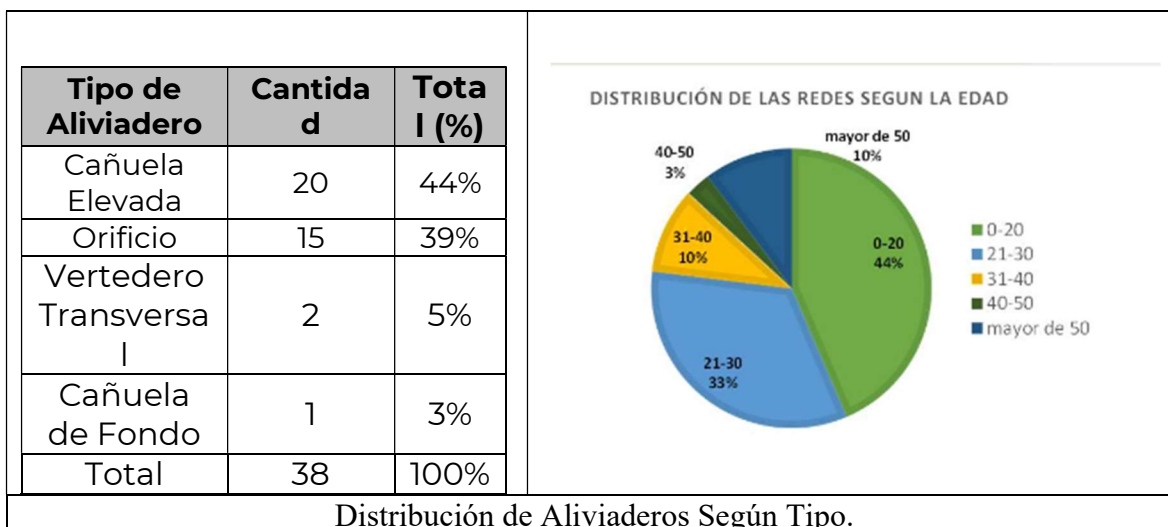


Aliviaderos:

Se conocen por ser estructuras reguladoras del flujo efectivo y caudal vertido a los cuerpos de agua receptores. En términos generales su funcionamiento consiste en regular el flujo de agua dentro del sistema en la medida que el caudal excedente, producto de intensidad de lluvias fuerte, es conducido mediante conductos o colectores a estructuras de almacenamiento o cuerpos receptores. De esta manera son estructuras importantes, pues bien, determinan el aumento de inundaciones en cada uno de los sectores donde están localizados y es por esto que su localización y comportamiento se deben tener demasiado presente en cualquier evaluación.

En el sector de estudio hay 38 aliviaderos, la mayoría son de cañuela elevada y de orificio.

Tabla 7: Tipos de Aliviaderos en Sabaneta .



Por otro lado, en los trabajos realizados en el año 2019 por la consultoría IDOM, se describió la metodología implementada para su modelación en el sistema de alcantarillado y como se pensó el comportamiento del caudal dentro del SewerGEMS que fue la herramienta de simulación seleccionada para operar.

A continuación se presenta la localización de dichos puntos dentro del motor de cálculo trabajado:

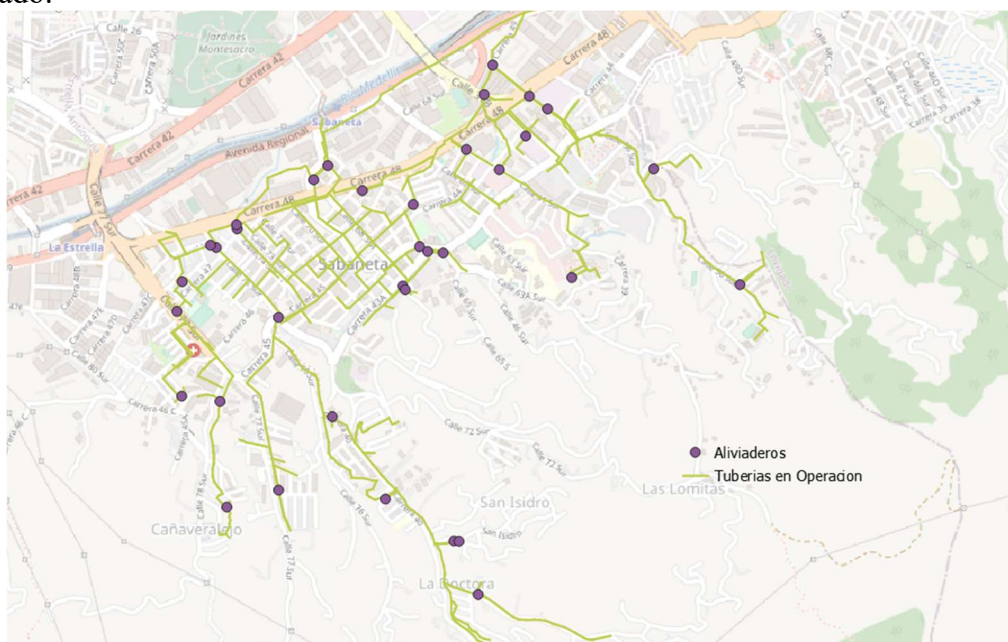


Figura 20: Localización de Aliviaderos dentro de la Red de Alcantarillado de Sabaneta

Cuerpos de Agua:

A continuación se presentan los principales ríos y quebradas con los que cuenta el municipio de estudio. Dichos cuerpos de agua son relevantes en tanto que, algunos prestan servicio de reguladores y transportadores de caudal excedente de la red, y otros aguas abajo, cumplen la tarea de ser receptores finales del flujo efectivo de la red de alcantarillado de Sabaneta.

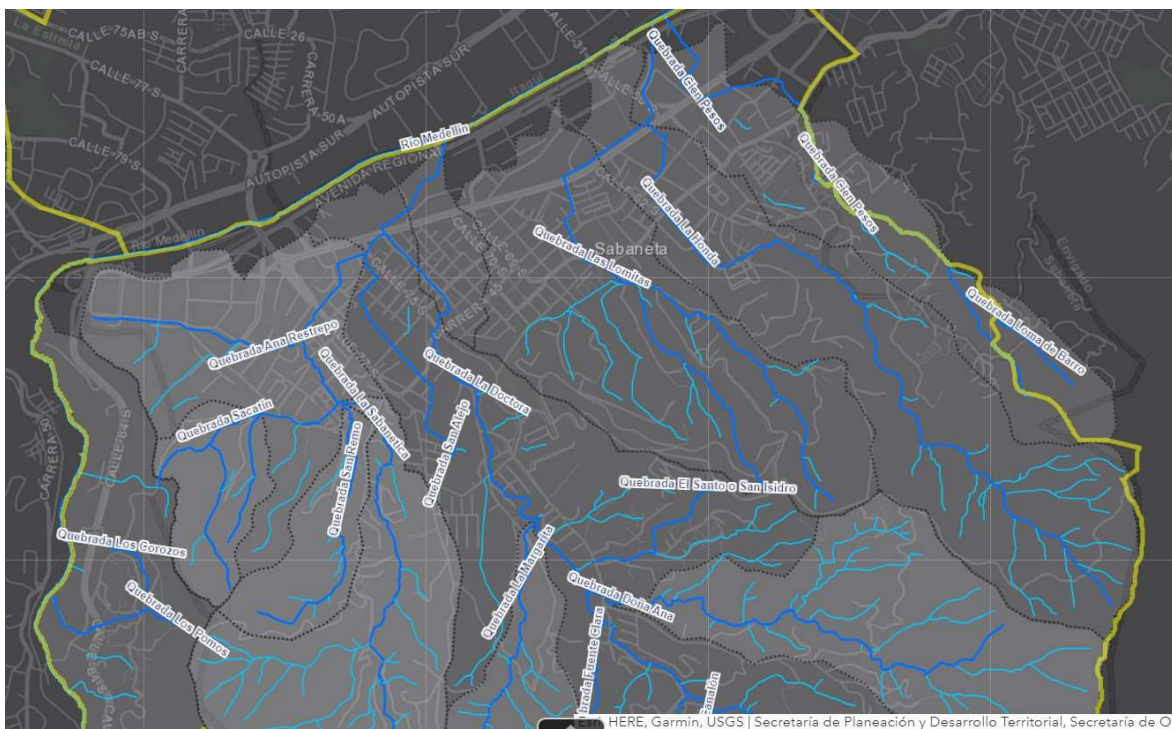


Figura 21: Mapa de Recursos Hídricos de Sabaneta.

Puntos de Descarga:

Como se puede evidenciar en la Figura 22, el sistema de alcantarillado de Sabaneta cuenta con 33 puntos de descarga de caudal a cuerpos de agua, interceptores o colectores. Como bien se sabe según el diseño de la red modelado por EPM, allí se deposita el caudal excedente producto de intensidades de lluvia fuertes y manera que, estos puntos son de gran relevancia a la hora de evaluar las zonas para las cuales el modelo describe inundaciones.

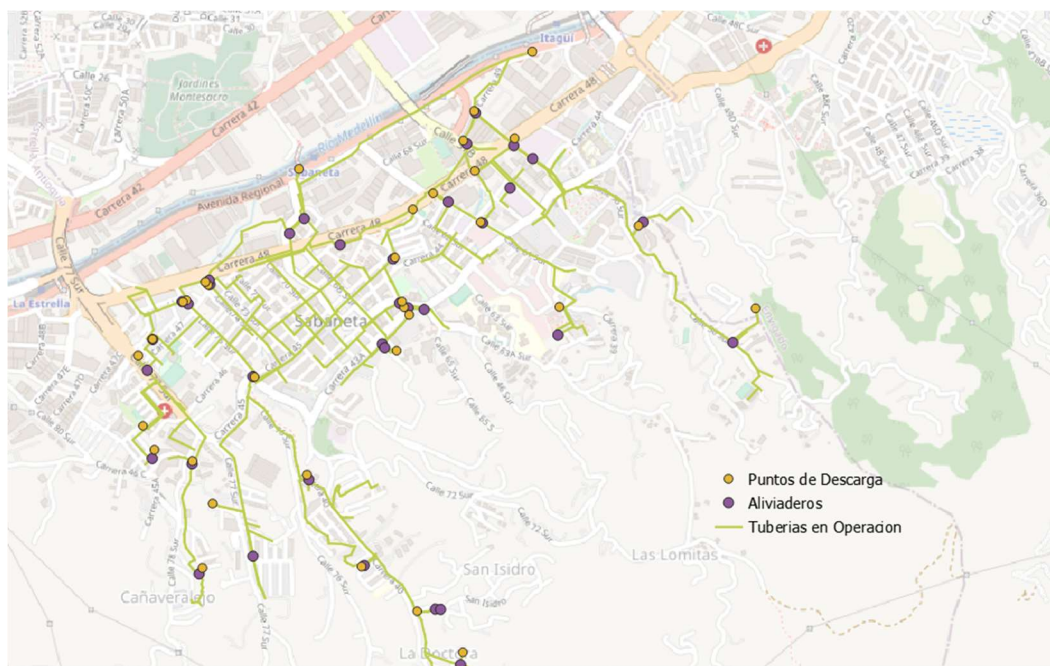


Figura 22: Mapa de Aliviaderos y Outfalls de la Red.

De igual forma, es resalta el hecho de que pese a que en cada uno de estos puntos hay una salida de caudal de la red, se idealizó como punto último la descarga 6063307 la cual cumple la tarea de depositar todo el flujo efectivo de la cuenca que llega aguas abajo al en el Río Medellín.

Cálculo de Caudal de Aguas Residuales:

El método implementado por la consultoría IDOM para obtener el caudal indexado dentro del modelo en SewerGEMS utilizó como principal insumo la base de datos de clientes de EPM de manera que, se asignó a la tubería más cercana a cada cliente un valor de caudal vertido por este.

En primer lugar, la base de datos de clientes de EPM contiene los datos de consumo de los clientes de alcantarillado, por lo que fue necesario previamente transformar los caudales de consumo en caudales vertidos. Esto se elabora una única vez a toda la base de datos de clientes para posteriormente hacer el trabajo de distribución por tuberías sobre los caudales vertidos. La obtención de caudales vertidos se obtiene aplicando el índice de agua no contabilizada (IANC) facilitado a la consultoría por EPM y posteriormente un coeficiente de retorno a la red a los caudales de consumo.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proceso de diseño del caudal residual consistió en:

- Asociar a cada cliente a una tubería en función de su localización.
- Con base en el IANC de la red se obtiene el factor de mayoración.

- Se aplicó un coeficiente de retorno inicial para todos los clientes de 0,85 por ser un valor habitual y coincidir con el recogido en la norma de diseño de alcantarillado de EPM.
- Finalmente se multiplicó el caudal consumido por el factor de mayoración y el coeficiente de retorno, obteniendo el caudal vertido.

$$Q_{Vert} = \sum Q_{Cons} * IANC * 0.85$$

10

Con el proceso descrito anteriormente se obtiene el caudal medio vertido a la red en cada tramo, pero no tiene en cuenta la distribución en el tiempo de los caudales en función de la hora del día. Para ello se incluyó en el modelo un patrón de vertimiento. De esta manera y con base en medidores de flujo permanentes actualmente en funcionamiento administrados por EPM, los cuales registran con datos horarios la variación de caudal efectivo en distintos puntos de la red de alcantarillado, se obtuvo los patrones de vertimiento implementados en el modelo.

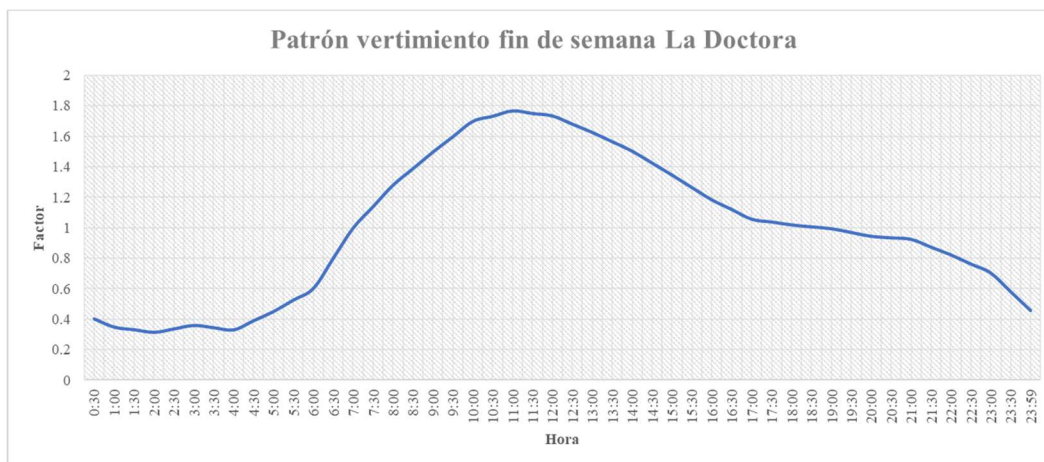


Figura 23: Gráfica de Patrón de Vertimiento Utilizado en el Modelo

De la multiplicación del caudal efectivo vertido a la red con el factor de vertimiento a lo largo del día, la consultoría IDOM modelo la demanda de alcantarillado sanitario y combinado.

Eventos de Precipitación:

Como se mencionó en la sección de Metodología, se diseñaron distintos eventos de precipitación y escenarios de evaluación con autoría tanto de la consultoría IDOM como EPM. Diferencias de intensidad y comportamiento final de la red con relación a cada una de las metodologías realizadas se analizarán posteriormente.

IDOM:

Para la evaluación de la capacidad y respuesta ante escenarios de lluvia de la Red de Alcantarillado de Sabaneta, la consultoría IDOM en el año 2019 diseñó doce escenarios de demanda al sistema.

1. Usuarios Actuales (2019) y Tiempo seco
2. Usuarios Actuales (2019) e IDF T5
3. Usuarios Actuales (2019) e IDF T10
4. Usuarios Actuales (2019) e IDF T25
5. Usuarios Proyectados a 10 años y Tiempo seco
6. Usuarios Proyectados a 10 años e IDF T5
7. Usuarios Proyectados a 10 años e IDF T10
8. Usuarios Proyectados a 10 años e IDF T25
9. Usuarios Proyectados a 30 años y Tiempo seco
10. Usuarios Proyectados a 30 años e IDF T5
11. Usuarios Proyectados a 30 años e IDF T10
12. Usuarios Proyectados a 30 años e IDF T25

Metodología de Cálculo:

El método seleccionado por la consultoría IDOM para la transformación de lluvia en escorrentía es el Método del Hidrograma Unitario del SCS contabilizando las pérdidas a través del número de curva de SCS. Los datos necesarios para la obtención del caudal de aguas lluvias son: la delimitación de unas áreas de drenaje en cada una de las cuales se aplicará el método de transformación de lluvia-escorrentía y la precipitación asociada a un determinado evento.

Áreas de Drenaje:

Teniendo en cuenta el alcance que tuvo la consultoría dentro del contrato de las redes a modelar, por medio de la herramienta GIS “Asignación Euclidiana” obtuvo las áreas de drenaje asignadas a cada tubería clasificada como de uso pluvial o combinado.

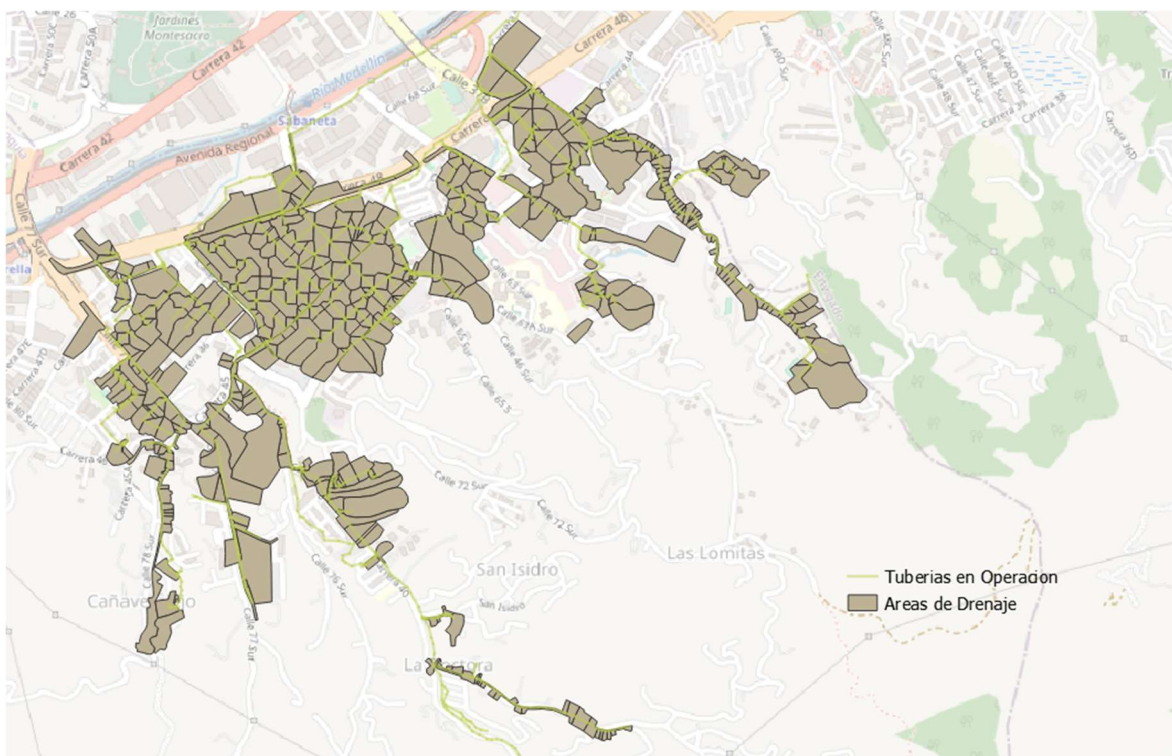


Figura 24: Áreas de Drenaje

Método de Curva:

IDOM dentro de sus trabajos efectuados para la obtención de cada uno de los escenarios de evaluación listados, partir de la información cartográfica facilitada por EPM y por medio de un trabajo manual de edición y completado, obtuvo la delimitación de los polígonos de edificaciones y vías, así como la clasificación de uso de suelo del municipio. Con esta información, y con base en la Norma de EPM para el diseño de Alcantarillado realizó la siguiente asignación de NC para cada uso de suelo.

