



POSGRADOS

MAESTRÍA EN SISTEMAS HIDRÁULICOS URBANOS DE ABASTECIMIENTO Y PROTECCIÓN

RPC-SO-24-NO.381-2022

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE
ALCANTARILLADO EN ENTORNOS
URBANOS UTILIZANDO EL DISEÑO
CONVENCIONAL Y APLICACIÓN
DE EPA - SWMM

AUTORES:

DIEGO ISMAEL CORONEL MARTÍNEZ
DANIEL HERIBERTO DÁVALOS GUAMÁN

DIRECTOR:

MARÍA GABRIELA SORIA PUGO

CUENCA – ECUADOR
2025

Autores:



Diego Ismael Coronel Martínez

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

Diegocoro95@hotmail.com



Daniel Heriberto Davalos Guamán

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

davalosdaniel90@gmail.com

Dirigido por:



María Gabriela Soria Pugo

Ingeniera Civil.

Magister en Recursos Hídricos.

msoria@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

DIEGO ISMAEL CORONEL MARTÍNEZ

DANIEL HERIBERTO DÁVALOS GUAMÁN

Comparación de sistemas de alcantarillado en entornos urbanos utilizando el diseño convencional y aplicación de EPA - SWMM

DEDICATORIA

A mi padre quien con su ejemplo me ha enseñado que el aprendizaje no tiene límites y en este mundo tan competitivo lo mejor es prepararse para poder cambiar este país, a mi madre por ser esa persona tan cariñosa y estar presente en todo momento, a mi hermano quien ha sido mi mejor amigo y mi inspiración, a mi esposa Daniela quien me ha dado las mejores sonrisas y ha sido un gran apoyo en este proceso y por ultimo pero no menos importante a mis abuelitos Nicolás, Leonor y Tania quienes son fundamentales en mi vida.

Diego Ismael Coronel Martínez

DEDICATORIA

A mis amados padres Patricio y Mery quienes me han brindado su apoyo incondicional durante toda mi formación académica desde niño hasta la presente fecha, a mi extrañada tía Rita Guamán, mi segunda madre, quien desde el cielo está presente en cada uno de mis logros personales y profesionales. A mis dos hermanos Patricio Segundo y Byron Efrén, que si bien cada uno tiene sus diferentes actividades estamos prestos a ayudarnos.

Daniel Heriberto Davalos Guamán

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por la salud y por las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, a mis padres por haberme inculcado valores de respeto y disciplina en la vida, a la Universidad Católica de Cuenca mi segunda casa la cual me formo como ingeniero civil y a esta casa de estudios la Universidad Politécnica Salesiana por acogerme como alumno de esta maestría.

Diego Ismael Coronel Martínez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a cada uno de mis docentes por compartir sus conocimientos a lo largo de mi formación como Ingeniero Civil. Asimismo, extendiendo mi gratitud a la Universidad Politécnica Salesiana, donde me especialicé en la maestría en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección.

A la Mgs. Gabriela Soria, por su dedicación, tiempo y disposición para compartir su conocimiento y experiencia como docente y tutora. Al Ing. Diego Coronel, por su amistad, confianza y colaboración en la formación de un gran equipo de trabajo.

Daniel Heriberto Davalos Guamán

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	11
Abstract	12
1 Determinación del Problema.....	15
2 Objetivo	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 Marco teórico referencial.....	17
3.1 Criterios generales para el diseño de sistemas de alcantarillado	19
3.1.1 Criterios Hidráulicos en el diseño de sistemas de alcantarillado	20
3.1.2 Criterios hidrológicos en el diseño de sistemas de alcantarillado	21
3.1.3 Método tradicional de diseño y obtención de caudales	23
3.2 Descripción del software EPA-SWMM	24
3.2.1 Generalidades y evolución del modelo	24
3.2.2 Fundamento matemático: ecuaciones de Saint-Venant.....	25
3.2.3 Tipos de enrutamiento de flujo en EPA-SWMM	26
3.2.4 Esquema numérico y criterios de estabilidad	26
3.2.5 Componentes del modelo: subcuencas, nodos y tuberías.....	27
3.2.6 Datos de entrada en EPA-SWMM	27
3.2.7 Capacidades avanzadas y aplicaciones.....	28
3.3 Normativa vigente en el Ecuador	28
3.4 Revisión de proyectos similares	30
4 Materiales y metodología.....	33
4.1 Área de estudio.....	33
4.1.1 Ubicación político administrativo.....	33
4.1.2 Delimitación territorial e hidro social.....	35
4.2 Metodología	36
4.2.1 Procesamiento Hidrológico	38
4.2.2 Método racional	38
4.2.3 Cálculo del coeficiente de escorrentía	39
4.2.4 Cálculo de intensidades de lluvia	44
4.2.5 Construcción de Hietogramas de Diseño – Estación Izobamba	46

4.2.6	Descripción del alcantarillado convencional	50
4.2.7	Criterios para el modelo del alcantarillado pluvial.....	52
4.2.8	Empleo del método Green-Ampt en la modelacion en el software EPA-SWMM	54
4.2.9	Determinación del error de continuidad en EPA-SWMM	55
4.2.10	Criterios para el modelo del alcantarillado sanitario	56
4.2.11	Verificación y comparación de escenarios	57
5	Resultados y discusión.....	58
5.1	Resultados del modelamiento del alcantarillado pluvial	60
5.1.1	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 24 horas – 5 años de retorno	61
5.1.2	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 24 horas – 10 años de retorno	64
5.1.3	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 24 horas – 25 años de retorno	67
5.1.4	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 12 minutos – 5 años de retorno (periodo de modelamiento en alcantarillado convencional)	70
5.1.5	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 12 minutos – 10 años de retorno	72
5.1.6	Modelamiento con un tiempo de duración de lluvia de 12 minutos – 25 años de retorno	74
5.2	Resultados del modelamiento del alcantarillado sanitario.....	79
5.3	Comparación del alcantarillado pluvial convencional con el modelamiento	81
6	Conclusiones.....	84
	Referencias	86
	Anexos	89
	Alcantarillado Sanitario Convencional.....	89
	Alcantarillado Sanitario Pluvial.....	90

COMPARACIÓN DE
SISTEMAS DE
ALCANTARILLADO
EN ENTORNOS
URBANOS
UTILIZANDO EL
DISEÑO
CONVENCIONAL Y
APLICACIÓN DE EPA-
SWMM

AUTORES:

DIEGO ISMAEL CORONEL MARTÍNEZ
DANIEL HERIBERTO DÁVALOS GUAMAN

RESUMEN

Este estudio se sitúa en el campo de la ingeniería civil, específicamente en el área de la hidráulica urbana aplicada al diseño y optimización de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial. La investigación aborda las problemáticas existentes en la Cooperativa Eloy Alfaro, ubicada en el cantón Rumiñahui, donde la infraestructura de saneamiento ha superado su vida útil y resulta insuficiente para afrontar el crecimiento urbano y los eventos de lluvias intensas registrados en los últimos años. El objetivo principal fue comparar el desempeño hidráulico del sistema de alcantarillado diseñado mediante métodos convencionales —basados en cálculos empíricos y hojas de cálculo en Excel— frente al modelamiento con el software EPA-SWMM, para determinar cuál procedimiento ofrece mayor eficiencia y sostenibilidad en contextos urbanos. Se aplicó una metodología cuantitativa y experimental, que incluyó la recolección de información hidrológica e hidráulica, el uso del método racional para el cálculo de caudales de diseño, la construcción de hietogramas a partir de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) y la simulación hidrológica-hidráulica del sistema bajo diferentes condiciones de lluvia (12 minutos y 24 horas) y periodos de retorno (5, 10 y 25 años). Los resultados evidenciaron que el modelo EPA-SWMM proporciona un desempeño más efectivo al capturar la respuesta temporal del sistema ante las variaciones de tormenta, logrando balances de continuidad precisos y permitiendo la identificación de zonas de sobrecarga crítica. En contraste, el diseño convencional, aunque cumple con las normativas ecuatorianas (INEN 5-9-1 y SENAGUA, 2015), no incorpora la dinámica real de los flujos ni las pérdidas por almacenamiento, lo que puede llevar a un subdimensionamiento durante eventos extremos de lluvia y provocar problemas en estos sistemas. En conclusión, este estudio demuestra que la modelación hidráulica computacional es una herramienta técnica altamente confiable que complementa el diseño tradicional, permitiendo planificar sistemas de drenaje más eficientes, efectivos y adaptados al contexto climático y urbano del Ecuador.

Palabras clave:

Ingeniería hidráulica; Alcantarillado; Drenaje urbano; Modelación hidrodinámica; Saneamiento.

ABSTRACT

This study is situated within the field of civil engineering, specifically in the area of urban hydraulics applied to the design and optimization of sanitary and storm sewer systems. The research addresses the existing problems in the Eloy Alfaro Cooperative, located in Rumiñahui canton, where the sanitation infrastructure has exceeded its useful life and is insufficient to cope with urban growth and the high-intensity rainfall events experienced in recent years. The main objective was to compare the hydraulic performance of the sewer system designed using conventional methods—based on empirical calculations and Excel spreadsheets—with modeling using EPA-SWMM software, to determine which procedure offers greater efficiency and sustainability in urban contexts. A quantitative and experimental methodology was applied, including the collection of hydrological and hydraulic information, use of the rational method for the calculation of design flows, construction of hyetographs from intensity-duration-frequency (IDF) curves, and hydrological-hydraulic simulation of the system under various rainfall conditions (12 minutes and 24 hours) and return periods (5, 10, and 25 years). The results showed that the EPA-SWMM model provides more effective performance by capturing the temporal response of the system to storm variations, achieving accurate continuity balances and enabling the identification of critical overload zones. In contrast, the conventional design, although compliant with Ecuadorian standards (INEN 5-9-1 and SENAGUA, 2015), does not incorporate the real dynamics of flow or storage losses, which may lead to under-sizing during extreme rainfall events and cause problems in these systems. In conclusion, this study demonstrates that computational hydraulic modeling is a highly reliable technical tool that complements traditional design, allowing the planning of more efficient, effective, and contextually adapted drainage systems suited to the climatic and urban realities of Ecuador.

Palabras clave:

Hydraulic engineering; Sewerage; Urban drainage; Hydrodynamic modeling; Sanitation.

INTRODUCCIÓN

La rápida urbanización y la alta demanda de servicios básicos han creado grandes desafíos en la estructura de las infraestructuras de salud en muchas ciudades del mundo. En tales condiciones, entre los desafíos más apremiantes está la utilización efectiva de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial, con esa capacidad de servicio volviéndose inadecuada y pudiendo deteriorarse con el tiempo, causando problemas de higiene y riesgos de inundaciones (OMS, 2021). Gracias a estos desafíos, la ingeniería hidráulica ha evolucionado con el desarrollo de herramientas informáticas que permiten modelar y optimizar redes de drenaje de manera más precisa. El software EPA-SWMM es una de las principales herramientas para analizar el rendimiento hidrológico e hidráulico de los sistemas de drenaje para identificar posibles diseños y mejorar la gestión de las infraestructuras. En Ecuador, la urbanización de la "Cooperativa Eloy Alfaro" en el cantón Rumiñahui, perteneciente a la provincia de Pichincha, ha experimentado el cambio territorial a través del aumento poblacional y el crecimiento urbano. Una vez destinado a fines agrícolas, este terreno con los años se ha movido hacia un uso residencial y comercial, resultando en un aumento de la cantidad de aguas residuales y pluviales que pueden llegar a esa área. Sin embargo, la infraestructura existente no es suficiente para sobrevivir mucho tiempo, mostrando que es necesario otro rediseño para asegurar instalaciones sanitarias efectivas y minimizar el impacto ambiental (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020). Basado en los conceptos anteriores, el objetivo de esta investigación es demostrar el diseño tradicional del sistema de alcantarillado y compararlo con el modelado realizado en EPA-SWMM para evaluar la relevancia y efectividad en entornos urbanos más grandes. Al evaluar la capacidad de transporte y varios escenarios en un estudio técnico y modelado hidráulico integral, se busca descubrir la solución más efectiva y desempeñar un papel en la planificación urbana del cantón Rumiñahui. El objetivo es desarrollar una herramienta de referencia para adoptar en futuras intervenciones, así como fomentar el uso de la tecnología en la aplicación del diseño basado en tecnología de mecanismos de drenaje (Rossman, 2015). Desde un punto de vista social y

ecológico, al optimizar el sistema de drenaje en la Cooperativa Eloy Alfaro, reduciremos enfermedades causadas por saneamiento inadecuado y la inundación y contaminación de los recursos hídricos locales (OMS, 2021). De manera similar, a nivel territorial este proyecto cumple con las normativas nacionales que establecen las directrices respectivas a seguir en el diseño y construcción de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial en el país (INEN, 2011). El desarrollo de todas las normativas garantizará que el sistema propuesto cumpla con los indicadores de calidad y rendimiento necesarios a nivel nacional e internacional. Este estudio permite una comparación entre el método de diseño antiguo y los métodos de modelado existentes. En este documento, se presentan los beneficios del modelado hidrológico e hidráulico en la optimización de recursos, un conjunto diverso de simulación de escenarios y la aplicación de toma de decisiones basada en evidencia en la investigación por el programa EPA-SWMM. De esta manera, se contribuye al fortalecimiento del conocimiento en el campo de la ingeniería sanitaria e hidráulica, incentivando la utilización de herramientas tecnológicas nuevas en la planificación urbana a nivel nacional.

1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Con el desarrollo urbano no regulado en Ecuador y la falta de planificación territorial suficiente, existen serias deficiencias en la infraestructura sanitaria, especialmente en los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial. Como resultado, un gran número de comunidades urbanas y periurbanas no pueden recolectar o evacuar eficazmente las aguas residuales y pluviales, lo que lleva a una alta emisión de contaminación al medio ambiente y al riesgo de enfermedades transmitidas por el agua (INEC, 2021). En el cantón de Rumiñahui, incluida la cooperativa Eloy Alfaro, el antiguo sistema de drenaje ha superado su propósito. El resultado ha sido una acumulación de aguas residuales, redes colapsadas repetidamente y deficiencias en el drenaje de aguas pluviales con precipitaciones intensas. Estas fallas afectaron directamente a los residentes, afectando la salud de los habitantes, el deterioro de las viviendas y daños a la red vial, así como a otros servicios básicos (GAD Rumiñahui, 2020). Los métodos convencionales de diseño de alcantarillado continúan utilizándose en el país y, a pesar de su aplicación generalizada, tienen limitaciones para abordar los desafíos de la rápida urbanización y los fenómenos climáticos drásticos. La ausencia de conocimiento y uso práctico de sistemas de modelado hidráulico e hidrológico como el software EPA-SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) que permite la proyección de sistemas con mayor eficiencia operativa y resultados sostenibles (Rossman, 2015). La falta de estudios comparativos entre las técnicas de diseño estándar y el modelo de simulación de EPA-SWMM en un entorno urbano real ha dificultado la toma de decisiones técnicas y políticas. Esto deja las soluciones existentes inadecuadamente desarrolladas para las demandas actuales del medio ambiente; costoso mantenimiento; y gestión inadecuada del agua urbana. En este sentido, la situación de la Cooperativa Eloy Alfaro es un problema nacional que necesita alternativas técnicas innovadoras y sostenibles dirigidas a mejorar la evacuación del agua, reducir los peligros ambientales y fortalecer la salud pública (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el sistema de alcantarillado para la Cooperativa Eloy Alfaro, cantón Rumiñahui utilizando el software EPA-SWMM para comparar con el diseño convencional del sistema de alcantarillado.

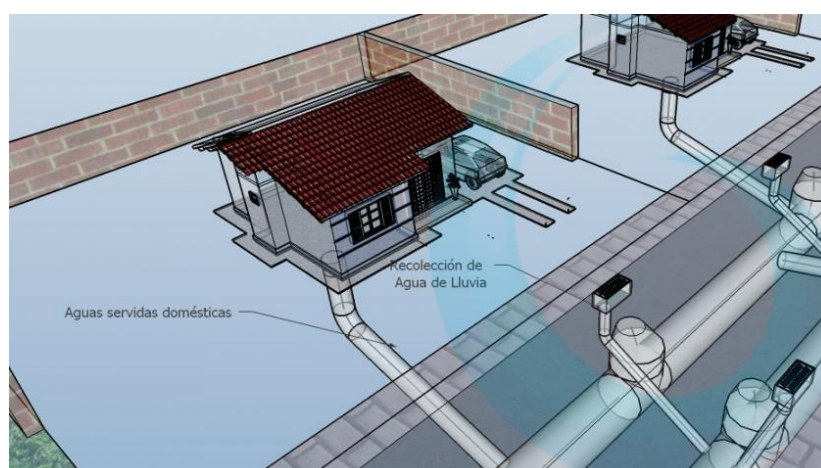
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los elementos poblacionales, sociales, hidrológicos e hidráulicos que inciden en la configuración del sistema de drenaje sanitario y pluvial en la Cooperativa Eloy Alfaro, en el cantón Rumiñahui.
2. Simular el funcionamiento del sistema de drenaje sanitario y pluvial de la Cooperativa Eloy Alfaro, en el cantón Rumiñahui, y contrastar los flujos de descarga en los puntos críticos del sistema, utilizando tanto el método convencional de diseño como la modelación computacional, para valorar su utilidad en el entorno urbano.
3. Optimizar el diseño del sistema de drenaje sanitario y pluvial a través de la comparación entre el método de diseño tradicional y la modelación en EPA-SWMM. modificando la geometría de la red, la profundidad de los pozos y la inclusión de infraestructura para el control de inundaciones.

3 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En esta revisión, el presente estudio tiene como objetivo comparar el diseño tradicional de drenaje con el uso del software EPA-SWMM en entornos urbanos. Dada la creciente complejidad de los entornos urbanos, se recomienda esta investigación como un medio para mejorar el diseño y la gestión de los sistemas de drenaje en las ciudades, donde la efectividad y sostenibilidad de estos sistemas es fundamental para garantizar la salud pública y la protección ambiental. Es posible realizar un análisis computarizado del comportamiento hidráulico e hidrológico, y la toma de decisiones se vuelve simple y conveniente, ya que es factible diseñar infraestructuras resilientes para el futuro (Rossman, 2015). Los sistemas de drenaje y alcantarillado son el núcleo de la infraestructura de salud urbana porque permiten recolectar, transportar y tratar aguas residuales y pluviales, proporcionando así un activo significativo de infraestructura. Su función principal es facilitar el drenaje seguro de los flujos generados por actividades humanas y eventos climáticos para evitar inundaciones que conduzcan a la acumulación de agua y la propagación de enfermedades. Estos sistemas se construyen para adherirse a los principios hidráulicos de cantidad de flujo, pendiente y capacidad de transporte de tuberías, críticos para el diseño que asegura una operación segura y fluida (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2014). A continuación, en la figura 3.1 se puede observar un sistema de drenaje separado, el cual es el óptimo para un adecuado tratamiento de las aguas residuales y pluviales.