Tabla 8: Numero de Curva Según Uso de Suelo

Clasificación	Uso de Suelo	Numero de Curva - NC-
1	Construcciones	98
2	Vías	98
3	Zona Verde	61
4	Suelo Desnudo	66

De esta manera, el valor medio ponderado que se encontró para cada superficie de drenaje según el porcentaje de uso de cada uno de los usos de suelo dentro de esta fue como se obtuvo

el valor implementado de NC para cada área de drenaje diseñada en el modelo en SewerGEMS.

Obtención de Hietogramas:

La información base usada en este proyecto está compuesta por dos estaciones pluviográficas las cuales, en consideración de la consultora IDOM, poseen el registro más cercano a los eventos de precipitación ocurridos en la para la zona de estudio. La Ayura y San Antonio de Prado junto con sus registros desde el año 1999 hasta Diciembre de 2018 son los insumos utilizados para la generación de hietogramas y curvas IDF de proyección para el primer caso de estudio.

Código	Estación	Cuenca	X	Y	Z	Periodo registro	% Datos
2701053	Alto de San Andrés	Medellín	-75.4403	6.4350	2240	1959-2018	97.9%
2701055	Aragón	Riogrande	-75.5608	6.7826	2630	1959-2018	99.7%
2701093	La Ayurá	Medellín	-75.5647	6.1661	1770	1973-2018	97.9%
2701036	Caldas	Medellín	-75.6259	6.0455	1875	1949-2018	98.7%
2701035	Chorrillos	Piedras Blancas	-75.5027	6.2963	2353	1948-2018	97.6%
2308044	Corrientes	Nare	-75.2616	6.3064	1980	1968-2018	99.9%
2308754	El Bizcocho	Guatapé	-75.0681	6.2993	1054	1971-2018	98.7%
2701059	El Chaquiro	Riogrande	-75.4905	6.7549	2750	1959-2018	98.3%
2701072	El Gómez	Riogrande	-75.6518	6.7392	2675	1966-2018	99.7%
2701514	El Mango	Nechí	-75.1493	6.8087	960	1979-2018	98.1%
2308057	El Pital	Guatapé	-74.9101	6.3033	1110	1969-2018	98.3%
1107010	El Sireno	Penderisco	-76.2543	6.3925	1210	1978-2018	98.6%
2701037	Fabricato	Medellín	-75.6003	6.3616	2422	1950-2018	99.6%
2701070	Haitón	Riogrande	-75.2747	6.6118	2120	1966-2018	99.8%
2308026	La Mosca	Negro	-75.4601	6.3062	2250	1950-2018	99.6%
1107015	La Palmera	Penderisco	-76.0302	6.3607	2506	1980-2018	95.0%
2308046	La Pradera	Guatapé	-74.9833	6.2829	1302	1968-2018	99.6%
2308022	La Severa	Nare	-75.4537	6.2594	2170	1948-2018	99.5%
2702013	La Teresita	Nechí	-75.4494	6.8596	2590	1959-2018	97.3%
2308023	Las Palmas	Negro	-75.5360	6.1522	2495	1948-2018	100.0%
2701034	Mazo	Piedras Blancas	-75.5057	6.2600	2455	1948-2018	92.3%
2701073	Medina	Riogrande	-75.5321	6.4229	2620	1967-2018	99.2%
2618008	Mesopotamia	Buey	-75.3188	5.8862	2430	1959-2018	95.0%
2702724	Miraflores	Nechí	-75.3203	6.7806	2062	1963-2018	92.1%
2702029	Montañitas	Ténche	-75.3918	6.6754	2630	1966-2018	99.7%
1107012	Pabón	Penderisco	-76.1620	6.1580	1920	1978-2018	94.7%
2308027	Rionegro La Macarena	Negro	-75.3510	6.1575	2070	1950-2018	99.9%
2701038	San Antonio de Prado	Medellín	-75.6617	6.1786	2000	1949-2018	99.4%
2701094	San Bernardo	Riogrande	-75.5739	6.8537	2740	1966-2018	98.4%
2701046	San Cristóbal	Medellín	-75.6357	6.2806	1890	1949-2018	97.7%
2701522	San Pedro	Chico	-75.5714	6.4965	2340	1950-2018	99.1%
1107009	Santa Bárbara	Penderisco	-76.0819	6.4072	2595	1978-2018	94.6%
2308024	Vasconia	Negro	-75.4789	6.2040	2510	1949-2018	99.6%
2701045	Villa Hermosa	Medellín	-75.5472	6.2579	1690	1950-2018	99.2%

Figura 25: Estaciones de Precipitación Analizadas.

De esta manera, a continuación se presenta los hietogramas de precipitación calculados por parte de la consultoría IDOM en el año 2019 para el periodo de retorno que se evaluara (Tr25 años).

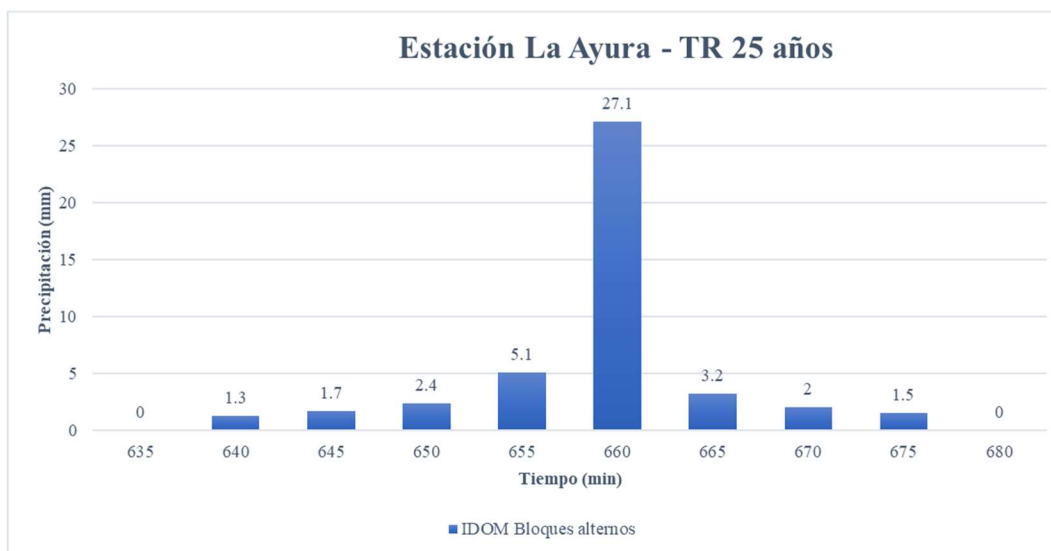


Figura 26: Hietograma de Precipitación La Ayura T25

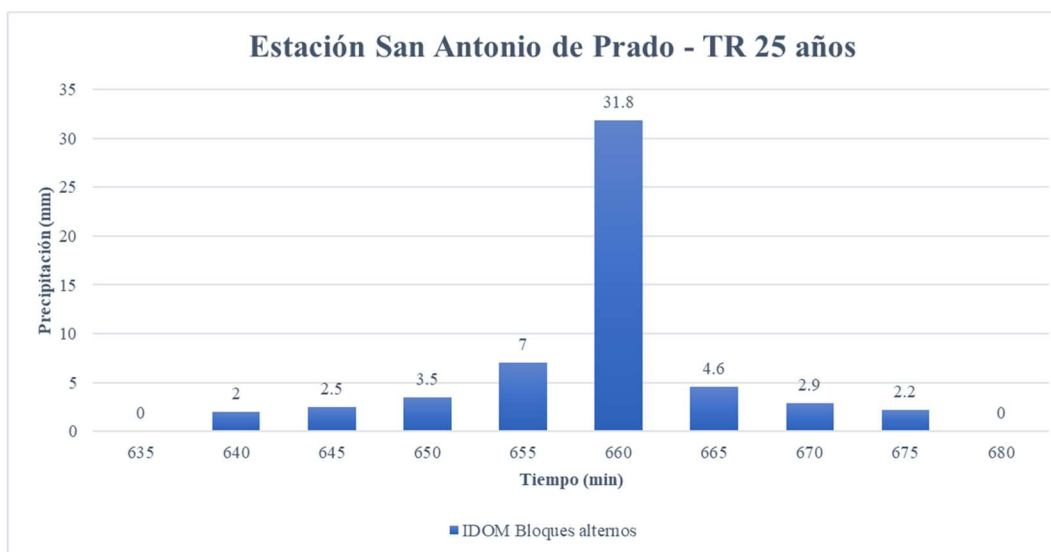


Figura 27: Hietograma de Precipitación San Antonio de Prado T25

EPM:

Por otro lado, la empresa prestadora del servicio de alcantarillado (EPM), en el año 2022 realizó una recopilación y análisis del funcionamiento de la red de alcantarillado de la cuenca La Doctora con el objetivo de identificar elementos de la infraestructura del sistema

priorizados a intervenir en los próximos años con el ánimo de prestar a la comunidad el mejor servicio posible

EPM partió del hecho del que el modelo hidráulico realizado por IDOM, el cual utilizó el método de bloques alternos para hacer la distribución de la lluvia de diseño sobredimensionó tanto los caudales de entrada a la red, así como la intensidad de los eventos de precipitación y, subestimo la respuesta del sistema de alcantarillado presente.

Teniendo en cuenta esto, Empresas Públicas de Medellín se apoyó en un estudio realizado por la Universidad EIA en el año 2014 relacionado con una metodología de cálculo de precipitaciones máximas específicamente evaluado para el Valle de Aburra. De esta manera, mediante dicho método (Curvas de Huff) y con los registros pluviográficos recolectados por estaciones pertenecientes a esta empresa, se dio a la tarea de ejecutar un nuevo cálculo y obtención de hietogramas de lluvia y eventos de precipitación.

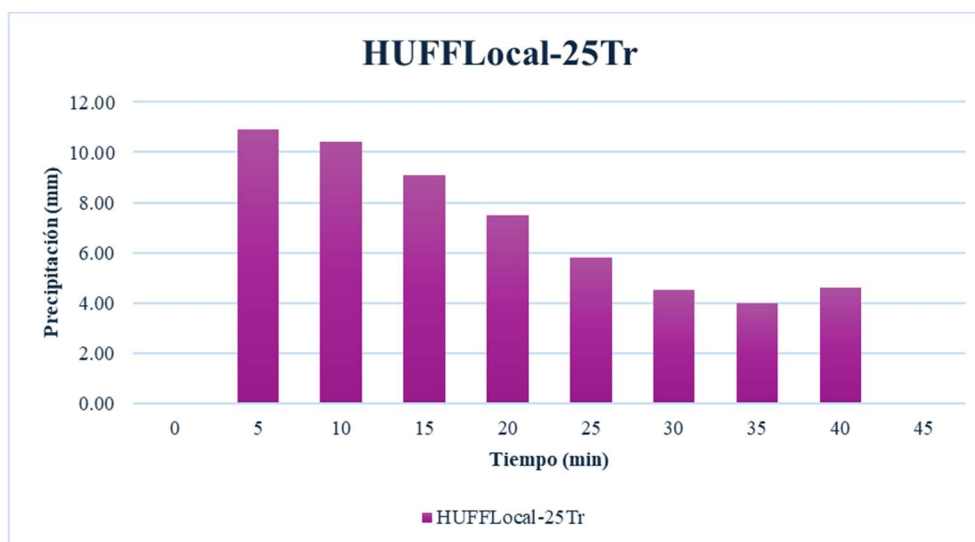


Figura 28: Hietograma de Precipitación HUFF Tr25

Cambio Climático:

De igual forma y con el ánimo de realizar el correspondiente análisis de posibles escenarios de precipitación futura en la zona de estudio, se seleccionaron cuatro eventos de precipitación en los cuales: se eligió los MCG más adecuados para el caso de estudio y la aplicación de metodologías de reducción de escala para los resultados estos, de ahí, se generaron las series definitivas para construir las curvas IDF bajo las metodologías aplicadas de Pulgarín y del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA). Por último, mediante el proceso de bloques alternos se determinaron los hietogramas de diseño afectados por el Cambio Climático que se tomaron como insumo para la evaluación de la respuesta hidráulica de la red de alcantarillado de Sabaneta. El proceso metodológico anteriormente enunciado fue realizado por parte de Rafael Andrés Muñoz como parte de su tesis de maestría de

Ingeniería Civil en la Universidad de los Andes en el año 2023 (QUINTERO, 2023) y, es allí donde se puede detallar a singularidad cada uno de los supuestos y razonamientos ejecutados para el cálculo de las curvas IDF.

En el presente trabajo únicamente se seleccionaron los cuatro casos que presentaban una intensidad de precipitación razonablemente mayor a la de sus pares pues bien, la evaluación de un escenario crítico proporciona cierto factor de seguridad ante cualquier posible subestimación de la evolución de precipitaciones futuras de diseño para estructuras hidráulicas.

Por otro lado, vale la pena mencionar que el periodo de retorno de evaluación seleccionado fue el de 25 años debido a que, en opinión de este investigador, cualquier estructura de almacenamiento de agua que requiera una inversión monetaria importante además del tiempo y espacio urbanístico, debe de tener una vida útil más allá de un cuarto de siglo; de otra manera, se podría considerar una solución a la problemática de inundación muy a mediano plazo la cual, no tendría un beneficio para si quiera una generación de la población que allí habite.

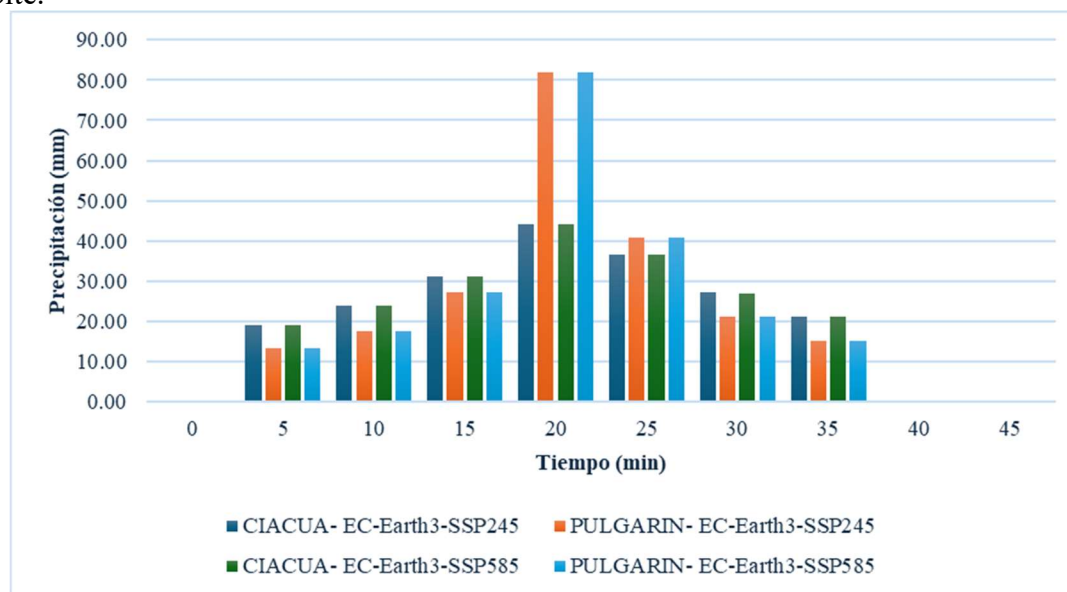


Figura 29: Hietogramas de Precipitación Cambio Climático.

Comportamiento de la Red ante los Escenarios Evaluados:

Con la intención de analizar la respuesta del sistema de alcantarillado del municipio de Sabaneta ante los escenarios de interés, se procedió a ejecutar dentro de SWMM cada uno de posibles eventos de precipitación.

De esta manera, se detallaron los nodos de la red que presentan algún grado de sobrecarga y consecuentemente inundaciones.

A continuación se muestran la ubicación de dichos nodos de acuerdo a la convención parametrizada en SWMM la cual toma como referencia el caudal pico de inundación para cada caso.

IDOM:

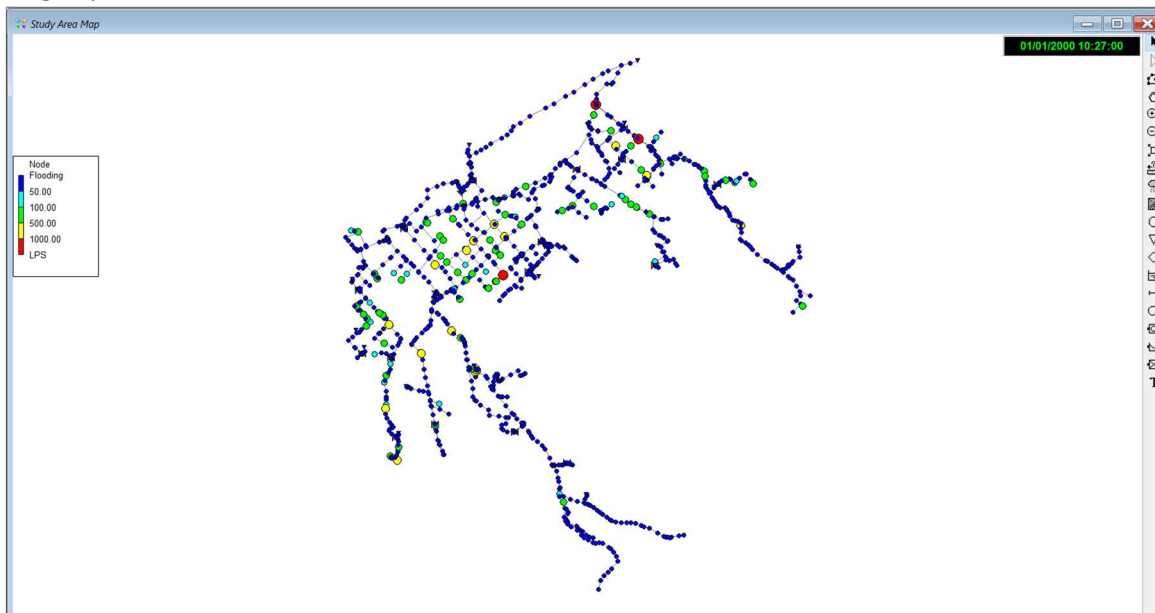


Figura 30: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - Bloques Alternos.

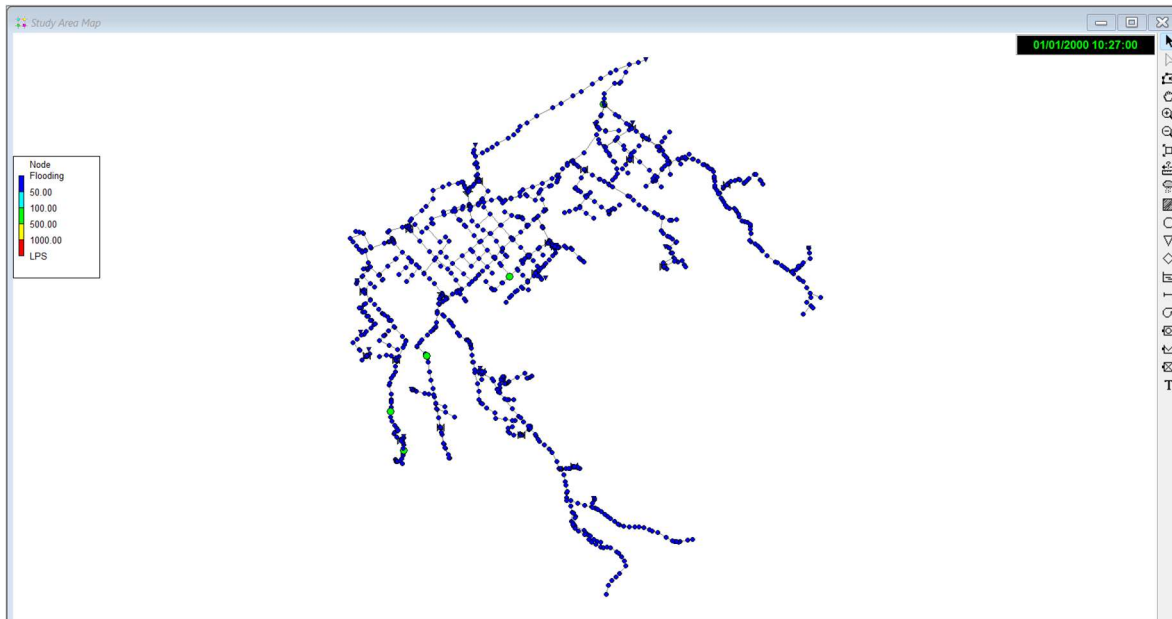
EPM:

Figura 31: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - Huff.

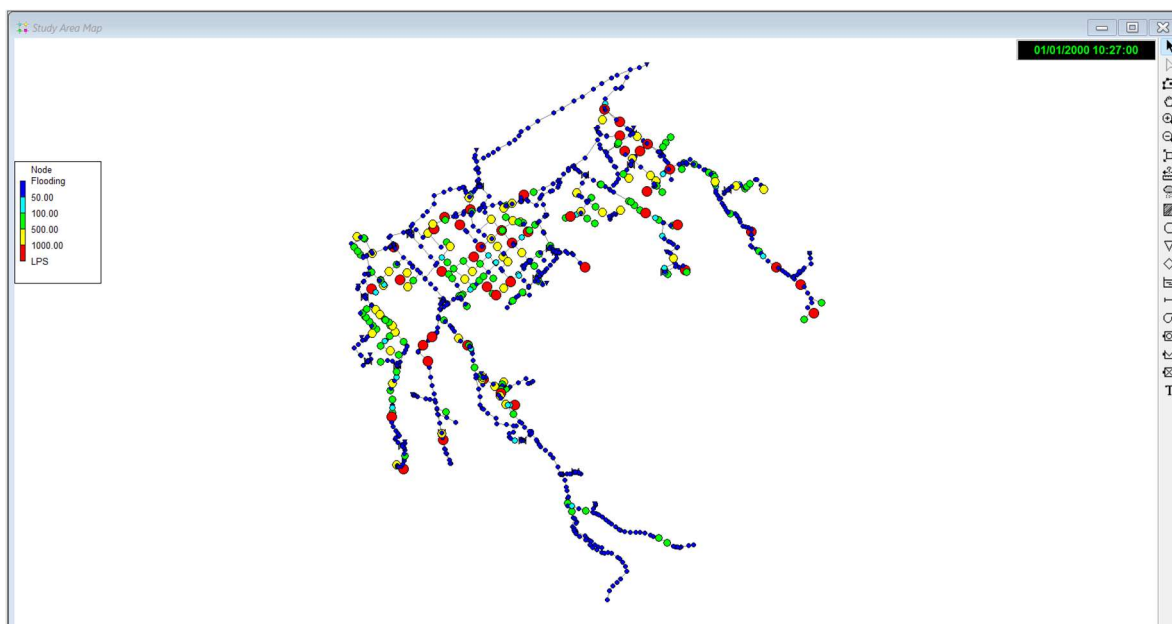
Cambio Climático:

Figura 32: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - CIACUA SSP 245.

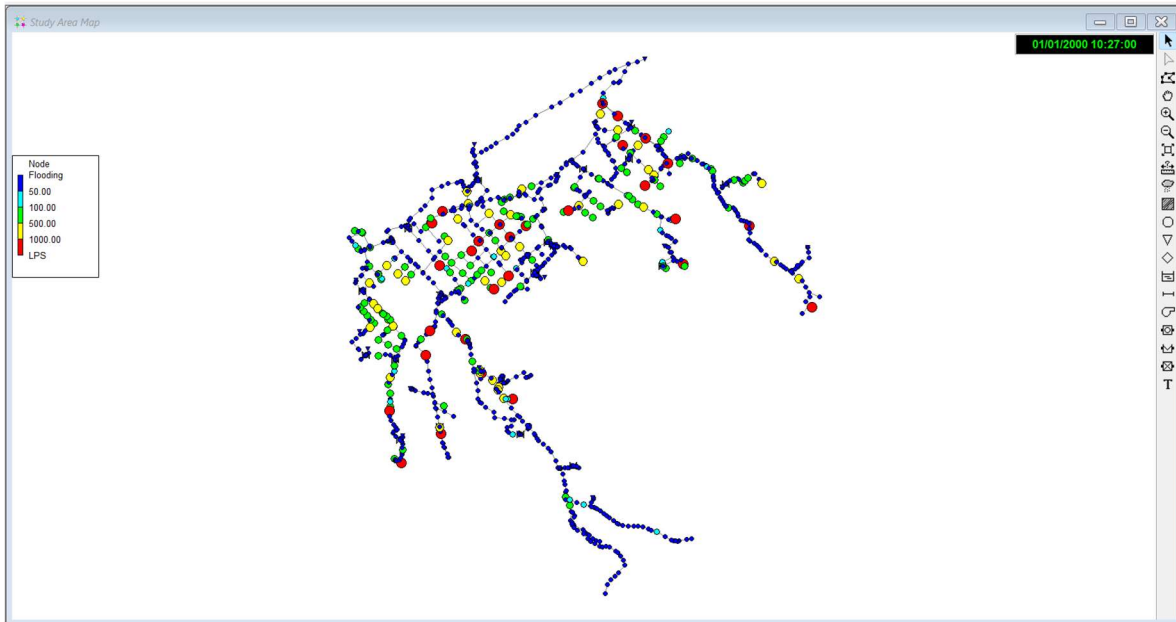


Figura 33: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - CIACUA SSP 585.

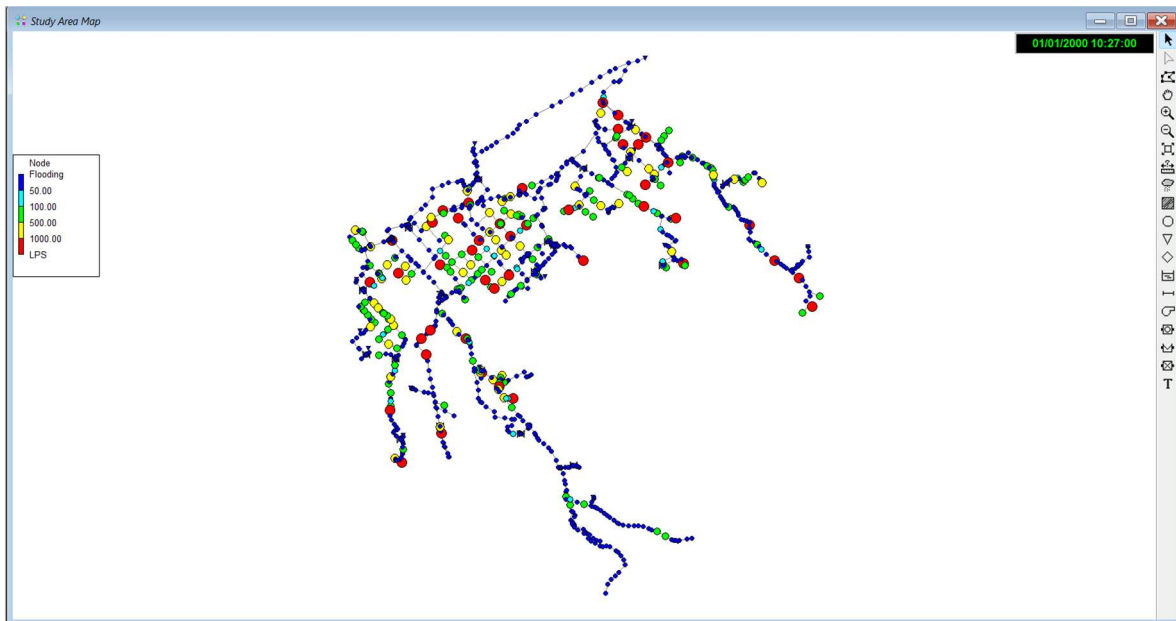


Figura 34: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios – PULGARIN SSP 245.

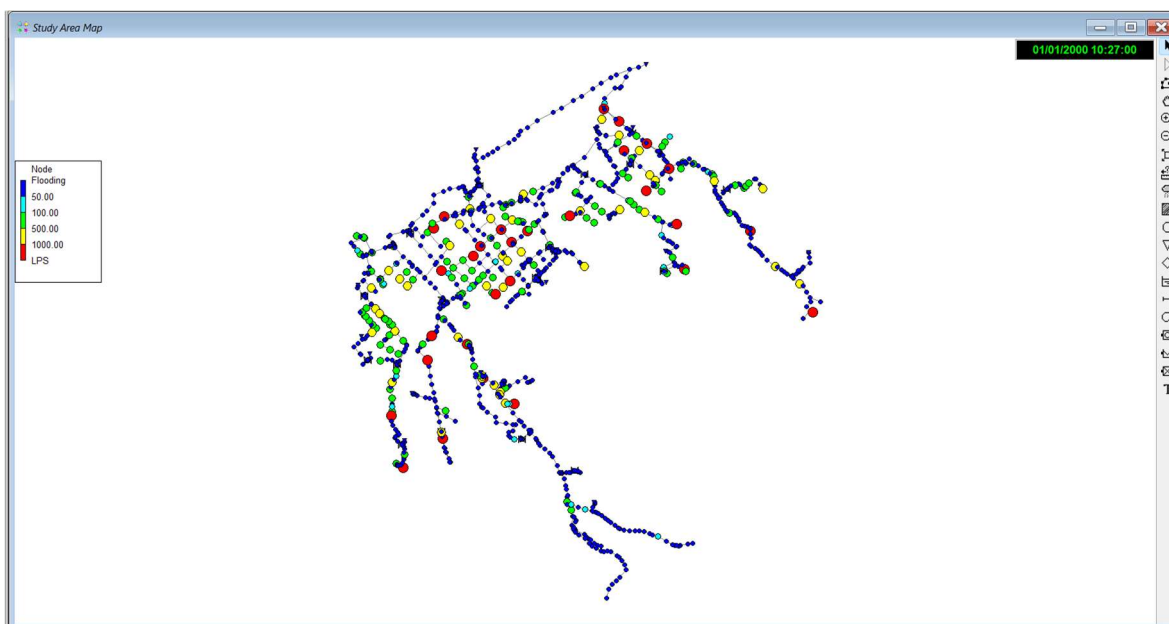


Figura 35: Comportamiento del Alcantarillado Con Alivios - PULGARIN SSP 585.

Modelación de Escenarios Evaluados:

Ahora bien, con el ánimo de realizar el diseño y ubicación óptimo de tanques de tormenta se procedió con la carga de cada uno de los escenarios modelados en la red de alcantarillado de Sabaneta a los software OptSU y OptiTank. Uno de los pormenores que se presentó en este proyecto de investigación tuvo que ver con el hecho de que tanto OPTSU como OptiTank únicamente operan con redes de alcantarillado que cuenten con exactamente un único punto de vertido o outfall. De esta manera y teniendo en cuenta que en la red de estudio se tiene un total de 32 puntos de alivio y de vertido a cuerpos de agua o colectores, se eliminaron cada una de estas estructuras para que así cada uno de estos pudiera leer y evaluar la red junto con los escenarios de estudio y ejecutar el diseño optimizado de tanques de tormenta.

Eliminación de Alivios:

Teniendo en cuenta que dado los requerimientos de los software se tuvo que eliminar las estructuras de alivio presentes en la red modelada de Sabaneta en SWMM, se debió volver a evaluar la respuesta del alcantarillado con estas modificaciones aplicadas presuponiendo que, la red de alcantarillado contará con una mayor probabilidad a sufrir inundaciones debido a que no cuenta con las estructuras de vertido y alivio de caudal que físicamente se tienen presentes.

Pese a lo anterior y teniendo en cuenta que todo diseño realizado contara con una sobrestimación del dimensionamiento de los tanques dado que la red física de estudio cuenta

con estructuras de control de caudal creciente, la evaluación del funcionamiento efectivo de estos alivios ante la supuesta reducción de caudal circulante en la red además de que, el resultado del diseño optimizado de tanques de tormenta permite contrastar la eficiencia de la implementación de estos versus los alivios con los que se cuenta, son argumento suficiente para dar validez a la ejecución de este proyecto de investigación.

A continuación se presenta en contraste el volumen de inundación resultante para cada escenario o modelo hidrológico evaluado con y sin estructuras de alivio.

Tabla 9: Resultados de Volumen de Inundación red con vs red sin alivios.

Modelo Hidrológico	Inundación con Alivios (m3)	Inundación Sin Alivios (m3)
Huff Local 2021	2645	39226
Bloques Alternos	9840	42934
CIACUA-Earth-SSP245	150297	242091
CIACUA-Earth-SSP585	154153	237820
PULGARIN-Earth-SSP245	178997	261656
PULGARIN-Earth-SSP585	178723	261656

Por otro lado, cabe resaltar que los nodos de mayor probabilidad a sufrir inundaciones son los mismos para la evaluación realizada en el modelo con y sin alivios sin embargo, a

continuación se presenta la visualización del comportamiento y respuesta de la red de alcantarillado en el formato en el que no se cuenta con las estructuras de alivio:

IDOM:

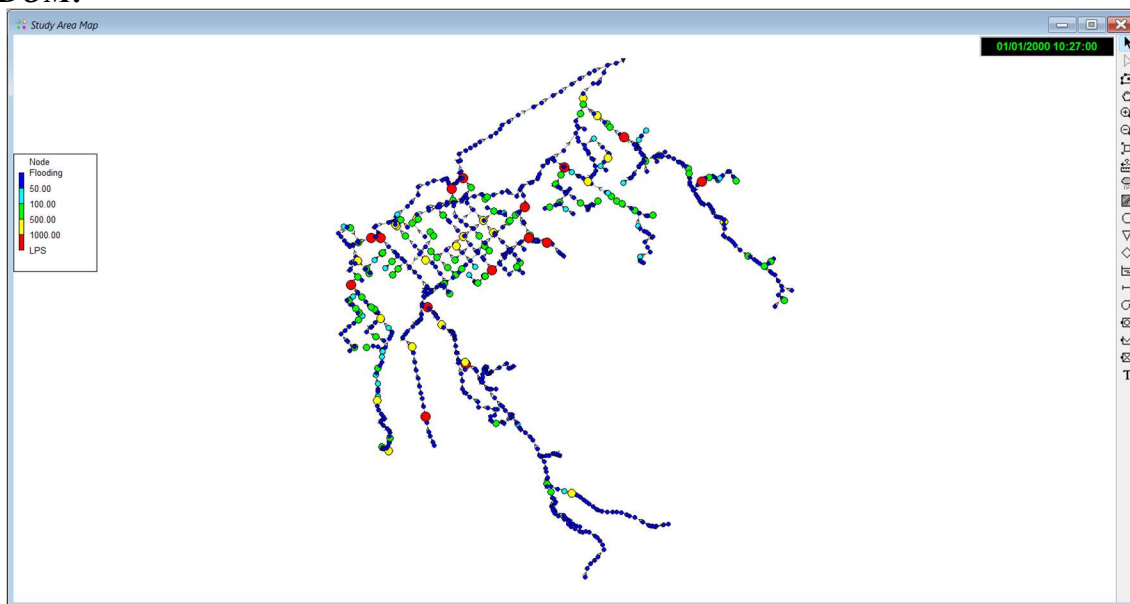


Figura 36: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - Bloques Alternos.

EPM:

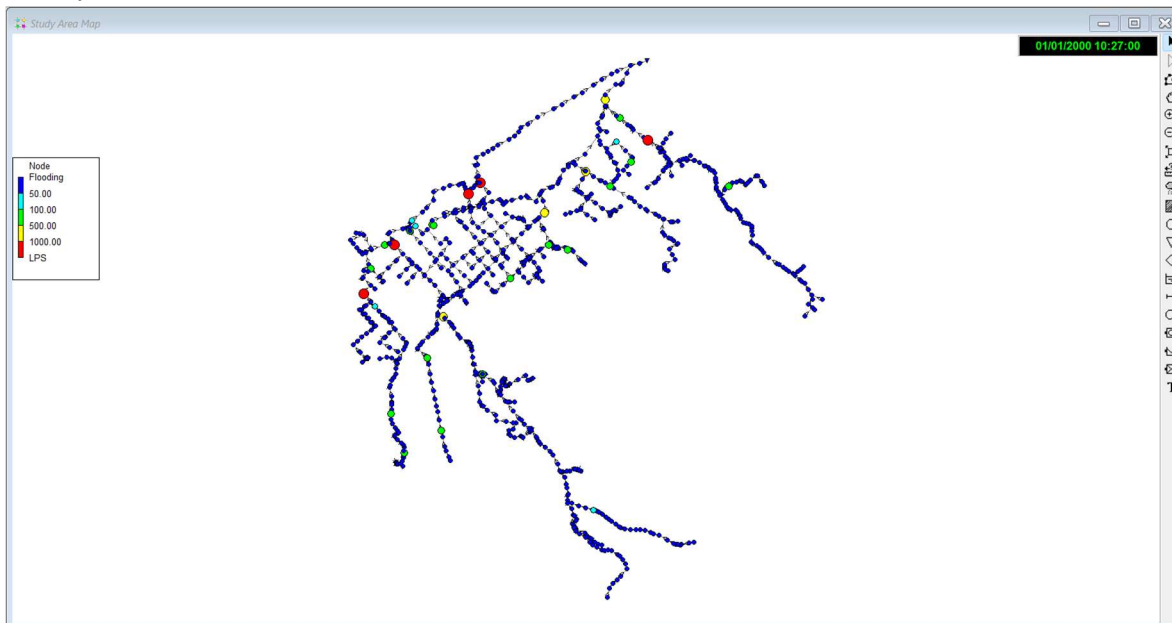


Figura 37: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - Huff.