Figura 3.1: *Sistemas de drenaje.*



Nota: Se puede observar en la figura los sistemas de drenaje separados. Fuente: Bermúdez; Coraisaca et al., 2022.

El diseño tradicional de alcantarillado se ha seguido durante décadas, basado en evaluaciones empíricas y la legislación vigente que ayuda a especificar el tamaño y la asignación de la red de drenaje. No obstante, debido a una respuesta limitada a la naturaleza cambiante de la vida urbana y al clima extremo, el enfoque convencional es incapaz de adaptarse a la distribución inesperada de lluvias o a la expansión humana. Por el contrario, las herramientas de software de modelado como EPA-SWMM (Rossman, 2015); permiten el modelado de diferentes escenarios, incluyendo numerosos componentes que son difíciles de modelar, proporcionando una visión completa de cómo funciona el sistema, y permiten incorporar cambios y prácticas óptimas en el sistema en tiempo real.

La comparación del diseño convencional con el modelado computacional con EPA-SWMM se representa como una tecnología que busca ayudar a identificar las áreas de desarrollo que son propicias para la eficiencia hidráulica, la reducción de costos y la protección ambiental. Además, la implementación de simulaciones más sofisticadas ayuda a establecer regímenes de mantenimiento preventivo y a formular políticas públicas hacia prácticas sostenibles, preparando así a las ciudades para eventos climáticos extremos que podrían experimentarse (Chow, 2010).

3.1 CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

Los criterios de diseño generales de los sistemas de alcantarillado se basan en un análisis detallado de los requerimientos de agua y el flujo de la zona de impacto. Los caudales de diseño deben establecerse a partir de datos históricos y el crecimiento proyectado de la población, mientras se evalúa el agua residual generada por procesos humanos y el agua pluvial, que varía sustancialmente con el clima. Esto permite determinar correctamente cómo puede operar la red, evitando que el sistema se sobrecargue o subdimensione, lo que podría llevar a inundaciones o acumulación de sedimentos (Tchobanoglous, Burton & Stensel, 2014).

Otra consideración importante es la topografía y la geometría de la superficie, que afectan tanto la pendiente de las tuberías en diferentes ubicaciones como la velocidad del flujo. Un diseño adecuado debe garantizar que las pendientes puedan acomodar un flujo continuo, limitar la tasa de producción de sedimentos y evitar la erosión interna de las tuberías. Además, se debe tener en cuenta las curvas, cambios de dirección y cruces, ya que las pérdidas de carga y la turbulencia que generan pueden afectar el rendimiento del sistema (Chow, 2010).

Otro aspecto de este diseño es el mantenimiento y la antigüedad de la infraestructura. Los materiales deben seleccionarse para asegurar una amplia durabilidad, resistir la corrosión y otros factores ambientales dañinos, así como facilitar los problemas de operación y servicio. Además, se debe asegurar la modularidad en el diseño del sistema para que pueda ser fácilmente ampliado o modificado en el futuro, sin destruir la funcionalidad de la red existente. El monitoreo y control de datos a través de herramientas como sensores de flujo y sistemas de alerta temprana ayuda a gestionar proactivamente la utilización de recursos de infraestructura y el uso de la infraestructura con anticipación (Rossman, 2015).

Por último, pero no menos importante, el uso real de estos sistemas de drenaje para gestionar está estrictamente regulado y aplicado por leyes y el medio ambiente para proteger la salud humana y el entorno natural. Un marco de estándares de construcción armoniosos que armonice los estándares a nivel global y local ayuda a abordar los efectos negativos en la reducción del entorno urbano y la sostenibilidad del área urbana.

En consecuencia, contribuye a las políticas públicas que tienen como objetivo mejorar la infraestructura de salud, lo cual es esencial para evitar riesgos de salud y desastres hídricos, y mejorar la calidad de vida de los seres humanos (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020).

3.1.1 CRITERIOS HIDRÁULICOS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

El diseño hidráulico de alcantarillado tiene como objetivo garantizar la liberación segura de aguas residuales y pluviales. Dichos criterios se derivan del análisis del flujo de agua en tuberías y conductos e incluyen propiedades de sección, pendiente y rugosidad superficial, y definen la tasa y velocidad de flujo. El uso adecuado de estos conceptos contribuye a evitar problemas de rendimiento como estancamiento, sedimentación y erosión, que son críticos para mitigar los problemas de salud y desastres hídricos, y con ello, aumentar la calidad de vida de las personas y la sociedad (Tchobanoglous, Burton & Stensel, 2014).

Uno de los conceptos más utilizados para el análisis hidráulico en sistemas de alcantarillado se encuentra la ecuación de Manning, la cual permite evaluar el caudal “Q” en función del área de la sección transversal “A”, el radio hidráulico “R”, la pendiente hidráulica “S” y el coeficiente de rugosidad “n”. Esta relación se formula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

Esta formulación resulta de gran utilidad en el diseño de sistemas de flujo a gravedad, ya que posibilita definir el diámetro y la pendiente necesarios para transportar el caudal calculado, adaptándose a las condiciones de operación de la red (Chow, 2010).

De manera complementaria, la ecuación de Chezy se aplica para evaluar el comportamiento del flujo en tuberías y canales. Su expresión es:

$$V = C\sqrt{RS}$$

donde “V” es la velocidad del flujo, “C” es el coeficiente de Chezy, “R” es el radio hidráulico y “S” la pendiente. Aunque presenta fundamentos similares a la ecuación de Manning, la formulación de Chezy adquiere relevancia en estudios comparativos y en contextos donde es necesario comprobar o ajustar las estimaciones obtenidas mediante

otros métodos de análisis. Ambas ecuaciones, al estar relacionadas, constituyen un soporte concreto para el análisis del comportamiento hidráulico en redes de drenaje (Chow, 2010; Tchobanoglous et al., 2014).

Un aspecto esencial en el diseño de sistemas de alcantarillado es el comportamiento de tuberías parcialmente llenas. Sin embargo, en casi todos los sistemas de flujo por gravedad, las tuberías no alcanzan su capacidad total, sino que existen en un área entre el 70% y el 85% de llenado según las regulaciones vigentes. En estos escenarios, la relación entre el área de flujo y la profundidad del líquido varía, creando variabilidad en el cálculo del radio hidráulico efectivo y, finalmente, en las tasas de flujo y velocidades. Los procedimientos de integración y el análisis numérico permitieron adaptar la ecuación de Manning a condiciones de flujo parcial mediante la incorporación de fluctuaciones en el área de flujo transversal. La validación de estos ajustes mediante simulación (por ejemplo, el software EPA-SWMM) apoya la capacidad de los ingenieros para diseñar sistemas de drenaje seguros, eficientes y resilientes con diferentes tipos de operaciones (Tchobanoglous et al., 2014; U.S. EPA, 2021).

3.1.2 CRITERIOS HIDROLÓGICOS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

Los criterios hidrológicos considerados en el diseño de sistemas de drenaje urbano son principalmente necesarias para diseñar flujos que permitan evacuar el agua de lluvia de manera más efectiva. El análisis de la intensidad de la lluvia mediante curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) es de importancia esencial, ya que permite la relación estadística de la probabilidad de ocurrencia de lluvias de diferentes magnitudes y duraciones. Estas curvas, derivadas de datos de precipitación pasados, ayudan a predecir el flujo de diseño durante eventos severos, lo cual es crítico para el dimensionamiento adecuado del sistema de drenaje (Chow, 2010; García et al., 2021).

En la actualidad, varios estudios y marcos, especialmente el INAMHI, han producido bases de datos pluviométricas que permitieron la construcción de curvas IDF específicas para cada región, considerando la variabilidad climática y geográfica del país. En las áreas urbanas, la impermeabilización del suelo, que intensifica el escurrimiento superficial y disminuye la capacidad de infiltración, acentúa aún más su importancia. El método racional es el método más común en este campo utilizado para determinar el

flujo máximo de escorrentía en pequeñas áreas de captación, típicamente de menos de 200 hectáreas (aproximadamente 2 km²), como se encuentra a menudo en los centros urbanos. Esta fórmula básica se expresa de la siguiente manera:

$$Q = CIA$$

donde “Q” es el caudal de diseño, “C” es el coeficiente de escorrentía que manifiesta la capacidad del terreno estudiado para generar escorrentía, “I” es la intensidad de la lluvia en un período de tiempo determinado y “A” es el área de la cuenca en estudio. Este análisis resulta especialmente útil en áreas urbanas, donde la alta impermeabilización y urbanización del suelo incrementa los valores del coeficiente “C” y, por ende, la cantidad de agua que se convierte en escorrentía directa hacia las tuberías (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2014).

El método racional junto con las curvas IDF, sirve como base para los caudales de diseño, ya que abarca la variabilidad de la precipitación y las propiedades del terreno. El coeficiente de escorrentía "C" varía con el uso del suelo y la topografía (más alto en regiones altamente urbanizadas con superficies impermeables y mayor tendencia a inundaciones). En este sentido, el trabajo reciente propuso algunos cambios en el nivel normal de "C" para reflejar con mayor precisión el entorno de urbanización actual (García et al., 2021; Torres et al., 2020).

El EPA–SWMM incluye parámetros tomados tanto del método racional como de las curvas IDF no solo para una simulación detallada de la escorrentía superficial, sino también para la representación dinámica de posibles flujos de agua en una variedad de condiciones hidrológicas y geográficas. En otras palabras, el software es capaz de modelar la conversión del agua de lluvia en escorrentía dependiendo de ciertas condiciones de precipitación, tipos de suelo, urbanización, etc., y características topográficas del área de estudio.