Cambio Climático:

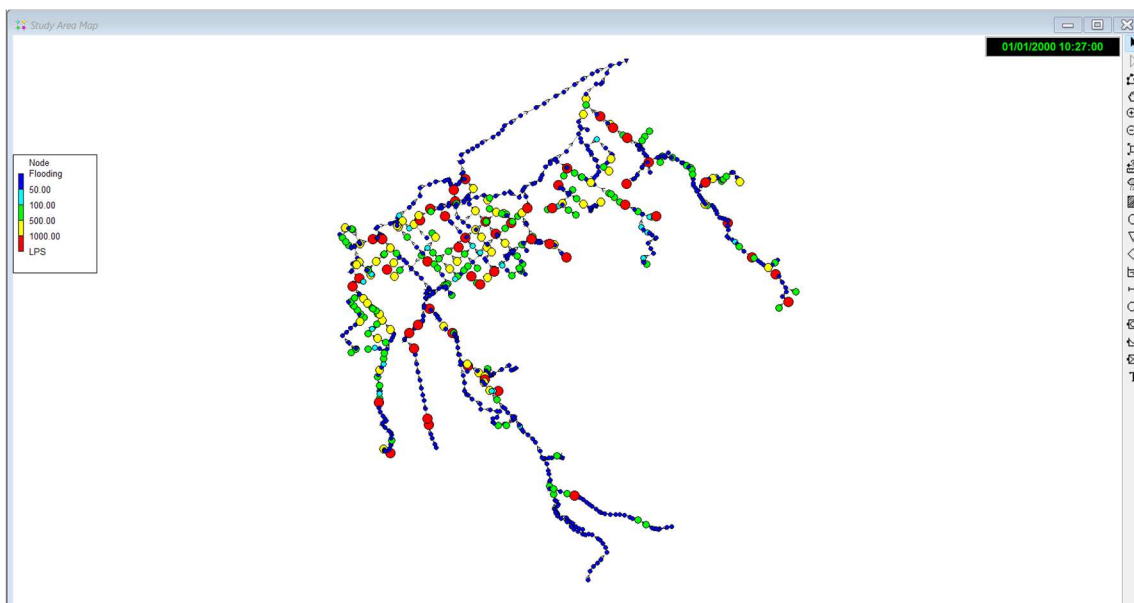


Figura 38: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - CIACUA SSP 245.

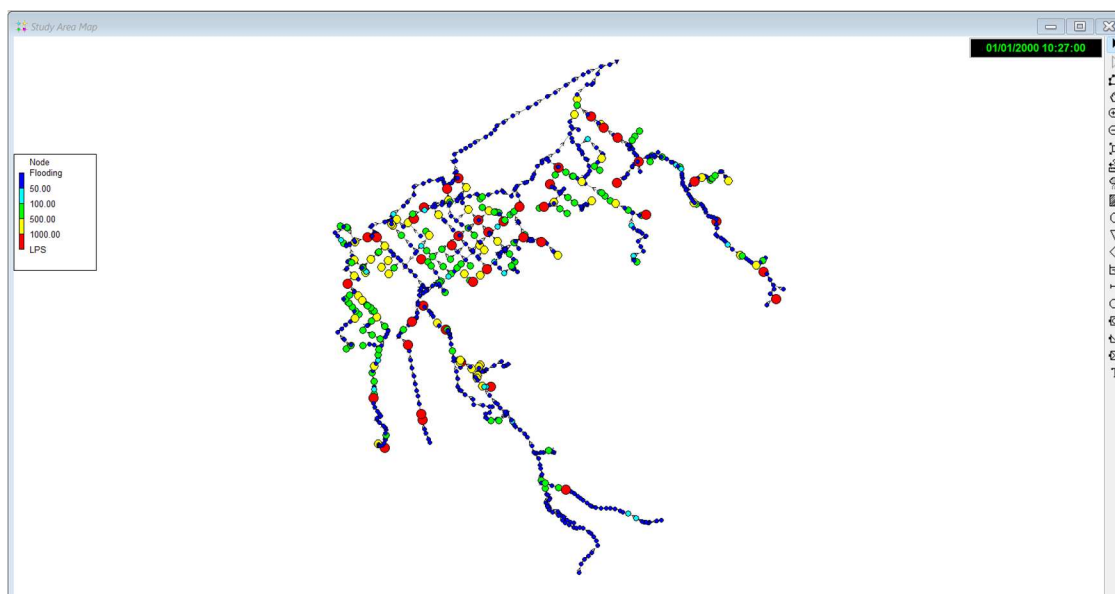


Figura 39: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - CIACUA SSP 585.

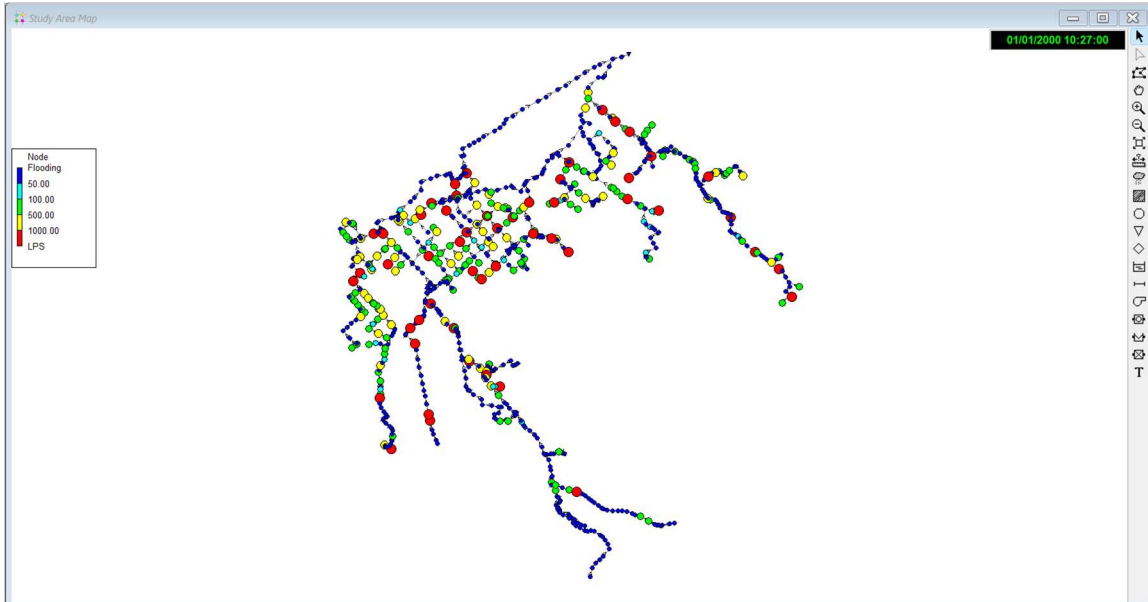


Figura 40: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - PULGARIN SSP 245.

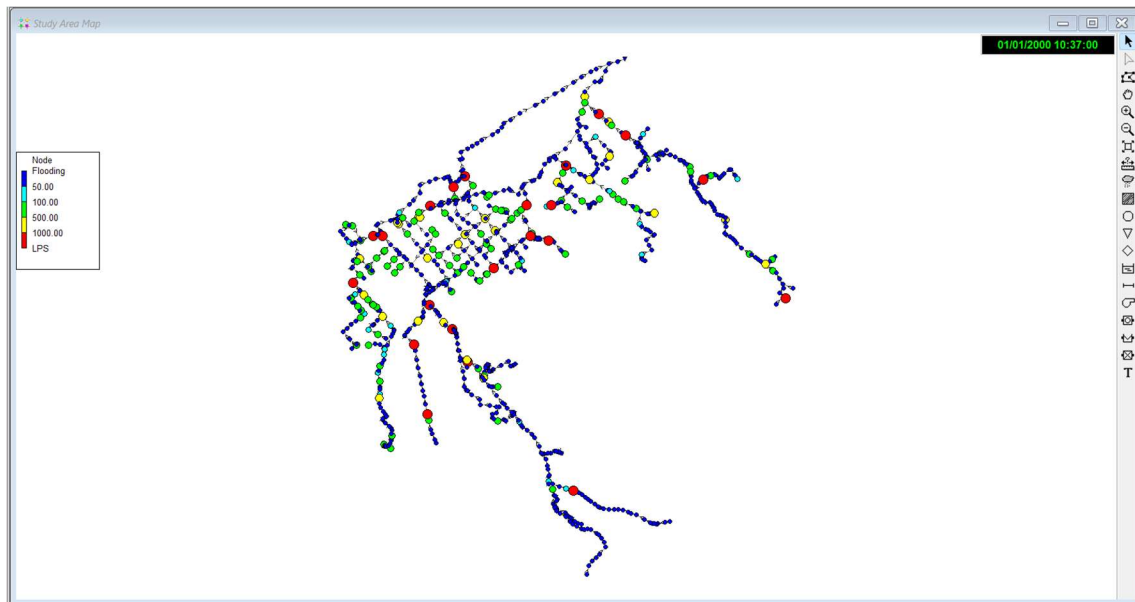


Figura 41: Comportamiento del Alcantarillado Sin Alivios - PULGARIN SSP 585.

Calculo 24H:

Por otro lado, la evaluación de cada uno de los escenarios ocurre bajo un periodo de 24 horas dado que la carga sanitaria que cada usuario registra tiene lugar bajo este periodo de tiempo. El evento de precipitación se carga desde las 10:00 am debido a que es allí donde tendrá lugar la máxima demanda horaria sanitaria calculada para Sabaneta. De esta manera se evalúa el caso hipotético donde el aguacero de diseño ocurre justo al mismo tiempo que la máxima demanda sanitaria de alcantarillado, en otras palabras, el evento de máxima demanda posible para la red de estudio.

A continuación se muestra el hidrograma de salida de la red, lo anterior se presenta con el ánimo ilustrar la variación de caudal presente en la red de alcantarillado e identificar el caudal pico y la hora en la que este ocurre para cada modelo hidrológico.

Calculo 6H:

Por otro lado, tras haber realizado varios intentos por operar los software con las modelaciones de 24 horas se llegó a la conclusión de que el costo computacional referente al tiempo para el cual cada uno lograba llegar a una convergencia en su algoritmo y en consecuencia, encontrar una localización de tanques de tormenta optima estaba tomando demasiado (más de un mes). De esta manera, se decidió reducir el periodo de análisis en SWMM a un total de 6 horas, focalizado de 9:00 am a 3:00 pm. En otras palabras, se centró el interés en la franja horaria en la cual ocurre el evento de precipitación y en un tiempo posterior considerando la respuesta del alcantarillado a este pico de demanda.

Cabe mencionar que el comportamiento hidráulico de 6 horas difiere un poco con relación a la modelación de 24 horas debido a la carga de aguas residuales presente en el análisis de 24 horas, sin embargo, se logró modelar un comportamiento hidráulico en la red muy similar.

A continuación se muestra la comparación de hidrogramas de salida en la red de sabaneta para cada modelo hidrológico (24h vs 6 h).

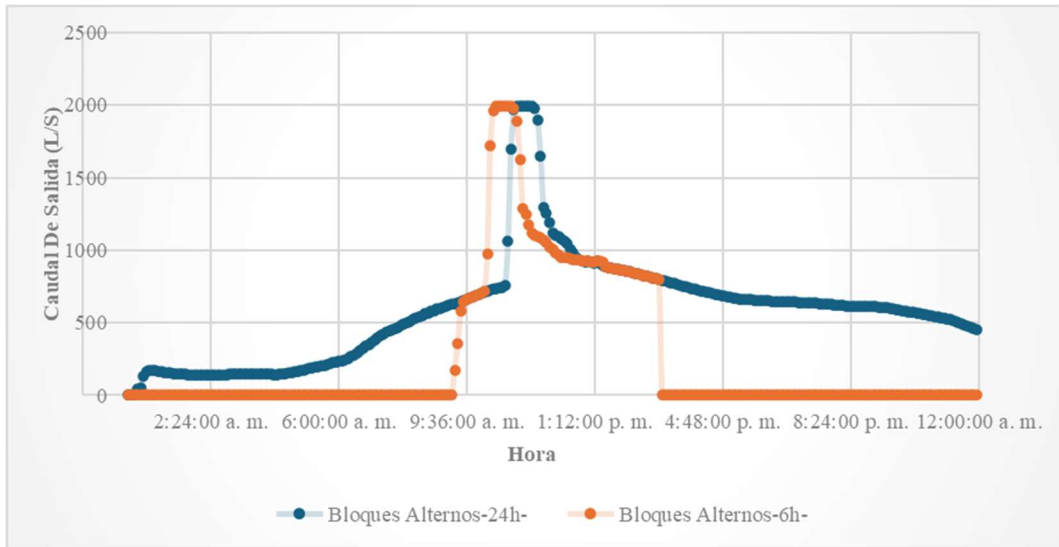


Figura 42: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - Bloques Alternos.

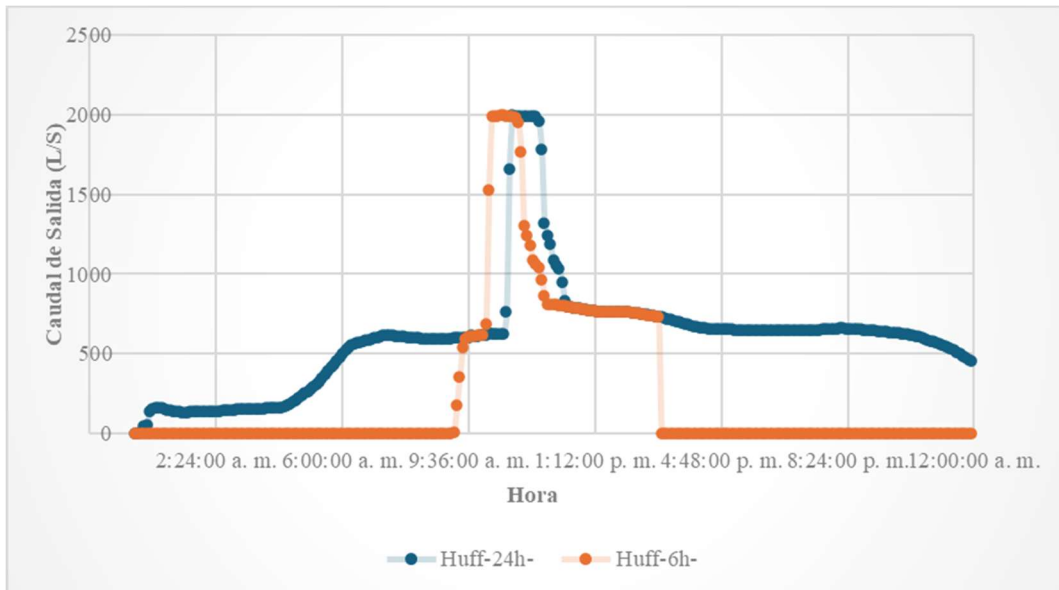


Figura 43: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - Huff.

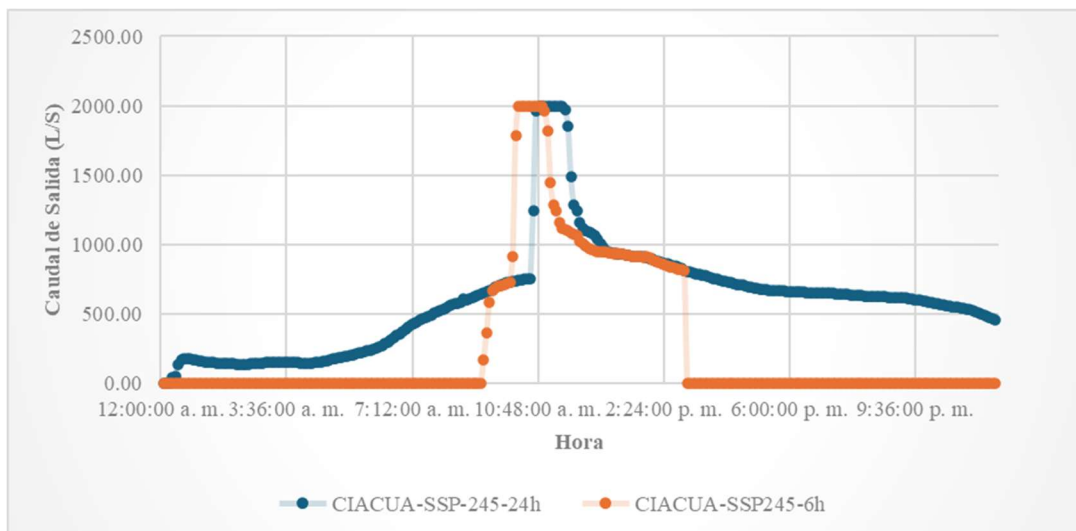


Figura 44: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - CIACUA SSP 245.

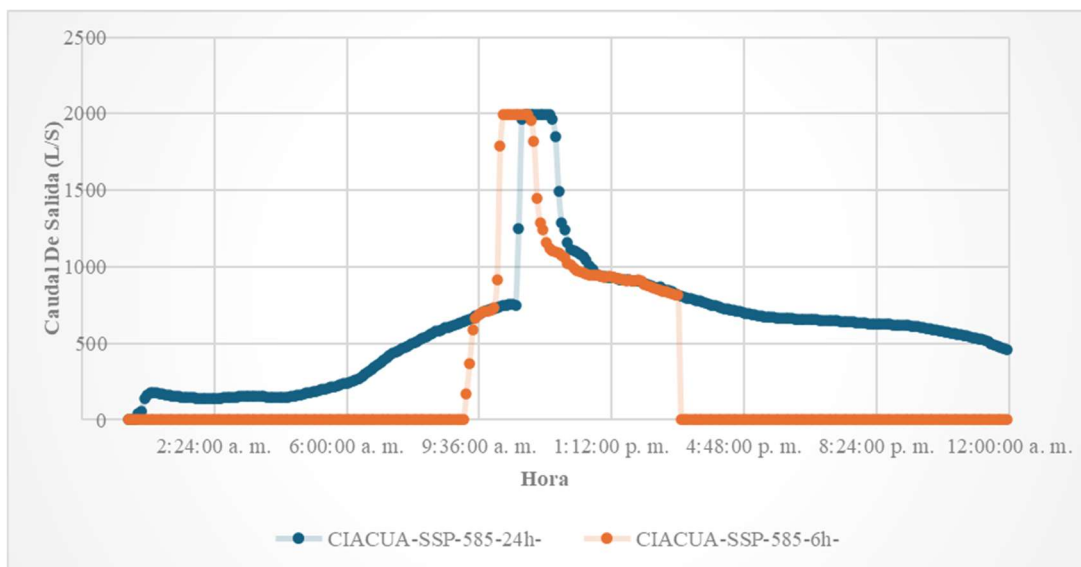


Figura 45: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - CIACUA SSP 585.

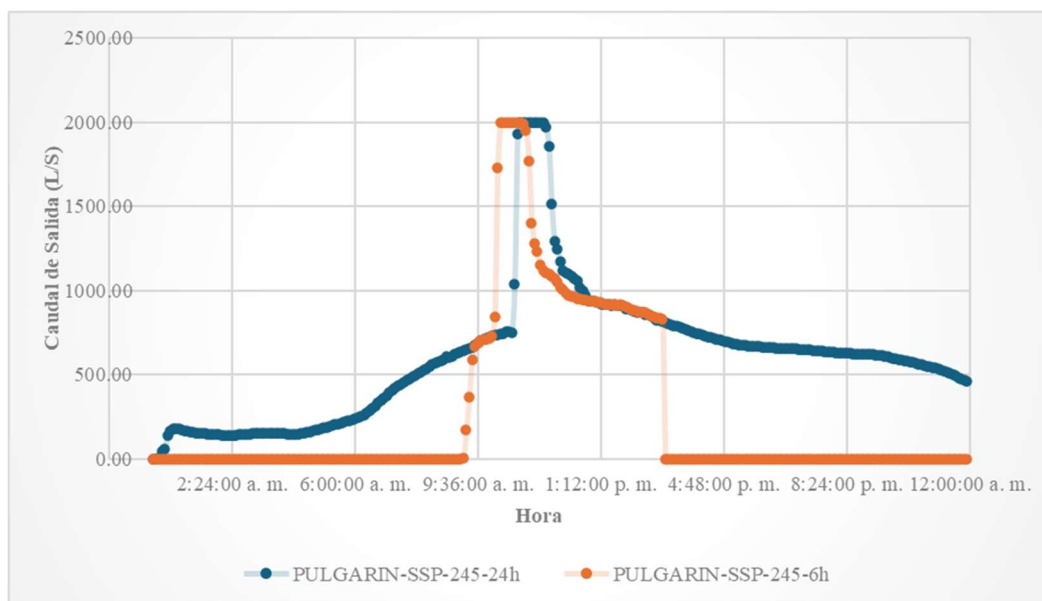


Figura 46: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - PULGARIN 245.

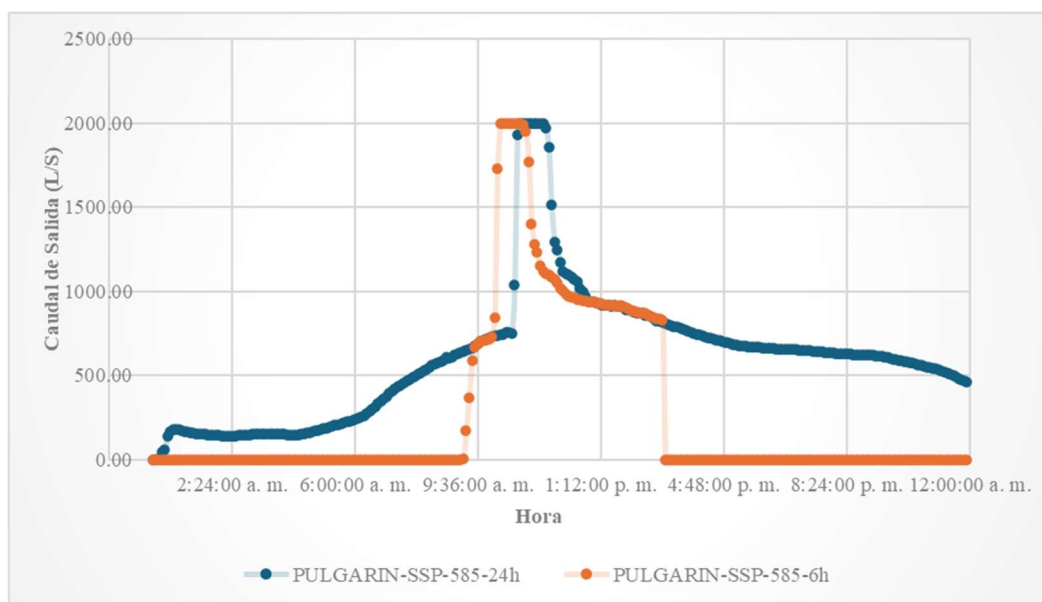


Figura 47: Comparación de Hidrogramas de Salida de la Red 24 Horas vs 6 Horas - PULGARIN 585.

Optimización con control Hidráulico:

Como se indicó en el manual de usuario del programa OptSU, es necesario contar con caídas en los nudos potenciales con el fin de poder instalar tanques de tormenta.

Desafortunadamente, la red de alcantarillado física de Sabaneta no cuenta con cámaras con diferencias de nivel lo suficientemente considerables las cuales permitan contemplar a estas como nudos potenciales. Teniendo en cuenta lo anterior, los nudos seleccionados fueron modificados con el ánimo de generar caídas según lo permitía la topografía del lugar y de esta manera, se pudo modelar un total de 6 caídas de manera que la diferencia de nivel generada fuese la suficiente como para que, en dado caso, se convirtiera este nudo en un tanque de tormenta el cual lograra almacenar una cantidad de agua importante.

A continuación se presenta ID de los nodos seleccionados junto con los parámetros físicos de caída que se logró modelar según la topografía del lugar.

Tabla 10: OPTSU - Parámetros físicos de los Posibles Tanques de Tormenta.

Tanque ID	ÁREA (m²)	Altura Máxima (m)
8676894	1000	5.8
857672	1000	5
9437423	1000	5
9318700	1000	5
6064077	1000	5
6067371	1000	3.5

Tabla 11: OPTSU - Visualización de la Localización de los Posibles Tanques a Diseñar.



La localización definitiva y diseño óptimo de los tanques de tormenta se realizó únicamente con un peso de inundación de 100. Lo anterior se ejecutó debido al tamaño de la red pues bien, ya que el tiempo computacional empleado en las simulaciones fue en promedio de 2 semanas para los escenarios de 24 horas y de 5 días para los de 6 horas, mantener el costo asociado al volumen de inundación constante reducía tanto los escenarios a evaluar como el tiempo y costo computacional asociado a este trabajo.

Por otro lado, no se realizaron cambios en los parámetros por defecto de OptSU ($a = 0.5$, $l = 45$, $g = 0.25$, $s = 15$). En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos al utilizar el programa OptSU para localizar los tanques de tormenta en la red de Sabaneta en cada uno de los casos descritos anteriormente.

Caso 1: Peso de Inundación de 100 - Simulación 24 Horas.

Tabla 12: Resultados OptSU - 24H

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
Huff Local 2021	39226	6	29300	37349	4.7%

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
Bloques Alternos	42934	6	29300	39702	7.5%
CIACUA-Earth-SSP245	242091	6	29300	237220	2%
CIACUA-Earth-SSP585	237820	6	29300	236298	0.6%
PULGARIN-Earth-SSP245	261656	6	29300	255028	2.53%
PULGARIN-Earth-SSP585	261656	6	29300	255028	2.53%

En la sección de Anexos se muestra la ubicación y el volumen de los tanques de tormenta obtenidos con el programa OptSU para cada modelo hidrológico corrido por el periodo de 24 horas. Los tanques de tormenta están delimitados por recuadros negros y en su interior se encuentra el valor del volumen de cada uno. De igual forma, se muestra la inundación marcada con círculos azules en cada uno de los nudos. Aunque en estos casos solo se está indicando en las figuras el volumen de los tanques, es posible pedirle al programa que muestre el tamaño del orificio de cada tanque y el valor de la inundación en cada nudo, sin embargo, por comodidad del lector estas imágenes se omiten.

Caso 2: Peso de Inundación de 100 - Simulación 6 Horas.

Tabla 13: Resultados OptSU - 6H

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
Huff Local 2021	39226	6	29300	37994	3.1%

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
Bloques Alternos	42934	6	29300	39689	7.5%
CIACUA-Earth-SSP245	242091	6	29300	237611	1.8%
CIACUA-Earth-SSP585	237820	6	29300	237178	0.2%
PULGARIN-Earth-SSP245	261656	6	29300	255114	2.5%
PULGARIN-Earth-SSP585	261656	6	29300	255114	2.5%

De igual forma, en la sección de Anexos también se puede detallar la ubicación y el volumen de los tanques de tormenta obtenidos con el programa OptSU para cada modelo hidrológico corrido por el periodo de 6 horas. Las mismas convenciones ya mencionadas aplican para estos resultados gráficos.

Caso 3: Peso de Inundación de 100 - Simulación 6 Horas con aumento de área disponible de tanques.

Por otro lado, con el ánimo de evaluar la dependencia del volumen de inundación final con relación al área máxima disponible parametrizada para cada tanque de almacenamiento, se diseñó para cada uno de los modelos hidrológicos y por el periodo de 6 horas una red para la cual el área disponible de construcción de cada tanque de tormenta pasaba de 1000 m² a 2000 m². A continuación se muestra en detalle los parámetros de cada uno de los tanques y el resultado en la disminución del volumen de inundación final para cada modelo hidrológico.

Tabla 14: OPTSU - Caso 3 Ampliación del Área en Planta Máxima Disponible para los Tanques de Tormenta a Diseñar.

Tanque ID	ÁREA (m2)	Altura Máxima (m)
8676894	2000	5.8

Tanque ID	ÁREA (m2)	Altura Máxima (m)
857672	2000	5
9437423	2000	5
9318700	2000	5
6064077	2000	5
6067371	2000	3.5

De igual forma, en la sección de Anexos también se pudo detallar la ubicación y el volumen de los tanques de tormenta obtenidos con el programa OptSU para cada modelo hidrológico corrido por el periodo de 6 horas con el aumento en el área en planta disponible de construcción para los tanques de tormenta. Las mismas convenciones ya mencionadas aplican para estos resultados gráficos.

Tabla 15: Resultados OptSU - 6H - Doble de Área

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
Huff Local 2021	39226	6	58600	37451	4.52%
Bloques Alternos	42934	6	58600	39268	8.53%
CIACUA-Earth-SSP245	242091	6	58600	237211	2.01%
CIACUA-Earth-SSP585	237820	6	58600	236816	0.4%

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	% de Reducción
PULGARIN-Earth-SSP245	261656	6	58600	254501	2.7%
PULGARIN-Earth-SSP585	261656	6	58600	254501	2.7%

De manera general, los resultados obtenidos no muestran una buena reducción en la inundación pues bien, esta varía entre el 0.2% hasta el 8.5% con referencia al volumen inundación sin emplear alguno de los tanques de tormenta.

Si se compara los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas por el periodo de 24 horas contra las de 6 horas, se encuentra que los porcentajes de reducción de inundación son similares lo que quiere decir que la simplificación referente al tiempo de ocurrencia de cada escenario se realizó con éxito. Por otro lado, si bien el aumento del área en planta disponible para la modelación óptima de cada uno de los tanques de tormenta repercutió en un porcentaje de reducción de inundación mayor para cada modelo hidrológico, la magnitud de este porcentaje sigue siendo insignificante teniendo en cuenta los volúmenes de inundación final que se siguen presentando para cada caso.

Optimización sin control Hidráulico:

La optimización por medio de OptiTank se realizó para un único periodo el cual fue el de 6 horas. La optimización, selección y diseño de tanques en la red de cada uno de los modelos hidrológicos se parametrizó únicamente para los 27 nudos que, según SWMM, presentaban una mayor inundación a lo largo del tiempo transcurrido de evaluación. Las acciones anteriormente descritas se realizaron tras haber ejecutado varias pruebas con periodos de evaluación de 24 horas y la posibilidad de selección de cualquier nudo de la red como posible tanque de tormenta. De esta manera, se pudo minimizar el tiempo que el algoritmo de optimización de este software empleaba para converger a un diseño óptimo en el que al mínimo costo el diseño permitirá el mayor porcentaje de reducción de inundación.

Por otro lado, la optimización se realizó utilizando la función de costo adimensional para la inundación y los siguientes parámetros del pseudo algoritmo genético:

- Probabilidad de mutación: 0.015
- Probabilidad de cruce: 0.5
- Tamaño de la población: 50

- Generaciones sin cambio: 25

A continuación se presentan los nodos seleccionados como candidatos a convertir en tanques de tormenta para la red de alcantarillado de Sabaneta.

Tabla 16: Nodos seleccionados como potenciales convertirse en Tanques de Tormenta

Nodo	Nodo
8641367_c1	8562414_NT1
6060083_NT1	8676897
9137607	9365647
6062314	8641368
8576963	9391387
9399613	9372984
9036712	6062230_NT1
6066224	8566314_NT1
6065809	8549087
8583335	6066073_NT2
6066044	6063739
6073047	6063754
9280809_NT1	6064269
6062398	6061488

Caso 1: Tanques de Tormenta Únicamente en Nodos Potenciales por el periodo de 6 horas.

En la siguiente tabla se resume los resultados obtenidos al utilizar OptiTank para localizar los tanques de tormenta en la red de Sabaneta en el caso en el que se seleccionó la posible

localización de estos y sin la posibilidad de ejecutar alguna rehabilitación de tuberías en la red. Esto en un periodo de evaluación de 6 horas.

Tabla 17: Resultados de diseño y localización óptima de Tanques de Tormenta - OptiTank.

Modelo Hidrológico	Volumen Inicial de Inundación (m3)	Nudos Cambiados	Volumen de Tanques (m3)	Volumen de Inundación Final (m3)	Nodos Inundados	% de Reducción de Inundación
Huff Local 2021	39226	17	11221	33998	61	13.32%
Bloques Alternos	42934	15	12379	33106	54	22.8%
CIACUA-Earth-SSP245	242091	17	16813	222482	54	8%
CIACUA-Earth-SSP585	237820	18	16521	221392	63	6.9%
PULGARIN-Earth-SSP245	261656	24	24087	233374	59	10.8%
PULGARIN-Earth-SSP585	261656	14	16411	246506	62	5.7%

En la sección de Anexos se muestra la localización de los tanques en SWMM la cual propone OptiTank en el escenario corrido para cada uno de los modelados hidrológicos. Este archivo es generado por el programa OptiTank una vez se termina la simulación de cada escenario. Para conocer las propiedades de los tanques simplemente se debe hacer doble clic sobre el tanque deseado. Este archivo es de gran utilidad porque otorga mayor flexibilidad al permitir realizar nuevas simulaciones cambiando algunos parámetros en la red, por ejemplo, el hietograma de precipitación o el diámetro de alguna tubería.

Los resultados obtenidos no muestran una reducción significativa en la inundación pues bien, la mejor solución describe una reducción en el volumen de 22.8% (Modelo Hidrológico de Bloques Alternos). Si se comparan los resultados de los volúmenes de inundación final de cada uno de los modelos hidrológicos se puede detallar que pese a que hay un alivio en el volumen de sobrecarga en las cámaras, tanto el número de nudos como la totalidad del

volumen de inundación final sigue siendo considerable para todos los casos de estudio. De igual forma, es evidente que los escenarios en los que se encuentra la mayor reducción son para los modelos hidrológicos que causan un menor volumen de inundación (Bloques Alternos y Huff) lo que hace pensar que: si bien se dio a elección de posible localización de tanques de tormenta un número considerable de nudos, puede que si lo que se quiere es lograr una mayor reducción en el volumen de inundación final para los casos más críticos, haga falta un mayor número de tanques de tormenta por diseñar en la red pues los disponibles no están en la capacidad de dar respuesta a las demandas de caudal solicitadas.

Análisis de Resultados:

- Los resultados relacionados con la ubicación de tanques de tormenta por medio de la implementación de la herramienta OptSU indican que se requiere de una capacidad mayor de tanques o más bien un aumento en el número de estos si lo que se quiere es apaciguar en mayor medida los eventos de inundaciones modelados para Sabaneta. El diseño de estructuras de almacenamiento de agua parametrizado por la altura máxima disponible de acuerdo con la topografía del lugar (caída en las cámaras) limita capacidad de almacenamiento de cada uno de estos tanques y por ende los resultados en la reducción de inundación según lo escenarios planteados son poco eficientes.
- De igual forma, al aumento del área en planta disponible para cada uno de los tanques dio como resultado una disminución en el volumen de inundación final para cada modelo hidrológico. Sin embargo, esta estrategia no se vio reflejada como posible solución efectiva para sobrellevar la acumulación de agua en la red de alcantarillado. Valores de entre el 0.4% y el 8.2% de reducción de inundación dan a entender que la inversión monetaria asociada a la construcción de estos tanques se vería reflejada más como un gasto innecesario al no poder dar solución con la problemática presente.
- Por otro lado, el dimensionamiento de tanques de tormenta haciendo uso del software OptiTank logro dar como resultado un porcentaje de reducción de las inundaciones en Sabaneta de mayor magnitud que OptSU. Sin embargo, el porcentaje de reducción de inundación resultante varía entre el 5.8% y 22.8 %, cosa que pese al aumento logrado, objetivamente hace pensar que la instalación de estos tanques de almacenamiento en la red de estudio puede que no sea la mejor solución ante posibles inundaciones producto de eventos de precipitación futura dado los volúmenes finales registrados.
- El número de tanques diseñados por OptiTank es variable entre 14 y 24, cada uno manteniendo la altura de caída con la que dispone sus cámaras. Lo anterior toma relevancia si se tiene en cuenta que la capacidad de almacenamiento para este software sigue limitada a la altura disponible con la que cuenta cada cámara y en consecuencia, los mayores porcentajes de reducción en la inundación final se ven determinados por la variación del área en plata disponible y el número y localización óptima de los tanques que se puede encontrar en la red.

- De igual forma, los volúmenes de inundaciones finales resultantes en OptiTank manejan magnitudes de gran relevancia. Si bien para todos los casos se cree haya un sobredimensionamiento de las inundaciones resultantes producto de la extracción de las redes de alivio del alcantarillado estudiado, la instalación de hasta 24 tanques de tormenta (caso PULGARIN-SSP-245) no proporcionan magnitudes de aceptables de volumen de inundación para la red de alcantarillado de un municipio como Sabaneta.
- Al contrastar los resultados de los mayores porcentajes de reducción de inundación proporcionados por OPTiTank vs los presentes en el escenario para el cual la red de Sabaneta cuenta con sus 32 alivios, para todos los modelos hidrológicos evaluados los menores volúmenes de inundación se consiguen con la infraestructura de alivios y descarga en cuerpos receptores que con la instalación de tanques de tormenta. Lo anterior puede significar que la instalación de estructuras de almacenamiento de agua puede no ser el método más efectivo para atacar los posibles eventos de sobrecarga en la red de alcantarillado causado por escenarios de precipitación futura pues bien, tanto la topografía como el diseño y distribución de cámaras en la red de alcantarillado no permiten que el almacenamiento de caudal circulante en un número considerable de tanques sea una solución efectiva contra esta problemática.
- Por lado, cabe destacar el hecho de que al evaluar menores volúmenes y menores intensidades de precipitación los valores de reducción de inundación aumentan (ver Tabla 16). Los modelos hidrológicos de Huff y Bloques Alternos con aguaceros de diseño de 45 minutos permiten que el pico de caudal no se alcance en un periodo corto de tiempo y, combinado con el hecho de que el volumen de agua lluvia es menor que en los modelos de cambio climático, surge la idea de que la instalación de tanques de tormenta puede dar mejores resultados con aguaceros de mayor tiempo de duración y con volumen de escorrentía mucho menores.

Conclusiones:

- En trabajos anteriores a este en los cuales se utilizó OptSU se encontró que el software funciona muy bien en redes con altas pendientes pero, en redes planas donde la caída en las cámaras es muy pequeña o inexistente no es conveniente usarlo. Para el caso la red de alcantarillado de Sabaneta en la cual se cuenta con partes de alta y baja pendiente, el distanciamiento corto entre cámaras y la concentración de mayores volúmenes de agua en las zonas urbanas y con pendiente baja fue un limitante a la hora de modelar y diseñar tanques de tormenta óptimos que dieran solución ante los eventos de inundaciones producidos.
- El costo computacional asociado al tiempo requerido por ambos software para encontrar un diseño óptimo es considerable teniendo en cuenta la velocidad en el procesamiento de datos con los que se cuenta hoy en día. La simplificación ejecutada en los tiempos de evaluación de la red permitió minimizar en cierta medida el procesamiento de la información relacionada con los más de 1000 nudos, sin

embargo, los modelos trabajados tardan en promedio más de una semana en encontrar algún resultado óptimo. De esta manera y teniendo en cuenta que el tiempo empleado en cada una de las iteraciones es proporcional al número de nodos disponibles para ser convertidos en tanques, el tiempo de evaluación de la red para las precipitaciones trabajadas y de la topografía presente en la zona de estudio; es recomendable que antes de utilizar estos software en cualquier tipo de red se evalúe el tamaño de esta, la pendiente con la que se cuenta y los posibles escenarios de diseño a trabajar pues el tiempo solicitado por cada una para encontrar un diseño óptimo es considerable.