Además, el modelo puede ser parametrizado para modificar muchas cosas, con el fin de analizar la formación y el comportamiento de las corrientes en barrios urbanos concurridos, periurbanos y áreas rurales. Así, el EPA-SWMM no solo calcula el volumen y el flujo en un punto particular, sino que también simula cómo estas corrientes pueden moverse, fusionarse o separarse a lo largo de un sistema de drenaje y/o canales, vías fluviales naturales y artificiales. Esto es crítico para el diseño, exploración y optimización de infraestructuras hidráulicas y de saneamiento urbano, así como para su gestión y

minimización en caso de eventos de lluvia severa y posibles inundaciones, mejorando así la resiliencia urbana. (U.S. EPA, 2021; García et al., 2021).

3.1.3 MÉTODO TRADICIONAL DE DISEÑO Y OBTENCIÓN DE CAUDALES

Basado en sus procedimientos empíricos, el diseño convencional de los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial se basa en procesos de cálculo de caudales máximos que han sido definidos en las normativas ecuatorianas, destacando principalmente las Normas de Diseño para Sistemas de Alcantarillado de EMAAP Q, que es esencialmente en lo que se basa este estudio, y la Norma INEN 005 9 2011. Estas normativas establecen asignaciones unitarias, factores de magnificación y criterios hidráulicos mínimos que permiten dimensionar la red (utilizando hojas de cálculo) basándose en un caudal de diseño constante (para cada sección) y condiciones de flujo uniforme o gradualmente variado.

Caudal Sanitario

En el caso del alcantarillado sanitario, el caudal de diseño se obtiene a partir del caudal diario promedio calculado con la población del proyecto, la dotación unitaria de agua potable y el coeficiente de retorno, considerando las contribuciones industriales, comerciales, institucionales, conexiones erróneas e infiltración según el Título 4 de las Normas EMAAP Q. Sobre este caudal promedio, se aplican coeficientes de pico o simultaneidad para obtener el caudal máximo horario o diario, análogo a los factores propuestos en la literatura clásica (como Harmon o Babbitt), y se calculan los flujos por sección acumulando las contribuciones de viviendas o áreas servidas a lo largo de la red, siguiendo el "método de área unitaria" según las regulaciones.

Caudal pluvial

El caudal pluvial se determina mediante el método racional clásico, $Q=C \cdot I \cdot A$, recomendado en EMAAP Q y la norma INEN 005 9 2011 aplicable para áreas urbanas menores de 200 hectáreas. El área de drenaje contribuyente se define para cada sección del colector, el tiempo de concentración se estima en función de la longitud de escorrentía, la pendiente y la rugosidad de la superficie, y la intensidad se determina mediante curvas IDF de la estación Izobamba para períodos de retorno de 5, 10 y 25 años dependiendo de los criterios de riesgo y nivel de servicio de las regulaciones. Dicho

método corresponde al marco conceptual presentado por Jainet (2018) y también por Freire y Antunes do Carmo (2019), donde el método racional se considera una aproximación estática al flujo pico producido por un evento de lluvia uniforme con una duración igual al tiempo de concentración.

Sistemas combinados sanitario – pluvial

En sistemas combinados, o en redes sanitarias que reciben aportes pluviales por conexiones erradas, el caudal de diseño se obtiene superponiendo el caudal sanitario máximo con el caudal pluvial correspondiente al evento de diseño, tal como se establece en los Títulos 5 y 6 de las Normas EMAAP-Q. En la práctica tradicional se asume que cada tramo opera con un único caudal de proyecto que considera ambas contribuciones, manteniendo el análisis en régimen permanente y verificando únicamente que las velocidades y profundidades resultantes cumplan con los rangos mínimos y máximos permitidos.

Hipótesis del enfoque tradicional

El enfoque de diseño convencional se apoya en un conjunto de hipótesis simplificadoras que condicionan los resultados: para cada tramo se adopta un caudal de pico, sin representar explícitamente la forma temporal del hidrograma, y se supone flujo uniforme o gradualmente. El tiempo de concentración se utiliza exclusivamente como herramienta para obtener la intensidad de lluvia en el método racional, incrementándolo progresivamente de aguas arriba hacia aguas abajo a medida que aumenta la longitud y el área drenada de la cuenca, pero sin tratarlo como una variable dinámica de simulación, lo que limita la capacidad del método tradicional para capturar fenómenos transitorios como ondas de avenida, almacenamiento en tuberías y desbordes locales.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE EPA-SWMM

3.2.1 GENERALIDADES Y EVOLUCIÓN DEL MODELO

El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales, que forma parte del programa EPA SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales), se utiliza para simular y gestionar sistemas urbanos de aguas pluviales bajo condiciones dinámicas y no estacionarias, tanto para escenarios reales como simulados. Originalmente creado para cuantificar la gestión de aguas pluviales, se ha convertido ahora en una solución computacional para integrar

hidrología, hidráulica y calidad del agua en un modelo dinámico coherente. Para ingenieros y urbanistas que buscan refinar sus diseños y operación de infraestructuras de drenaje o identificar puntos críticos importantes para la sobrecarga de agua, así como escenarios de cambio climático o un entorno urbano mejorado, su facilidad de uso y su capacidad para simular la situación en detalle son beneficiosas. EPA SWMM permite modelar la generación de escorrentía en subcuencas, la confluencia dinámica de corrientes para redes de tuberías y canales, la distribución de contaminantes en cuerpos de agua receptores y la influencia de estructuras de control (tanques de retención y bombas). Parámetros de entrada utilizados para generar eventos climáticos reales o simulados basados en curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia). La capacidad de modelar flujos subcríticos y críticos y añadir componentes de control como reguladores de flujo, pozos de inyección y compuertas automáticas, proporciona una evaluación completa sobre la eficiencia operativa, la resiliencia y la sostenibilidad del sistema de alcantarillado en respuesta a eventos extremos.

3.2.2 FUNDAMENTO MATEMÁTICO: ECUACIONES DE SAINT-VENANT

La precisión de las simulaciones en EPA SWMM se asume por la resolución numérica de las ecuaciones de Saint Venant, que predicen el flujo no permanente en conductos abiertos o cerrados. Estas ecuaciones describen la variación temporal del flujo y la profundidad del agua, que los enfoques de diseño en estado estacionario tienden a subestimar. La conservación de la ecuación de continuidad o de masa para una sección de conducto se da por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

donde “A” es el área de la sección transversal, Q el caudal en el conducto, q el aporte lateral, t el tiempo y x la distancia a lo largo del conducto. Esta ecuación garantiza que la variación temporal del volumen almacenado en un tramo, más el caudal que sale, sea igual a los aportes externos como lluvia o conexiones domiciliarias.

donde g es la aceleración de la gravedad, h la altura de la lámina de agua, Sf la pendiente de fricción y S la pendiente de fondo del conducto. Los términos representan, respectivamente, la aceleración local, la aceleración convectiva, las fuerzas de presión y la diferencia entre fuerzas gravitacionales y de fricción a lo largo del conducto. La

pendiente de fricción se calcula con la ecuación de Manning en régimen permanente como se describe a continuación:

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R h^{4/3}}$$

donde n es el coeficiente de rugosidad y Rh el radio hidráulico.

3.2.3 TIPOS DE ENRUTAMIENTO DE FLUJO EN EPA-SWMM

Los tres esquemas de enrutamiento de EPA SWMM para resolver ecuaciones de flujo en tuberías tienen diferentes grados de complejidad y costos computacionales. El enrutamiento por onda cinemática, aunque rápido en términos de tasa de flujo, no tiene en cuenta los fenómenos de remanso o las inversiones de flujo, ya que omite los términos de aceleración local y convectiva y asume que la pendiente de fricción es aproximadamente igual a la pendiente del lecho. El enrutamiento por onda dinámica simplificada captura el término de aceleración convectiva mientras mantiene algunas simplificaciones, ofreciendo un equilibrio entre precisión y velocidad, por lo que a menudo se emplea en simulaciones de drenaje urbano que tienen geometrías relativamente simples. El enrutamiento por onda dinámica completa resuelve las ecuaciones de Saint Venant sin simplificaciones y puede abordar fenómenos transitorios complejos, incluidos los cambios de régimen, el almacenamiento en tuberías y los impactos de remanso, pero implica pasos de tiempo más pequeños y una mayor carga computacional.

3.2.4 ESQUEMA NUMÉRICO Y CRITERIOS DE ESTABILIDAD

EPA-SWMM utiliza un esquema numérico implícito de diferencias finitas para integrar las ecuaciones en el tiempo y el espacio, lo que mejora la estabilidad en flujos rápidos y redes extensas. Para evitar inestabilidades se ocupa un paso de tiempo adaptativo que se reduce automáticamente en zonas de rápida variación y se verifica un criterio de Courant aproximado tal como se expone continuación:

$$C = \frac{v \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Donde:

v: celeridad de onda

Δt: paso del tiempo

Δx : longitud de calculo

Además, se controla la convergencia iterativa y, si el error relativo en caudales o profundidades supera un umbral prefijado, el modelo disminuye el paso de integración para mejorar la solución.

3.2.5 COMPONENTES DEL MODELO: SUBCUENCAS, NODOS Y TUBERÍAS

La idea de EPA SWMM es un modelo de drenaje urbano que representa diferentes subcuencas, nodos y conductos, que están interconectados entre sí. Las subcuencas representan áreas que producen escorrentía superficial y representan procesos de lluvia-escorrentía, infiltración, almacenamiento superficial y evapotranspiración, y el hecho de que una subcuenca o una colección de subcuencas libera su hidrograma solo a uno o varios nodos, pero no directamente a las tuberías. Estos nodos son puntos de confluencia donde el flujo de subcuencas, tuberías y otras fuentes externas convergen y a través de los cuales se distribuyen al resto de la red o a puntos de descarga. En EPA SWMM, se incluyen varios nodos como pozos de registro, puntos de descarga, elementos de almacenamiento y estaciones de bombeo; en cada uno de estos hay un flujo base definido, patrones horarios, diarios y estacionales. Las tuberías o conductos conectan nodos sucesivos y transfieren flujos de acuerdo con las ecuaciones de Saint Venant, definidas por su geometría, rugosidad de Manning y longitud, y niveles de inversión en cada extremo por los cuales fluye.

3.2.6 DATOS DE ENTRADA EN EPA-SWMM

Para cada subcuenca como datos de entrada se especifican: el área de drenaje, la pendiente media, el porcentaje impermeable, la profundidad de almacenamiento superficial, la rugosidad de Manning y la longitud de flujo media, parámetros que controlan la forma del hidrograma de escorrentía. La lluvia se introduce mediante hidrogramas que pueden ser series observadas o sintéticas derivadas de curvas IDF, con resoluciones temporales que se consideran a criterio del diseñador que van desde minutos hasta una hora o más, según el tipo de evento que se desee analizar.

El modelo permite elegir diferentes formulaciones de infiltración, como Horton, Green-Ampt o CN-SCS, de acuerdo con las características del suelo y la cobertura del terreno

en análisis. Los caudales sanitarios se asignan a nodos específicos mediante un caudal base asociado a la población servida y patrones horarios que por lo general han sido previamente calculados, semanales y estacionales, que permiten reproducir la variabilidad del consumo de agua y de la generación de aguas residuales, algo que el diseño tradicional con un único caudal pico por tramo no puede representar.

3.2.7 CAPACIDADES AVANZADAS Y APLICACIONES

EPA SWMM está equipado con características de última generación, por ejemplo, simulación de estructuras de control de flujo, dispositivos de drenaje urbano sostenible, tanques de retención y estaciones de bombeo para estudiar alternativas de mitigación de inundaciones y mejorar la calidad del agua. El análisis y la optimización de tales diseños se pueden lograr variando sistemáticamente los parámetros de entrada y realizando análisis de sensibilidad y optimización, con el fin de evaluar la robustez del diseño ante variaciones en la lluvia, coeficientes de escorrentía o patrones de demanda. Este enfoque numérico ha demostrado su capacidad potencial para predecir mejor los flujos máximos, los niveles de inundación y la efectividad de las medidas de control, reducir los riesgos operativos y planificar estrategias de reducción de riesgos y planes de adaptación al cambio climático en áreas urbanas.

3.3 NORMATIVA VIGENTE EN EL ECUADOR

Las regulaciones actuales de Ecuador respecto a los sistemas de drenaje y cómo abordan las leyes y regulaciones técnicas vigentes están alineadas con la legislación y los estándares tecnológicos en protección ambiental, protección de la salud pública para proteger a la sociedad y subrayar el proceso eficiente de eliminación de aguas residuales. La incorporación de esta autoridad reguladora se aplica al diseño, construcción, operación y mantenimiento de los drenajes, lo cual se basa en regulaciones que proporcionan orientación legal y técnica para el desarrollo de sistemas de drenaje que reflejarán las condiciones climáticas y geográficas únicas del país. Se requiere una implementación efectiva de estas directrices para hacer frente a las complicaciones de la diversidad ambiental y de uso del suelo del desarrollo urbano de Ecuador y el creciente uso del suelo y la población en las ciudades ecuatorianas

(Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020) como se refleja en los estudios actuales (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020).

La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 005-9:2011 es una de las regulaciones más destacadas al proporcionar criterios específicos para la evaluación y diseño de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial. Establece conceptos esenciales como la identificación de caudales de diseño, materiales de diseño y parámetros hidráulicos para asegurar un sistema de evacuación seguro y efectivo. Las directrices delineadas por este régimen regulador se basan en estudios hidrológicos y análisis empíricos, asegurando que los esquemas de infraestructura estén adaptados a las diversas realidades dentro del territorio geográfico ecuatoriano (INEN, 2011). En la Tabla N° 3.1 se presentan de manera detallada las principales normativas aplicables al diseño de sistemas de alcantarillado.

Tabla 3.1 Normativas utilizadas en el Ecuador para el diseño de sistemas de alcantarillado

Nacionales	Internacionales
Norma CO-10-7-601 población mayor a 1000 habitantes	RAS 2016, TÍTULO D-E-F. COLOMBIA
Norma CO-10-7-602 área rural	Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONGUA, MÉXICO
Normas Alcantarillado EMAAP-Q	Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano,
Para materiales: INEN 2496 TAPAS POZOS, INEN 030-2011 TUBERÍAS, nte_inen_2360_tub alcantarillado extracto	CEDEX(Centro de estudios y experimentación de obras públicas), ESPAÑA.

Fuente: Propia.

La legislación de Ecuador se apoya en un trasfondo teórico e incluye políticas como el Código Orgánico del Ambiente, que aboga por el uso sostenible de los recursos hídricos y la gestión de residuos líquidos. Establece normas que imponen algunas precauciones y acciones correctivas que deben incluirse en la construcción de infraestructuras con la intención de minimizar las consecuencias ecológicas de ciertas actividades en la ciudad. La aplicación de tales regulaciones protege el medio ambiente, además de crear sistemas de monitoreo y control en los que los supervisores de planificación urbana deben cumplir con estándares de calidad y sostenibilidad (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020).

La creciente urbanización y la presión creciente por la cual nos vemos obligados a hacer uso de los sistemas de drenaje urbano hacen que las regulaciones actuales en Ecuador sean una herramienta importante para prevenir la contaminación y los problemas de salud pública relacionados con la descarga de residuos y aguas pluviales. La estricta aplicación de estas normas en las obras de drenaje contribuye a mejorar la adaptabilidad de la infraestructura, aumentando la utilización de los recursos disponibles y el mantenimiento del sistema en circunstancias adversas como actividades de precipitación extrema. Integrar criterios técnicos y ambientales en un marco regulatorio estable es fundamental para el desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida en las ciudades de Ecuador (García et al., 2019; Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2020).

3.4 REVISIÓN DE PROYECTOS SIMILARES

La validación y aplicabilidad del SWMM para sistemas de drenaje pluvial y sanitario en entornos urbanos también ha sido validada con la ayuda de varios estudios de investigación en los últimos años en el contexto de América Latina y Europa, arrojando ideas críticas sobre el alcance, límites y ventajas del SWMM sobre métodos convencionales. Huber Plaza Villamizar (2021) proporciona una visión general sobre la aplicación del EPA SWMM de hidrología y hidráulica urbana avanzada en Colombia para facilitar el diagnóstico de puntos críticos de inundación y la propuesta de soluciones estructurales, destacando la susceptibilidad a la calibración de parámetros, así como el problema de la calidad de los datos de entrada. Una comparación de estudios de caso sugiere que los modelos realizados con SWMM son mejores para predecir escenarios extremos y estimar infraestructuras resilientes (Ochoa Vásquez, 2023; Calle Rivero,

2019), ya que las metodologías tradicionales subestimarían los caudales de diseño durante tormentas intensas, que son representadas por un modelo con variabilidad tanto temporal como espacial. Un resultado común es comparar el rendimiento de respuesta hidráulica de simulaciones tradicionales (método racional, hojas de cálculo) con modelado dual o dinámico en SWMM, reconociendo avances tanto en la calidad de los cálculos de balance de continuidad como en la visualización de sobrecargas localizadas y condiciones de flujo no uniforme. No obstante, algunos autores advirtieron que la mayor complejidad del modelado computacional también podría significar más calibración y análisis de sensibilidad; se requiere una validación adicional con datos de campo para aplicar los resultados en decisiones de planificación urbana. Se ha publicado investigación orientada hacia la adopción reciente del EPA SWMM y la adaptación de criterios de sostenibilidad (SUDS) por SWMM que describe la herramienta hacia la realización de enfoques sostenibles a través de mecanismos de control inducidos por el cambio climático y relacionados con la rápida urbanización (por ejemplo, Bermeo Cuzco, 2024). Esto se alinea con la literatura global que ubica al SWMM como una medida de referencia para la comparación de soluciones de drenaje tradicionales con alternativas basadas en la naturaleza. Finalmente, recientemente, hemos demostrado que el EPA SWMM puede proporcionar buenas referencias para la simulación hidro-hidráulica urbana debido a la facilidad y disponibilidad de adaptación al contexto ambiental y optimización de recursos y el esfuerzo hacia la prevención de riesgos de inundación; sin embargo, con el problema del acceso a registros de calidad y series históricas para obtener un resultado confiable. Se recomiendan más comparaciones y experiencias de aplicación, entre otras, en la publicación de trabajos y recursos de referencia. A continuación, en la tabla 3.2 se puede observar una tabla comparativa de estudios previos que han sido realizados.

Tabla 3.2 Tabla comparativa de estudios previos entre diseño convencional y Epa Swmm.

Autor y año	País/Caso de Estudio	Método convencional	Modelación con EPA SWMM	Principales hallazgos
Huber Plaza Villamizar (2021)	Colombia, simulación de inundaciones urbanas	Método racional, hojas de cálculo, sobredimensionamiento de caudales, sin análisis dinámico	Simulación detallada de hidrología e hidráulica urbana, escenarios múltiples, calibración con datos locales	EPA SWMM mejora la identificación de puntos críticos y optimiza soluciones; precisa para eventos de lluvia intensa.