- De igual forma, es útil cambiar los parámetros del algoritmo genético de OptiTank cuando se incrementa el espacio de solución, esto con el fin de disminuir la probabilidad de quedarse estancado en un mínimo local y minimizar el tiempo que emplea este software en cada generación y convergencia al resultado óptimo. También es recomendable realizar varias simulaciones de un mismo caso con el fin de contar con varias soluciones y poder quedarse con la mejor tal y como ocurrió en el escenario de PULGARIN-SSP-245 VS PULGARIN-SSP-585.
- Finalmente, es aconsejable explorar una nueva forma de definir los nudos potenciales en la que este procedimiento no se realice de forma manual, sino con algún criterio de selección incorporado. Si bien la selección de nudos por parte del ingeniero permite minimizar el tiempo que cada uno de los software empleara para realizar el diseño, la arbitrariedad y subjetividad de cada operador en la selección de estas localizaciones es un limitante en la capacidad que tiene cada software para encontrar un diseño óptimo y consecuencia mejores resultados ante la disminución e la probabilidad de algún evento de inundación.
- Referente a la instalación de tanques de tormenta como posible solución ante las inundaciones modeladas en el municipio de Sabaneta, las características propias de esta red hacen que este caso particular sea de difícil evaluación en la búsqueda de encontrar la mejor ubicación y dimensionamiento de tanques de tormenta. Por ahora, es claro que los alivios presentes en la red física presentan un gran aporte en la liberación de caudal circulante en el alcantarillado de estudio. Sin embargo, la selección de otras posibles localizaciones de tanques así como la modelación de caídas en otros puntos de la red puede llegar a resultar en mejores porcentajes de reducción de inundación que, junto con la infraestructura instalada, pueda dar a Sabaneta un volumen de inundación final para cada caso de 0 m³.

Referencias

- Cunha, M., Zaferinho, J., & Saldarriaga, J. G. (2016). Optimal location and sizing of storage units in a drainage system. *Environmental Modelling & Software*, 155-166.
- IDOM. (2019). *I-T52520039-DPCL-3400-362. Informe del modelo hidráulico de la fase 6 para la evaluación del comportamiento del sistema bajo varios escenarios de la cuenca La Doctora*. Medellín.

- Iglesias, P., & Saldarriaga, J. G. (2014). *Localización de tanques de tormenta para control de inundaciones mediante un algoritmo pseudo-genético*. Bogota, Colombia.
- Iglesias, P., Martinez, J., & Saldarriaga, J. (2016). Pseudo-Genetic Optimization Model Applied to Urban Storm Water Rehabilitation Projects. *International Congress on Project Management and Engineering*, 617 - 625.
- QUINTERO, R. A. (2023). ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE COMO PRODUCIR HIETOGRAMAS DE DISEÑO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO TENEINDO EN CUENTA EL CAMBIO CLIMATICO. *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES*.
- Roa, A. O. (2010). *Evaluación de los Modelos Globales del Clima Utilizados para la Generación de Escenarios de Cambio Climático con el Clima Presente en Colombia*. Bogota: IDEAM.
- Universidad de Los Andes; PAVCO. (2016). *Drenaje Urbano y Cambio Climático: Hacia los Sistemas de Alcantarillado del Futuro*. Bogota, Colombia.

Anexos:

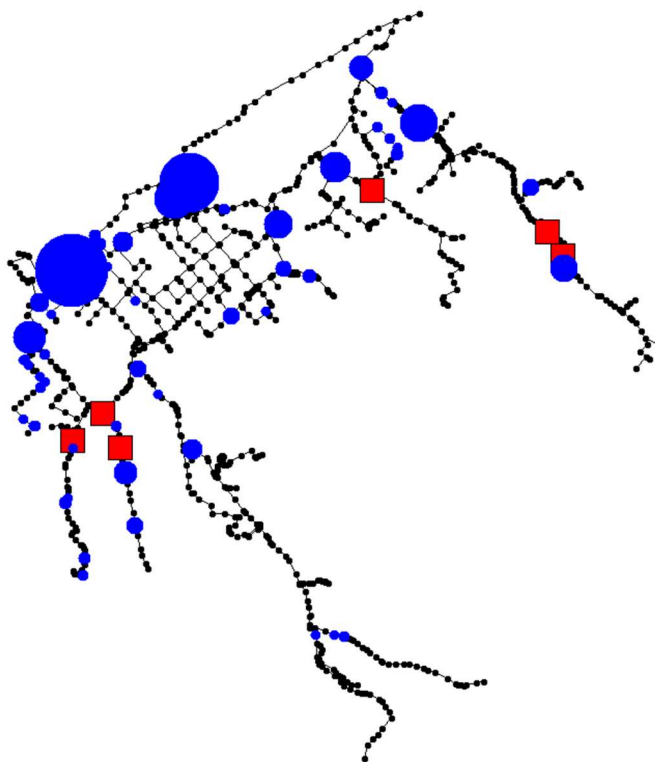


Figura 48: OPTSU – Huff 24 Horas- Localización de Inundaciones.

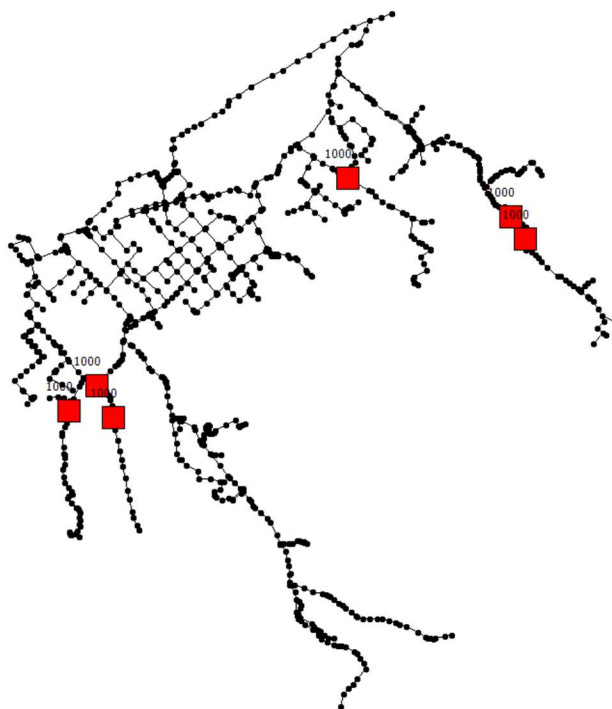


Figura 49: OPTSU – Huff 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

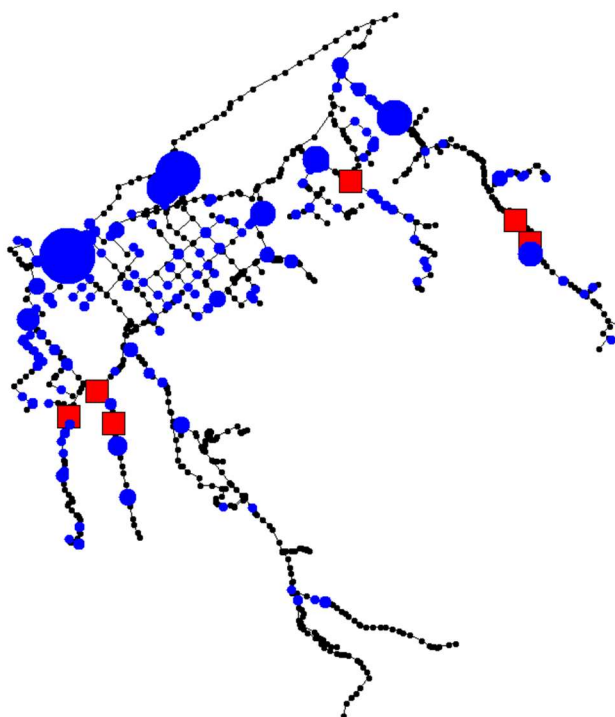


Figura 50: OPTSU – Bloques Alternos 24 Horas- Localización de Inundaciones.

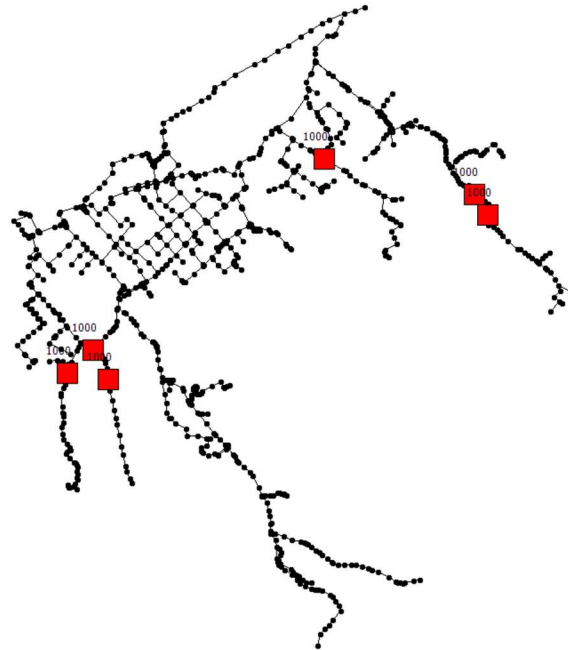


Figura 51: OPTSU – Bloques Alternos 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

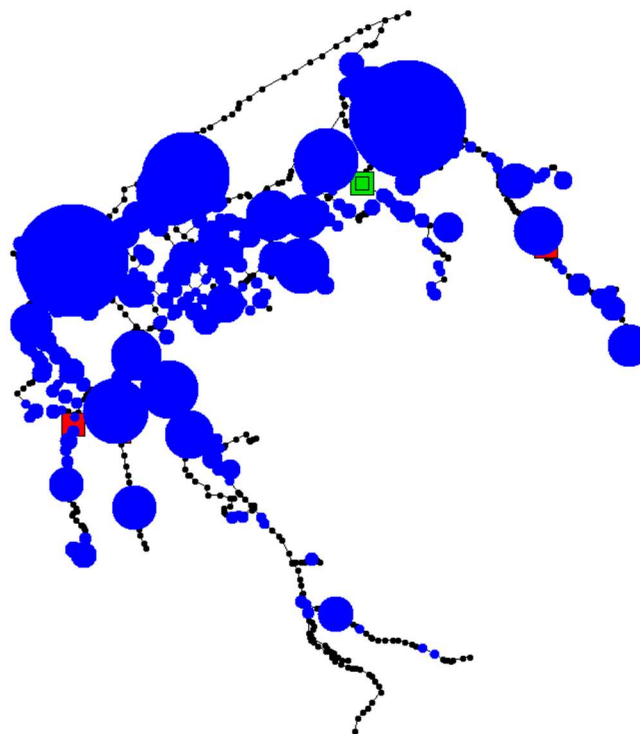


Figura 52: OPTSU – CIACUA SSP 245 24 Horas- Localización de Inundaciones.

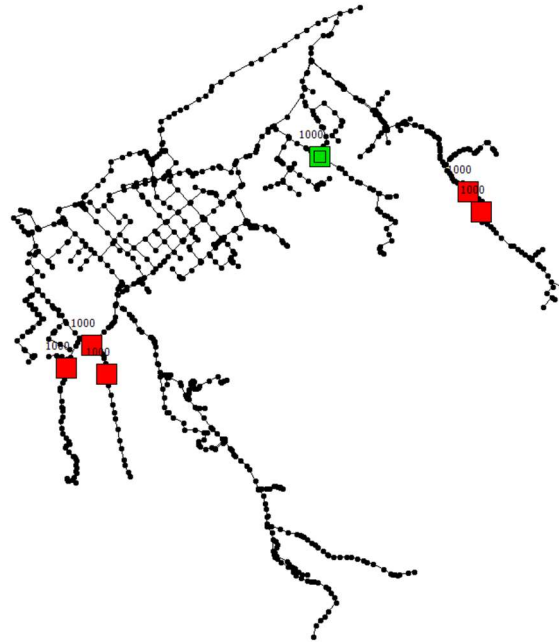


Figura 53: OPTSU – CIACUA SSP 245 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

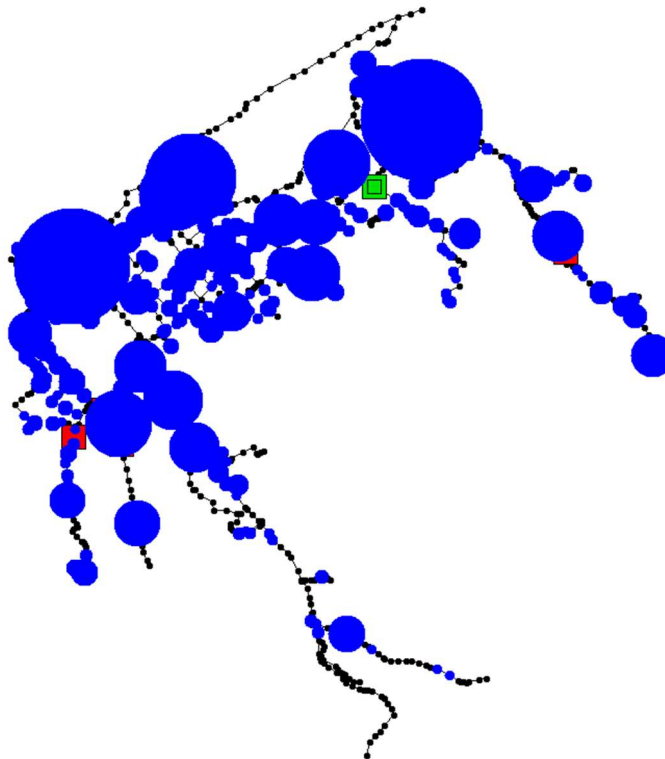


Figura 54: OPTSU – CIACUA SSP 585 24 Horas- Localización de Inundaciones.

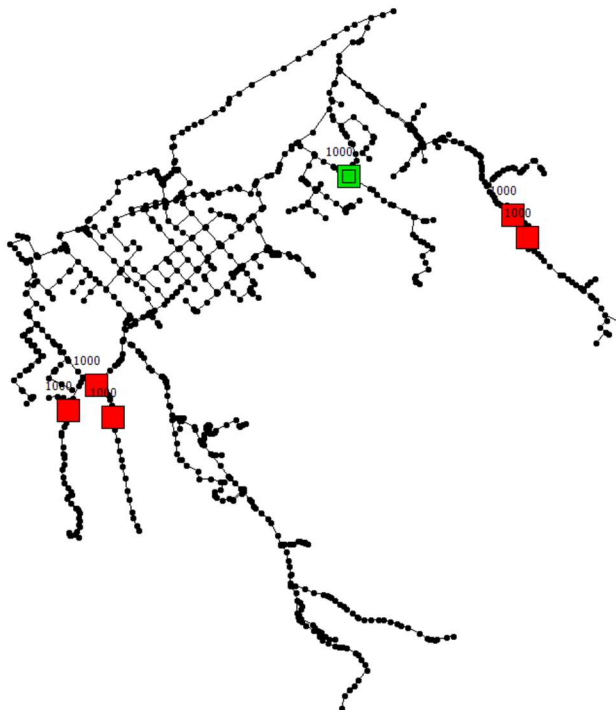


Figura 55: OPTSU – CIACUA SSP 585 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

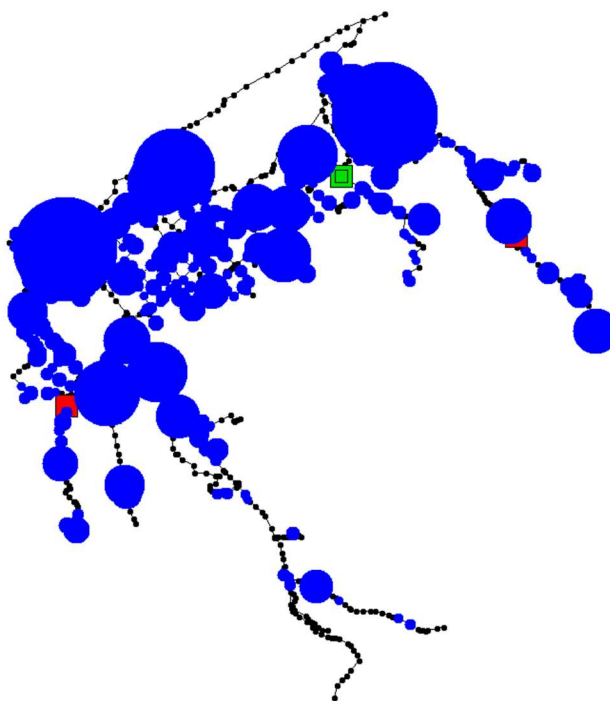


Figura 56: OPTSU – PULGARIN SSP 245 24 Horas- Localización de Inundaciones.

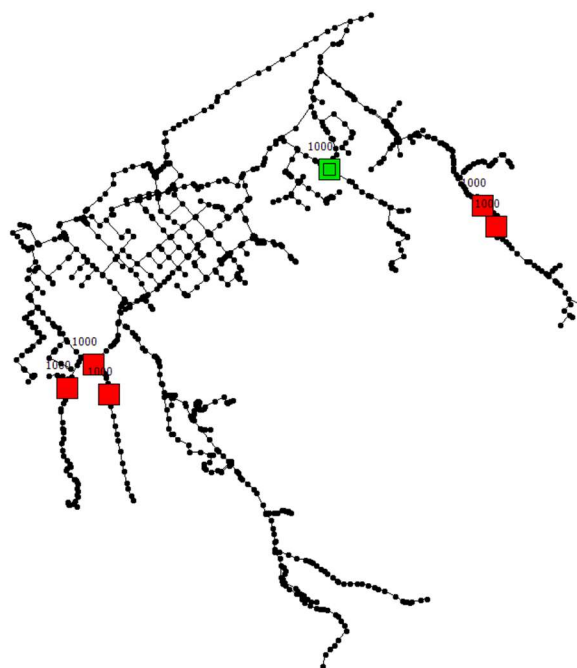


Figura 57: OPTSU – PULGARIN SSP 245 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

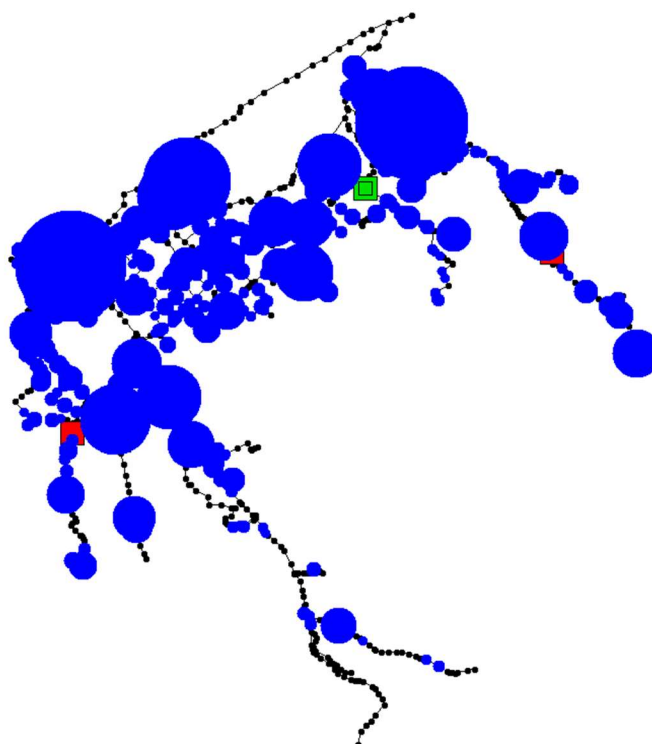


Figura 58: OPTSU – PULARIN SSP 585 24 Horas- Localización de Inundaciones.

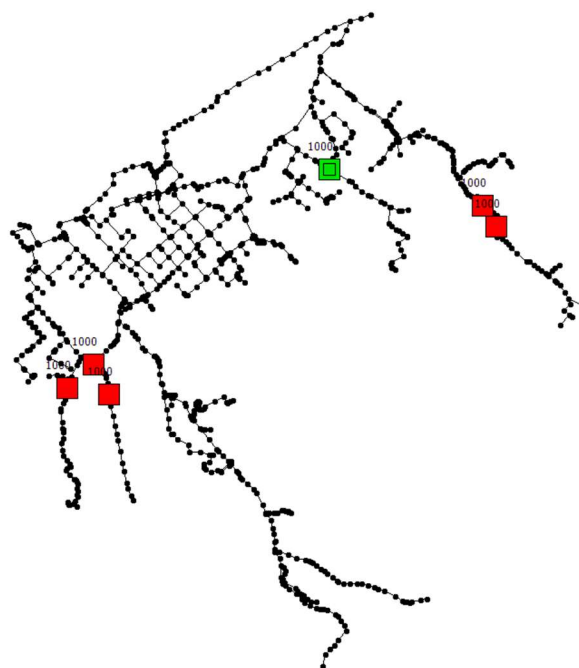


Figura 59: OPTSU – PULGARIN SSP 585 24 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

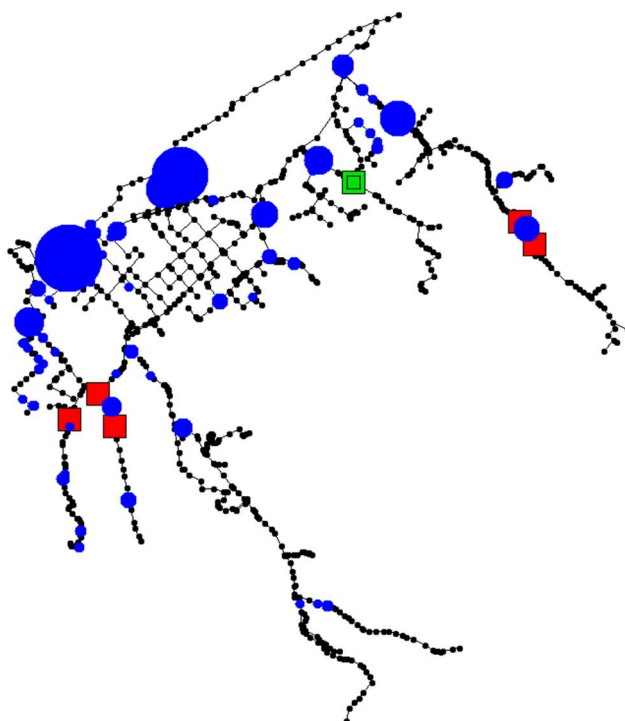


Figura 60: OPTSU – Huff 6 Horas- Localización de Inundaciones.

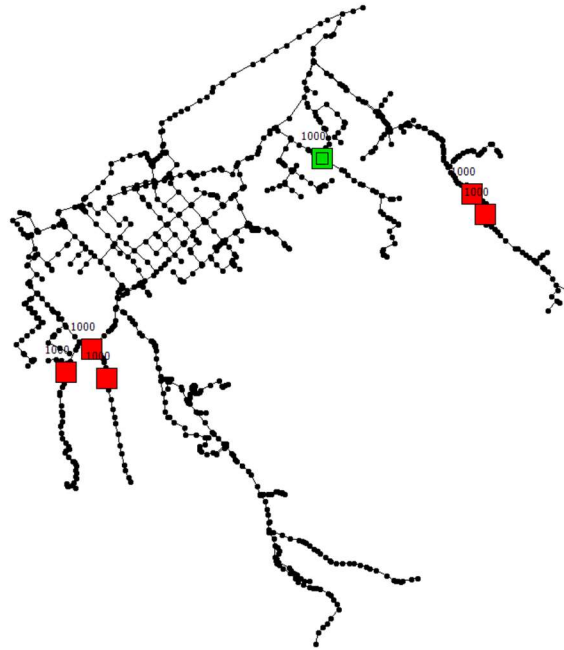


Figura 61: OPTSU – Huff 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

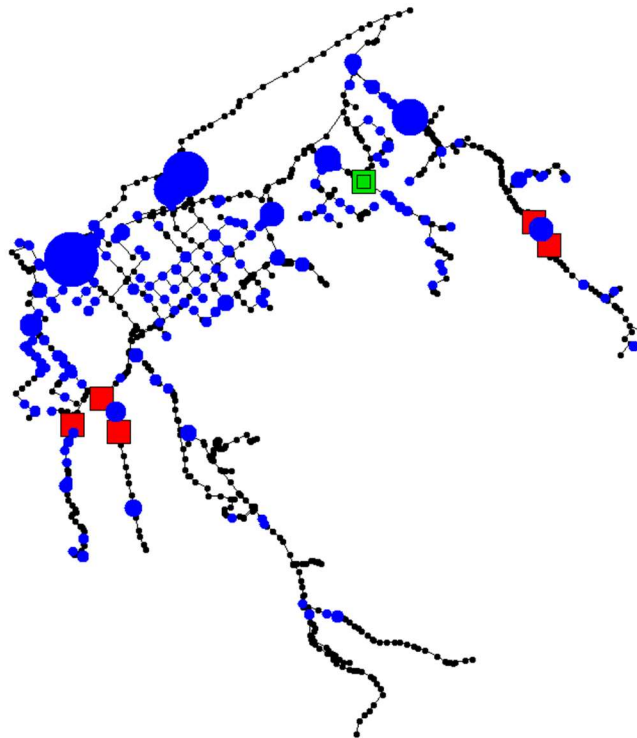


Figura 62: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas- Localización de Inundaciones.

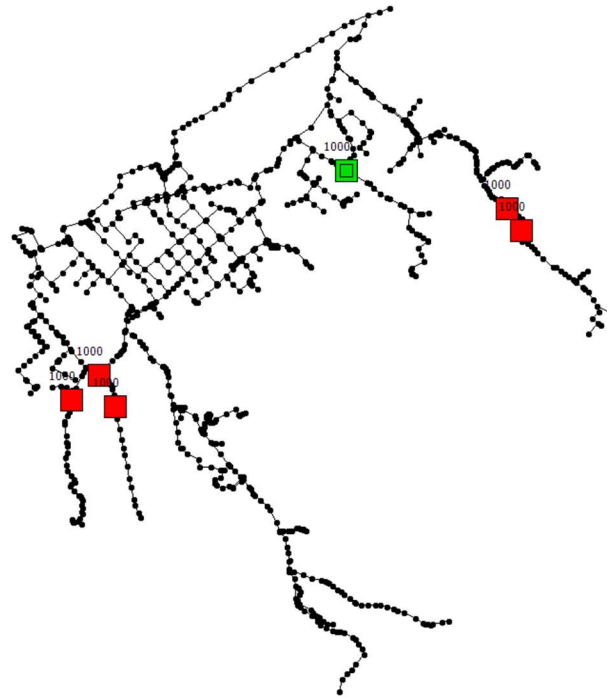


Figura 63: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

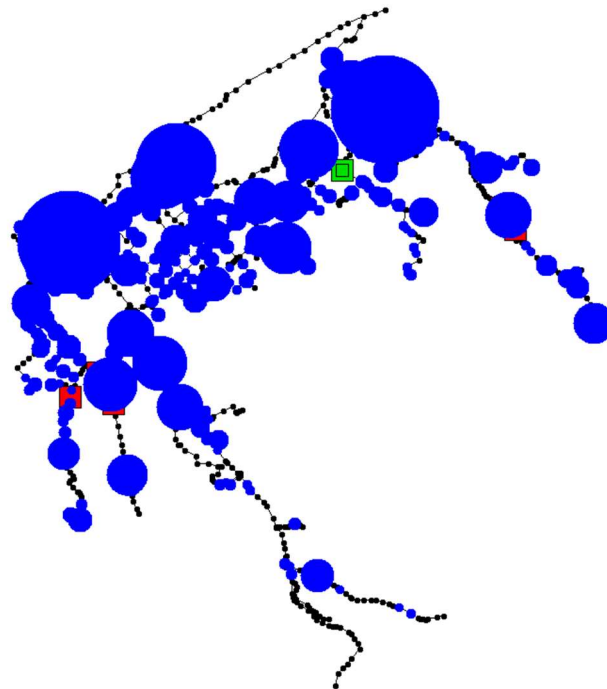


Figura 64: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas- Localización de Inundaciones.

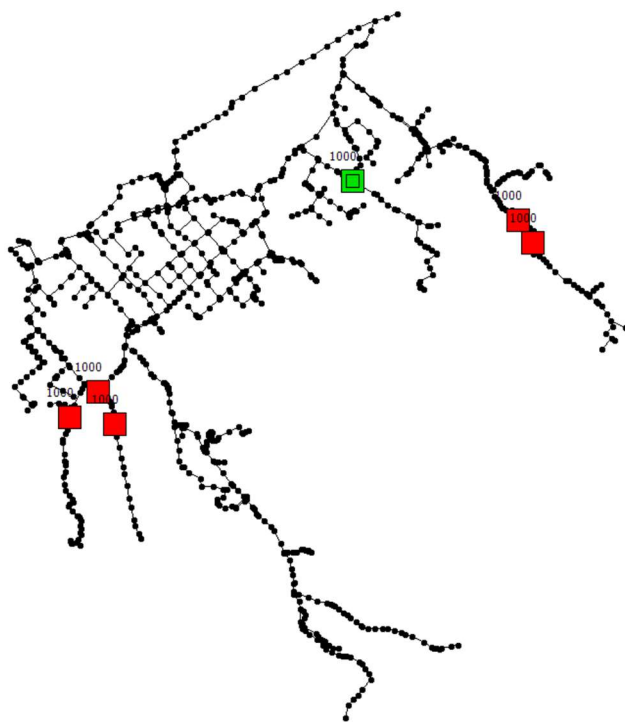


Figura 65: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

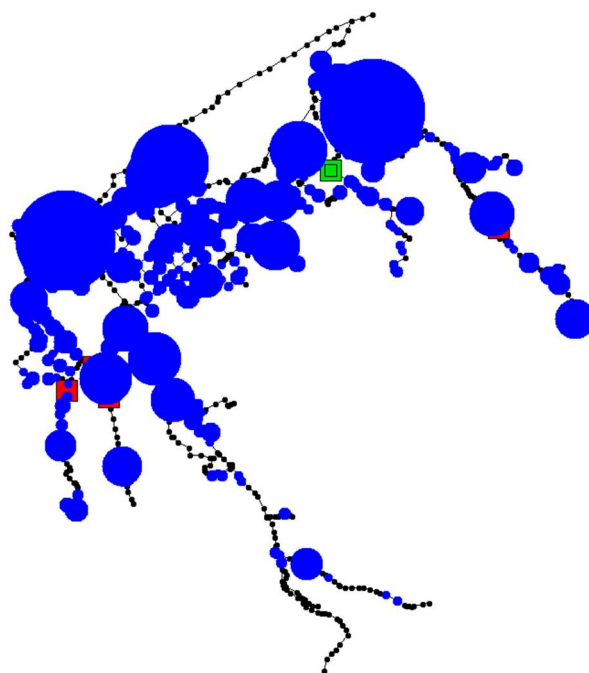


Figura 66: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas- Localización de Inundaciones.

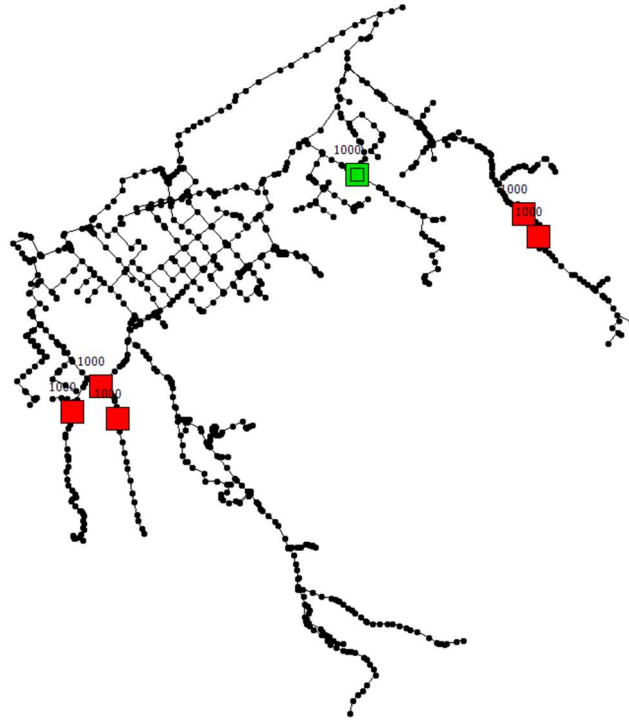


Figura 67: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

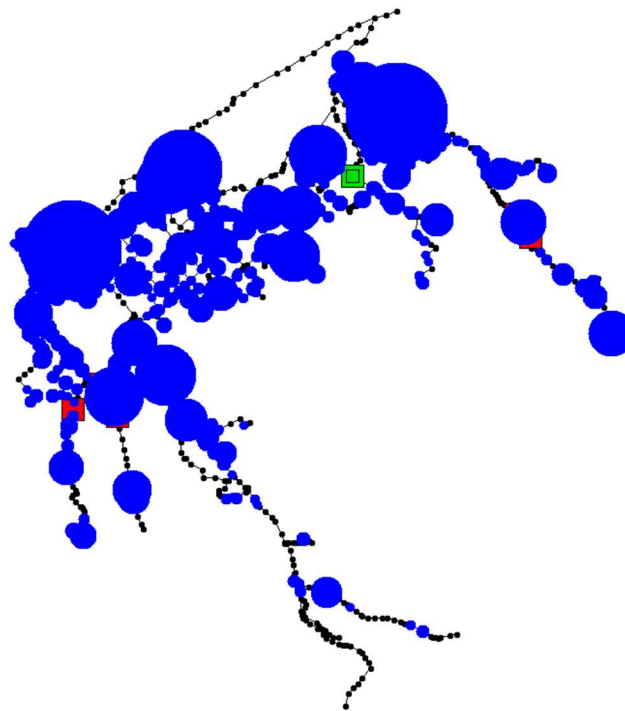


Figura 68: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas- Localización de Inundaciones.

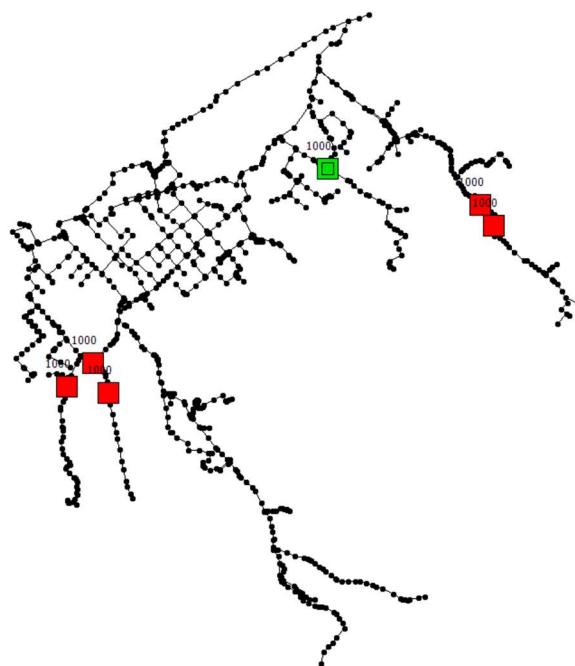


Figura 69: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

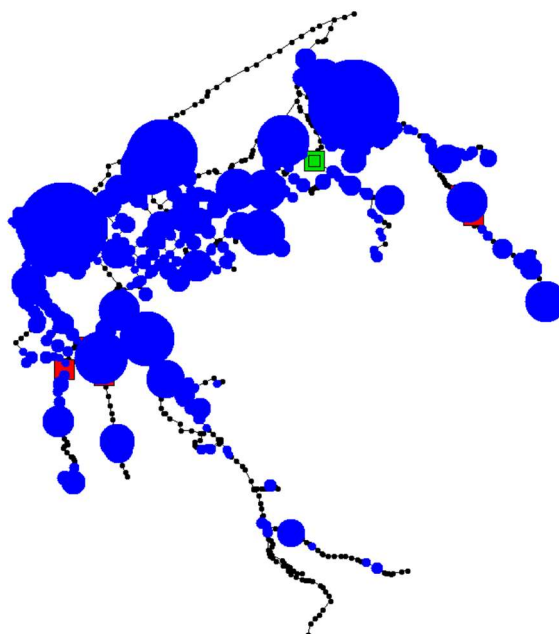


Figura 70: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas- Localización de Inundaciones.

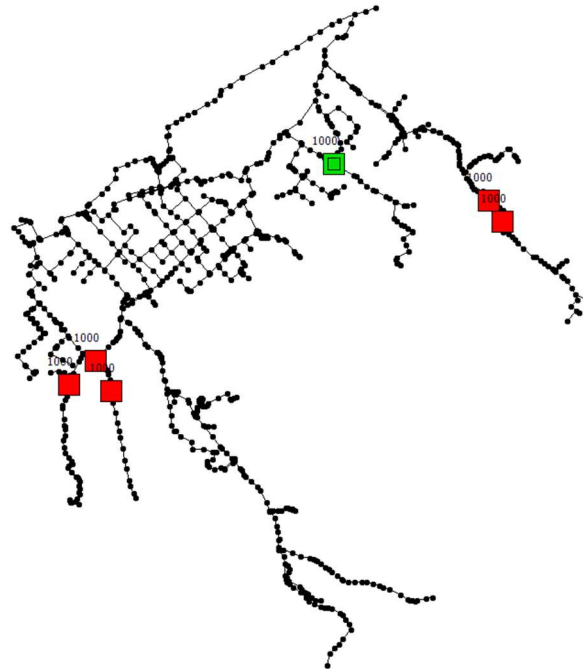


Figura 71: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas - Área en planta de Tanques Diseñados.