Ochoa Vásquez (2023)	Ecuador, Bullcay	Diseño estático con parámetros estándar, subestima caudales en eventos extremos	Modelación dual, integración de aguas residuales y pluviales, simulación dinámica	SWMM permite escenarios más realistas, muestra mayor eficiencia hidráulica y capacidad de adaptación.
Calle Rivero (2019)	Ecuador, comunidad urbana	Calculadora manual, diseño según normativa, análisis simplificado	Simulación no permanente, integración de variables locales y temporales	SWMM mejora la precisión en el diseño y facilita el análisis de sobrecargas locales.
Universidad Politécnica de Cartagena (2021)	España, El Algar	Método racional y empirismo, dificultad en representación de eventos no estacionarios	Modelación dual urbana, simulación dinámica no permanente	Permite validar infraestructura y prever inundaciones, con soporte digital y visualización gráfica.
Concha y Gómez (2011)	Chile, modelo hipotético	Análisis tradicional, simplificaciones en redes y flujos	Simulación de drenaje dual, integración de escenarios de cambio climático	SWMM facilita evaluación de alternativas y estrategias sostenibles.

Fuente: Propia.

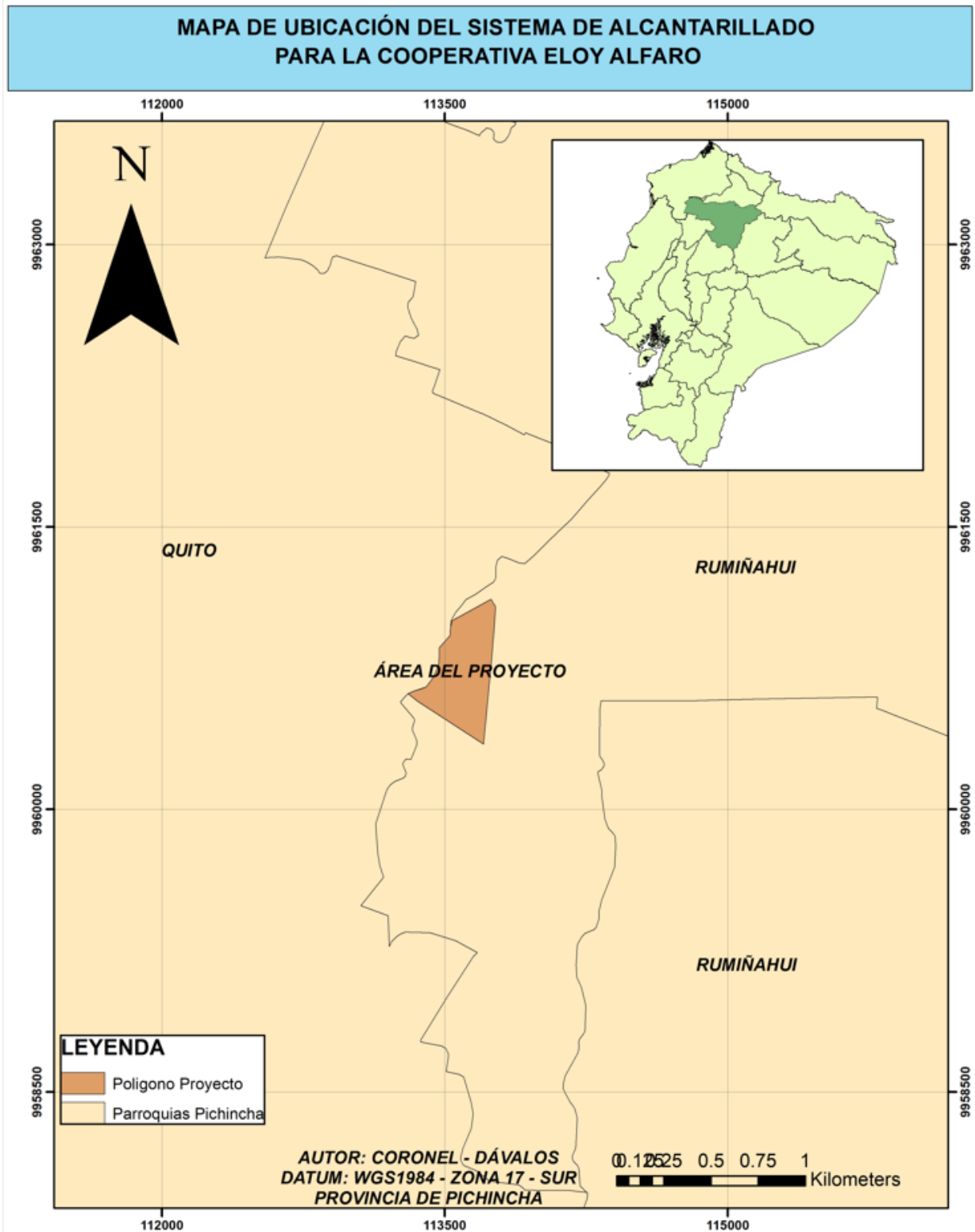
4 MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

4.1.1 UBICACIÓN POLÍTICO ADMINISTRATIVO

El campo de estudio es parte de la Cooperativa Eloy Alfaro en el cantón Rumiñahui, de la provincia de Pichincha en Ecuador. Este territorio se caracteriza por un alto nivel de diversidad y un clima cálido con fuertes lluvias en algunos días lluviosos que saturan las redes de alcantarillado. El área se desarrolló rápidamente para ser habitada y la ciudad ha ganado muchos nuevos asentamientos industriales con personas nuevas y antiguas, el área de desarrollo se ha vuelto cada vez más difícil de controlar sus aguas residuales y pluviales con una zona de asentamiento encima de ella con múltiples pendientes. La topografía que varía de pendientes moderadas a significativas, el comportamiento hidrográfico de la cuenca cambia, con la cuenca actuando como una cuenca con diferentes capacidades hidrológicas, creando complejidades para el tratamiento de drenaje. Estos factores junto con la concentración de población y la intensidad de las actividades económicas indican la necesidad del establecimiento de infraestructuras eficientes. Dadas estas circunstancias, el gobierno local ha promovido soluciones concretas de planificación urbana y saneamiento, combinando modelado computacional sofisticado (por ejemplo, EPA-SWMM) para cumplir con la política y prácticas ambientales nacionales e internacionales. (GAD Rumiñahui, 2020). En la figura 4.1, se revela la ubicación de la cooperativa Eloy Alfaro.

Figura 4.1: Mapa de ubicación del sistema de alcantarillado.



Fuente: Propia.

4.1.2 DELIMITACIÓN TERRITORIAL E HIDRO SOCIAL

La historia y el entorno social del cantón han experimentado muchos cambios en los últimos años. Tradicionalmente una zona rural, una urbanización muy rápida del cantón ha llevado a la integración cercana de los pueblos indígenas cercanos en el cantón. La realidad de estas dos condiciones ha producido nuevas clases de sujetos sociales con diferentes intereses y necesidades, provocando conflictos en la distribución de recursos, la implementación de proyectos y el uso del suelo. En el Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Rumiñahui 2020, estos temas forman la base de la realidad histórica en el área como problemas debido al desafío del equilibrio y la sostenibilidad (Plan de Ordenamiento Territorial 2020; GAD Rumiñahui, 2020).

Las organizaciones políticas han sido fundamentales en la formulación de políticas locales y la resolución de conflictos en este sentido. Los órganos estatales como el Gobierno Autónomo Descentralizado de Rumiñahui se encuentran con aquellos en el liderazgo informal y cuerpos comunitarios que (a través de la negociación y la movilización) intentan influir en la toma de decisiones y la implementación de nuevos proyectos que los integrarían en el proceso de desarrollo. Pero el problema tiene que ver con la utilización de la tierra y los recursos y, por lo tanto, desencadena confrontaciones entre entidades. Esto refuerza la importancia del diálogo continuo y la participación activa de los actores hacia una planificación espacial adecuada que considere colectivamente sus necesidades y, a su vez, el potencial para un desarrollo sostenible.

El Cantón Rumiñahui está situado en el valle interandino de Los Chillos y experimenta un clima templado húmedo de tierras altas, con predominio del régimen ecuatorial mesotérmico húmedo en aproximadamente tres cuartas partes de su superficie. La temperatura media anual oscila entre 14 y 16 °C, con valores típicos alrededor de 15–16 °C en el área urbana de Sangolquí, mientras que en los días más cálidos alcanza alrededor de 23 °C y durante la noche las mínimas pueden bajar a unos 8 °C.

En el aspecto hidrometeorológico, la precipitación media anual del cantón es de aproximadamente 1,000 mm, con picos relativos en los meses de abril y octubre y una estación seca más intensa entre junio y agosto, creando así un régimen bimodal típico de los valles interandinos. Estas condiciones favorecen una cobertura vegetal siempre verde en las cercanías de la Cooperativa Eloy Alfaro, pero también implican la ocurrencia de

eventos de lluvia intensa durante los períodos húmedos, los cuales son cruciales para dimensionar el sistema de drenaje pluvial y establecer los períodos de retorno utilizados en este estudio.

4.2 METODOLOGÍA

Dado que el presente trabajo se basa en la recopilación, procesamiento y análisis de datos hidrológicos e hidráulicos que permiten el modelado de sistemas de alcantarillado convencional desarrollados en hojas de cálculo en EPA-SWMM, la investigación propuesta se posiciona como parte de la investigación aplicada cuantitativa. Hernández, Fernández y Baptista (2014) afirmaron que la investigación aplicada utiliza teorías, leyes y técnicas establecidas para resolver problemas específicos, y que en este caso se prefirió esta metodología a un diseño experimental, ya que las variables del estudio no fueron manipuladas deliberadamente, solo analizadas en base a la información disponible en un momento específico.