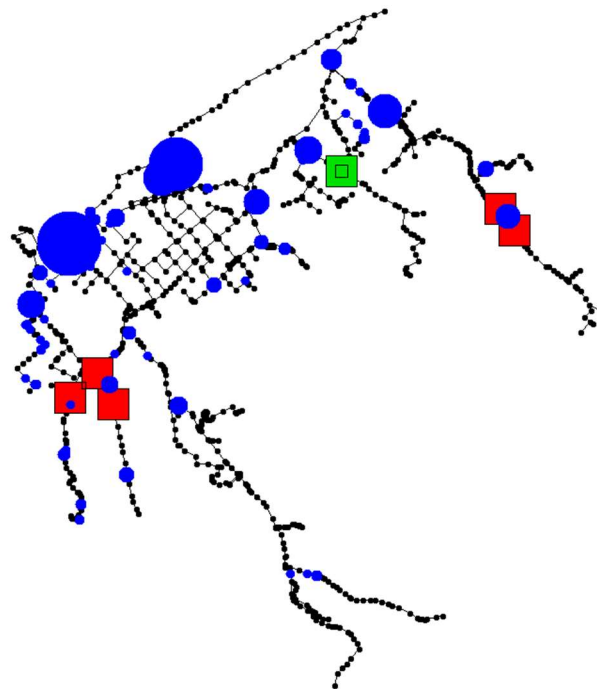


Figura 72: OPTSU – Huff 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

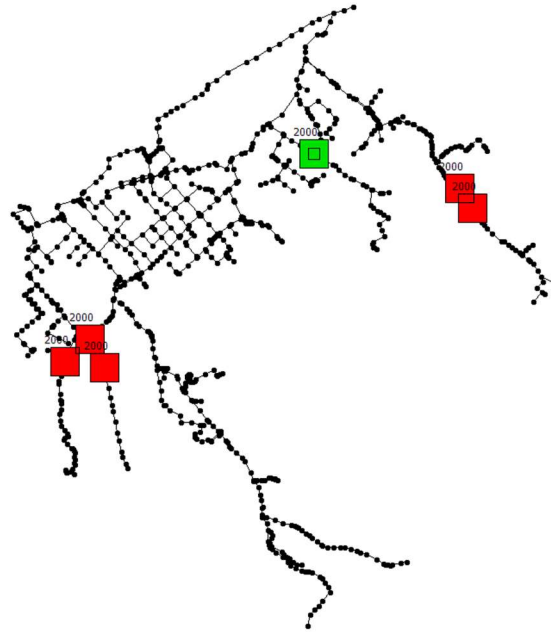


Figura 73: OPTSU – Huff 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.

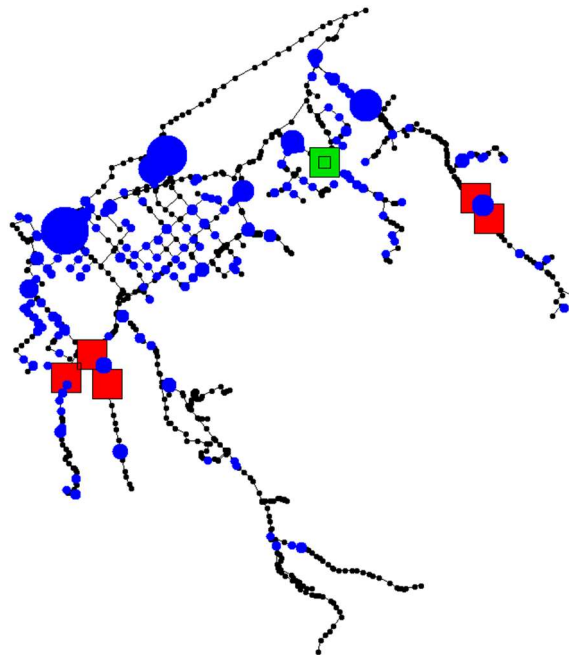


Figura 74: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

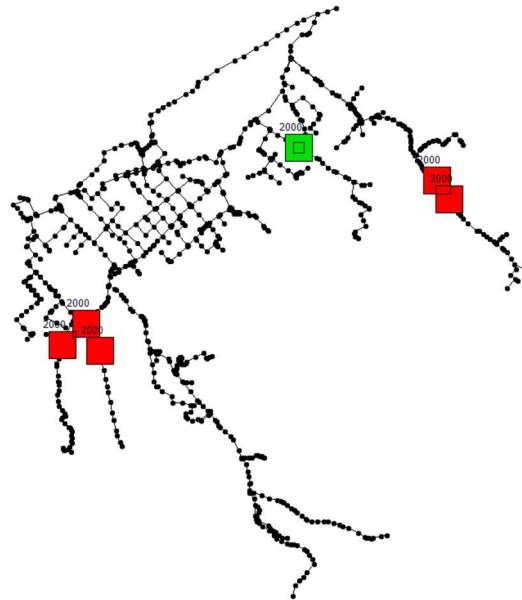


Figura 75: OPTSU – Bloques Alternos 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.

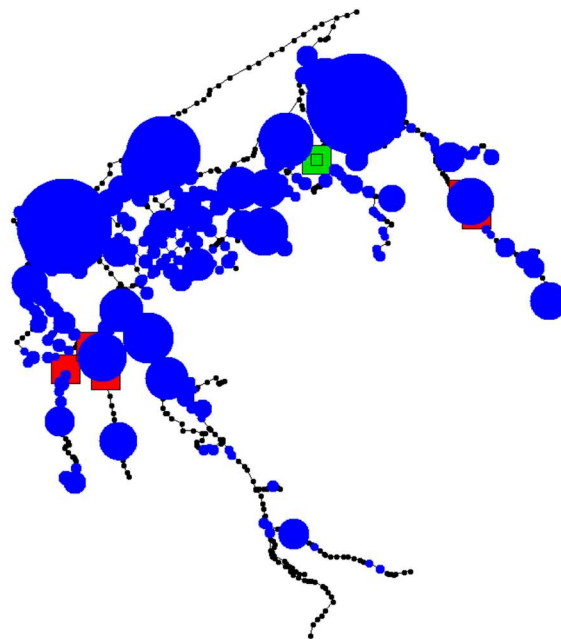


Figura 76: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

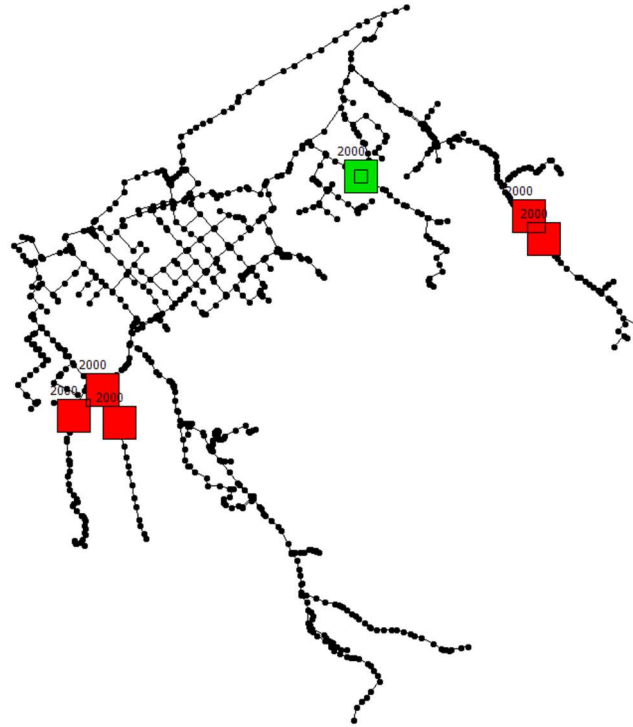


Figura 77: OPTSU – CIACUA SSP 245 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.

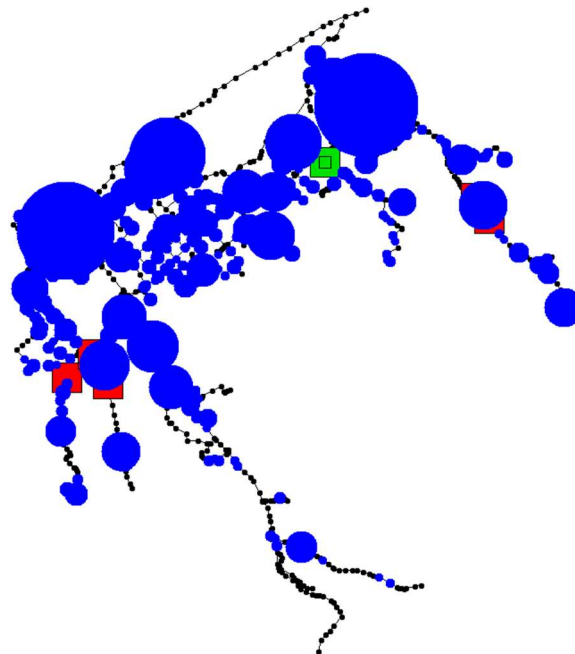


Figura 78: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

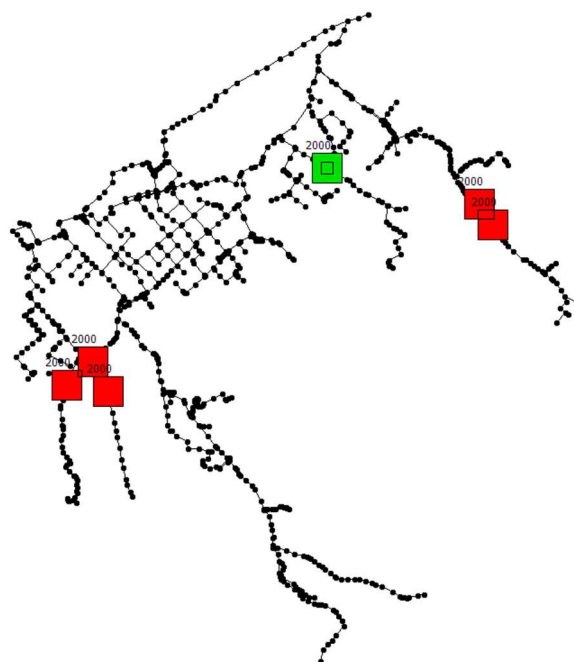


Figura 79: OPTSU – CIACUA SSP 585 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.

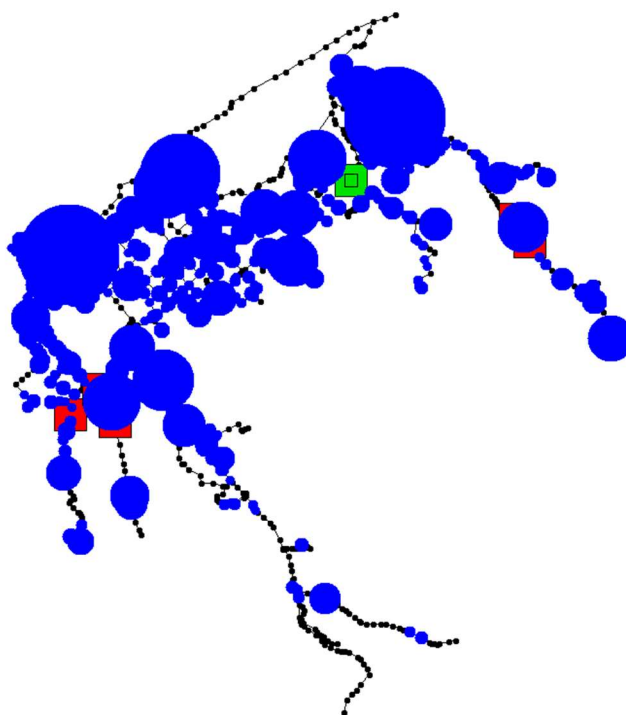


Figura 80: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

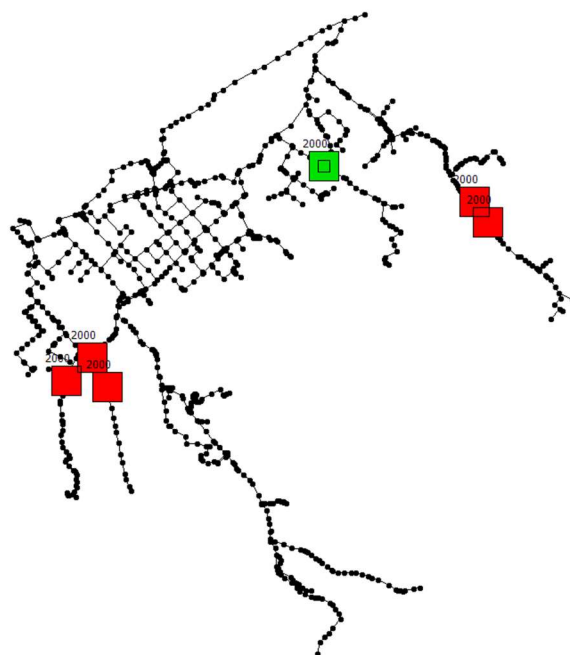


Figura 81: OPTSU – PULGARIN SSP 245 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.

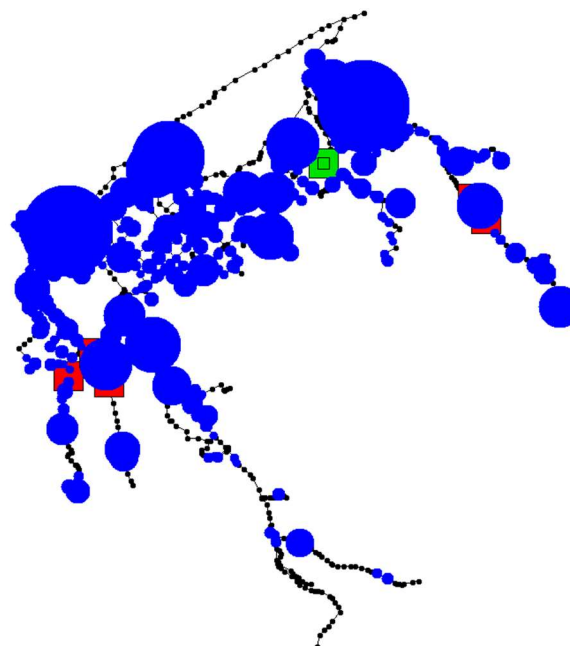


Figura 82: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas Doble Área - Localización de Inundaciones.

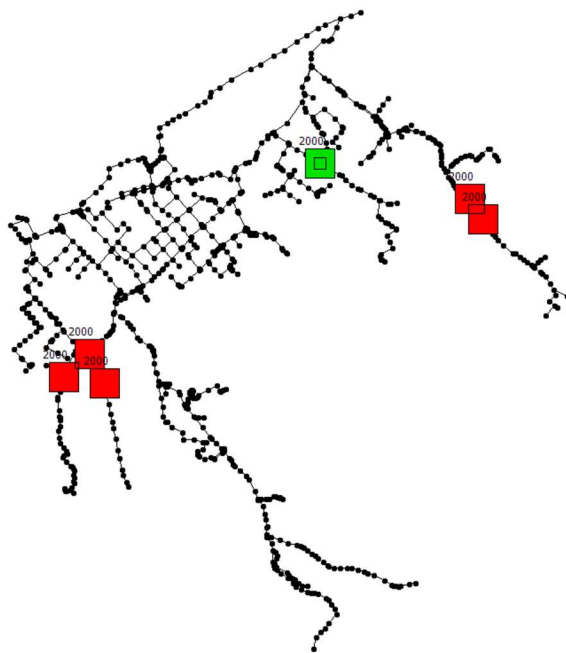


Figura 83: OPTSU – PULGARIN SSP 585 6 Horas Doble Área - Área en planta de Tanques Diseñados.



Figura 84: OptiTank - Huff 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.



Figura 85: OptiTank - Bloques Alternos 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.



Figura 86: OptiTank - CIACUA SSP 245 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.

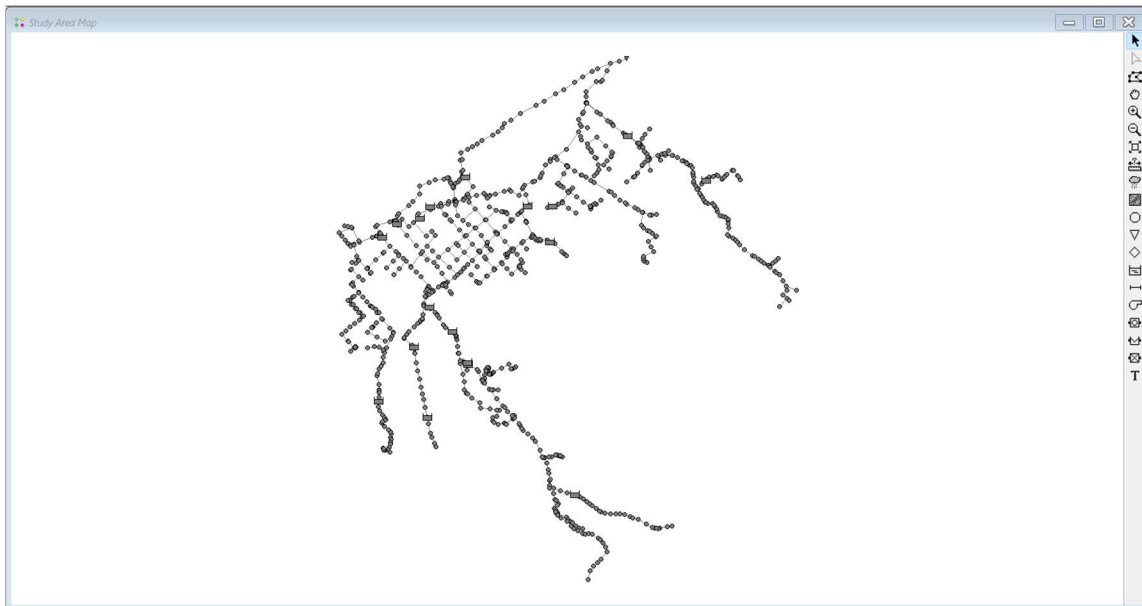


Figura 87: OptiTank - CIACUA SSP 585 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.

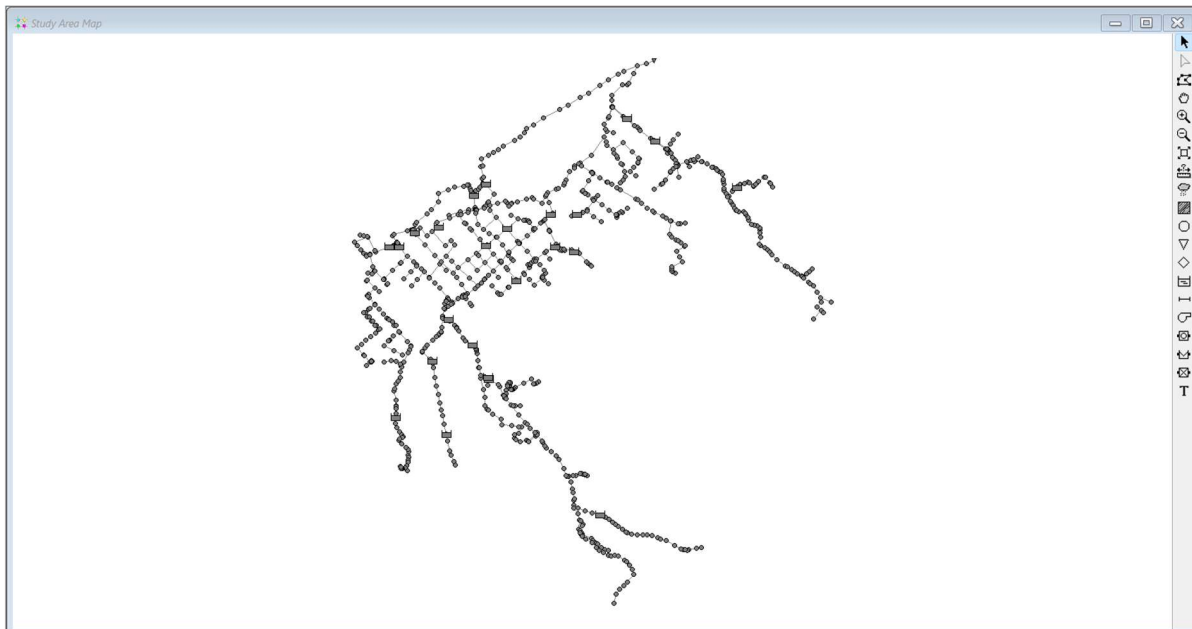


Figura 88: OptiTank - PULGARIN SSP 245 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.



Figura 89: OptiTank - PULGARIN SSP 585 6 Horas - Localización de Tanques diseñados.