El trabajo se realizó en la Cooperativa Eloy Alfaro en el cantón Rumiñahui, donde el diseño de alcantarillado existente era uno convencional, basado en Excel. El modelo se utilizó para generar un sistema comparativo en EPA-SWMM para comparar el rendimiento de cada enfoque en términos de eficiencia hidráulica, fiabilidad y sostenibilidad.

Este estudio utilizó una metodología cuantitativa y aplicada para comparar el rendimiento hidráulico de sistemas de alcantarillado desarrollados y diseñados con hojas de cálculo y regulaciones, y desarrollados con EPA-SWMM. Los pasos en esta investigación seguidos a nivel secuencial y sistemático son los siguientes:

1. **Recolección de Datos:** Recopilación de información topográfica de la Cooperativa Eloy Alfaro. Se están recopilando registros históricos de precipitaciones (INAMHI) y se desarrollan curvas IDF. Análisis del registro de uso del suelo, datos de cobertura; cálculo de coeficientes de escorrentía y parámetros hidráulicos.
2. **Determinación y Procesamiento de Caudales:** Estimación de caudales máximos de escorrentía mediante la técnica racional según la norma ecuatoriana INEN 005-92011 y SENAGUA 2012. Los coeficientes de escorrentía y tiempos de concentración calculados para varias subcuencas de estudio.

3. **Diseño Convencional:** Procedimientos tradicionales aplicados en hojas de cálculo para dimensionar diámetros, pendientes y capacidad hidráulica de toda el área de trabajo de alcantarillado sanitario y pluvial. Verificación del diseño con normas y parámetros recomendados.
4. **Modelado en EPA SWMM:** Parametrización de subcuencas y redes de drenaje en el software EPA SWMM que utiliza datos de entrada existentes. Simulación de condiciones de lluvia (período de recurrencia a 5, 10, 25 años , tiempo de concentración/ duración de tormenta de 12 minutos y 24 horas) .El modelado con estos periodos de tiempo significan un periodo coherente con lo establecido en las normativas ecuatorianas adicionalmente considerando periodos de retorno de 10 y 25 años con el fin de representar eventos de lluvia más severos y así evaluar el sistema frente a escenarios de riesgo medio y alto. De esta manera el periodo de 5 años permite la comparación directa con el diseño tradicional de alcantarillado mientras que los periodos de 10 y 25 años amplían el análisis hacia las condiciones de lluvia extrema, más acordes con los criterios que se manejan en la actualidad de gestión de riesgo y sobre todo la adaptación al cambio climático en entornos urbanos. simulaciones hidrológicas urbanas en el modelo SWMM.

Para las subcuencas, se elige el modelo Green-Ampt de EPA-SWMM porque considera las propiedades físicas obtenidas de la ecuación de Richards y se basa en parámetros con importancia hidráulica directa, como la conductividad hidráulica saturada, la succión capilar en el frente de humedecimiento y el déficit inicial de humedad del suelo. A diferencia de los modelos puramente empíricos como Horton o el método CN-SCS, Green-Ampt permite que la capacidad de infiltración se asocie con la condición textural y de humedad del suelo y es adecuado para su uso en cuencas urbanas donde coexisten áreas permeables y superficies compactadas. Varios estudios han establecido la efectividad del modelo SWMM-Green-Ampt para el análisis de la escorrentía de aguas pluviales urbanas con un rendimiento aceptable en la estimación de caudales máximos y volúmenes de escorrentía, cuando se han proporcionado parámetros calibrados o estudios geotécnicos representativos. Green-Ampt puede justificarse además ya que el objetivo principal es comparar el diseño convencional con un modelo

de evento de tormenta hidrológico-hidráulico, y la inclusión de Green-Ampt no está necesariamente destinada a series continuas a largo plazo; por lo tanto, el esquema de infiltración deberá ajustarse adecuadamente según las simulaciones a escala de eventos.

5. **Calibración y Análisis de Resultados:** Calibración de los resultados del modelo EPA SWMM con valores de diseño tradicional y ajuste de parámetros según regulaciones. Análisis de caudales, velocidades y rendimiento de la red bajo diferentes lluvias, e identificación de cuellos de botella, sobrecargas y eficiencias. Se evalúa el error de continuidad y el balance de volumen para asegurar que las simulaciones sean estables y confiables.
6. **Comparación y Síntesis:** Una comparación extensa entre los resultados hidráulicos de los dos métodos (el tradicional y SWMM) en tablas y figuras. Se discuten las ventajas y limitaciones de cada técnica, así como sugerencias para utilizar el modelado computacional en futuras intervenciones urbanas.

4.2.1 PROCESAMIENTO HIDROLÓGICO

Las regulaciones ecuatorianas utilizan tres enfoques distintos para estimar el flujo de escorrentía superficial directa: el método racional, el método del hidrograma unitario sintético y el análisis estadístico basado en registros observados (SENAGUA, 2012). Para el presente estudio, se adoptó el método racional, siendo apropiado para cuencas con un área de menos de 100 hectáreas, una condición que cumple la Cooperativa Eloy Alfaro, que tiene un área aproximada de 25 hectáreas.

4.2.2 MÉTODO RACIONAL

El método racional es uno de los procedimientos más utilizados a nivel mundial para la estimación de caudales de escorrentía en áreas urbanas de pequeña extensión. Se basa en la teoría de que la intensidad de la lluvia es uniforme sobre toda la superficie de la cuenca durante un tiempo igual o mayor al de concentración, de tal manera que el caudal máximo ocurre cuando toda el área contribuye al flujo en el punto de interés. La ecuación fundamental del método se expresa como:

$$Q = 0,00278 * C * I * A$$

Donde:

Q: Caudal de escurrimiento en m^3/s .

C: Coeficiente de escurrimiento (adimensional).

I: Intensidad de lluvia para una duración de lluvias, igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, en mm/h.

A: Área de la cuenca, en ha.

Su aplicación práctica ha permitido el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano en múltiples contextos, debido a su sencillez, rapidez de cálculo y eficacia para superficies reducidas (Chow, 2010).

Este enfoque es particularmente adecuado para cuencas de menos de 200 hectáreas y con condiciones homogéneas de pendiente, cobertura y precipitación, como es común en áreas urbanas y periurbanas. La variable C representa la proporción de lluvia que se convierte en escorrentía y depende del tipo de superficie (asfalto, concreto, áreas verdes), y la intensidad I se calcula en base a curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) obtenidas de registros pluviométricos. Aunque el método racional tiene limitaciones en cuencas extensas o con alta variabilidad espacial de la lluvia, su simplicidad lo convierte en una herramienta confiable y normativa en el diseño de alcantarillado pluvial, como es el caso en Ecuador según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 005-9:2011 y la guía SENAGUA (2012).

4.2.3 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

Una parte fundamental de la aplicación del método racional del proyecto es encontrar y calcular un coeficiente de escorrentía C que tenga en cuenta los múltiples factores hidrometeorológicos y el uso del suelo que afectan la generación de escorrentía, de manera integral. Este coeficiente refleja la proporción de precipitación que se convierte en escorrentía superficial y está condicionado por variables como la intensidad y duración de la lluvia, la humedad antecedente, la evaporación, la pendiente del terreno, así como las características morfológicas e infiltración del suelo. Estimar este valor correctamente es importante ya que una subestimación tendrá un gran efecto y puede implicar diseños hidráulicos insuficientes en respuesta a eventos de lluvia, mientras que una sobreestimación llevará a infraestructuras sobredimensionadas y aumentará el costo de los proyectos de drenaje innecesariamente.

De manera similar, el coeficiente de escorrentía varía según el uso del suelo y las características de la cobertura. En este sentido, la existencia de superficies impermeables, como calles pavimentadas y techos, contribuye a la escorrentía directa, mientras que las áreas permeables y las coberturas vegetales son reguladores naturales, apoyando la infiltración y reduciendo el volumen de escorrentía. La magnitud del caudal de diseño depende de la presencia de algunas depresiones topográficas que retienen agua temporalmente, la capacidad de retención del suelo y el grado de alteración antropogénica del territorio. Por esta razón, el cálculo de C no puede ser arbitrario; el cálculo debe basarse en un análisis más adecuado y equilibrado del contexto físico y ambiental de la cuenca para obtener resultados confiables que sean contextualmente relevantes. A continuación, en la tabla N°4.1 se presentan los valores del coeficiente de escorrentía según SENAGUA (2012)

Tabla 4.1: Valores del coeficiente de escorrentía

Tipo de zona	Valores de C
Zonas centrales densamente construidas, con vías y calzadas pavimentadas	0,7 – 0,9
Zonas adyacentes al centro de menor densidad poblacional con calles pavimentadas 0	0,7
Zonas residenciales medianamente pobladas	0,55 – 0,65
Zonas residenciales con baja densidad	0,35 – 0,55
Parques, campos de deportes	0,1 – 0,2

Fuente: Senagua et al., 2012.

Considerando las particularidades de la cooperativa Eloy Alfaro, se adopta un valor promedio entre los coeficientes presentados en la Tabla 4.2. Este proceso busca obtener un parámetro de escorrentía que considere de manera más precisa las condiciones reales del área, garantizando así un diseño de drenaje eficiente. La elección responde al criterio de mantener un enfoque conservador en el dimensionamiento del sistema, con el fin de asegurar su funcionamiento adecuado frente a diferentes escenarios de precipitación.

Tabla 4.2: Valores de “C” en cada una de las áreas de aporte

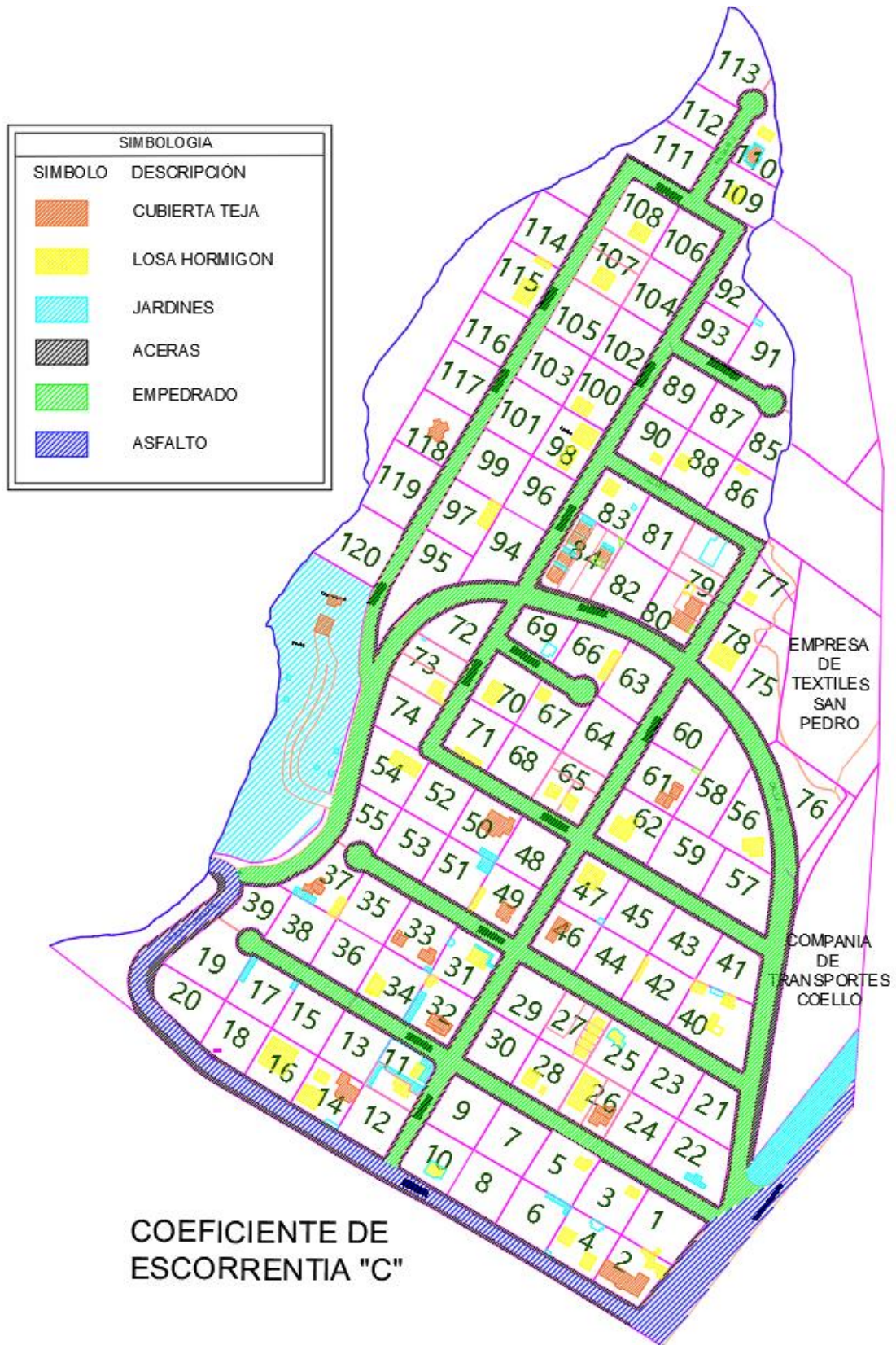
Área de Aporte	C
1	0.702
2	0.571
3	0.758
4	0.496
5	0.513

6	0.562
7	0.393
8	0.451
9	0.521
10	0.516
11	0.522
12	0.497
13	0.486
14	0.547
15	0.465
16	0.542
17	0.519
18	0.626
19	0.497
20	0.514
21	0.492
22	0.545
23	0.498
24	0.491
25	0.442
26	0.479
27	0.544
28	0.453
29	0.485
30	0.514
31	0.460
32	0.444
33	0.625
34	0.576
35	0.455
36	0.529
37	0.492
38	0.493
39	0.418
40	0.461
41	0.468
42	0.484
43	0.451
44	0.492
45	0.487
46	0.495
47	0.621
48	0.421
Promedio	0.52

Fuente: Propia.

En la figura 4.2 se aprecian las distintas superficies dentro de la cooperativa Eloy Alfaro que han servido para el cálculo del coeficiente de escorrentía.

Figura 4.2 Superficies en la cooperativa Eloy Alfaro



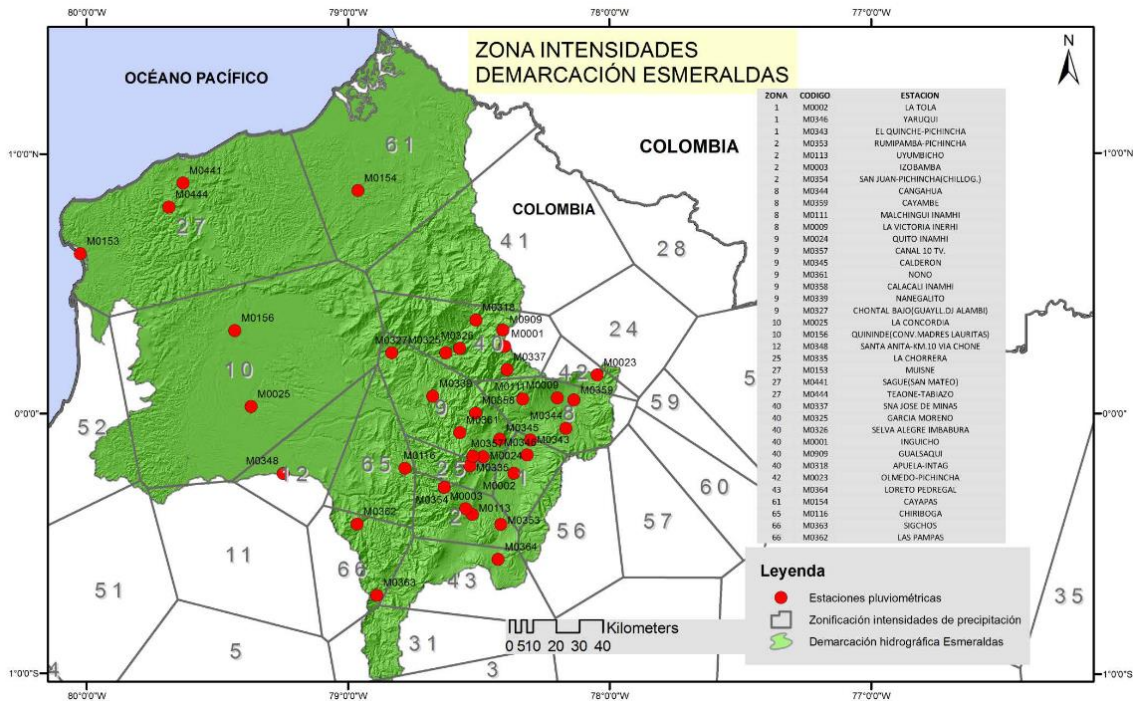
Fuente: Propia.

4.2.4 CÁLCULO DE INTENSIDADES DE LLUVIA

La lluvia se define como la cantidad de precipitación en un momento específico en milímetros durante una cierta duración. Esta escala, que puede ser en tiempo real o promediada, está relacionada al menos en parte con la duración de la tormenta, de tal manera que cuanto más tiempo tarda en llover, la intensidad de la tormenta tiende a disminuir (INAMHI, 2015). En un contexto de diseño hidráulico, la intensidad promedio de precipitación se observa ampliamente en relación con el tiempo de concentración de la región de estudio, ya que una vez que se alcanza ese tiempo, toda la cuenca contribuye al flujo de salida, y así se alcanza el pico de escorrentía de agua. Por lo tanto, el tiempo de concentración se define como el tiempo requerido para que el agua asentada en el punto más lejano de la cuenca entre en la salida del sistema de drenaje (SENAGUA, 2012). A su vez, el período de retorno, que también se conoce como intervalo de recurrencia o frecuencia, denota el número de años que deben pasar, en promedio, para que ocurra un evento de igual o mayor magnitud. Este parámetro es especialmente significativo con respecto a las obras hidráulicas, incluyendo la capacidad de evaluar la habilidad del

sistema para resistir inundaciones extremas, y para proteger y operar de manera segura (INAMHI, 2015).

Figura 4.3: Zonificación de intensidades de precipitación.



Nota: La estación M0003 pertenece a la estación Izobamba. Fuente: INAMHI, 2015

En las tablas mostradas a continuación, se exponen los datos generales de la estación Izobamba utilizados para el cálculo de la intensidad de lluvia en la zona del proyecto.

Tabla 4.3: Datos de la estación pluviométrica Izobamba.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Institución
M0003	Izobamba	772701,78	9959435	3058	INAMHI

Fuente: (Actualización del estudio de lluvias intesas - INAMHI, 2015, pág. 19)

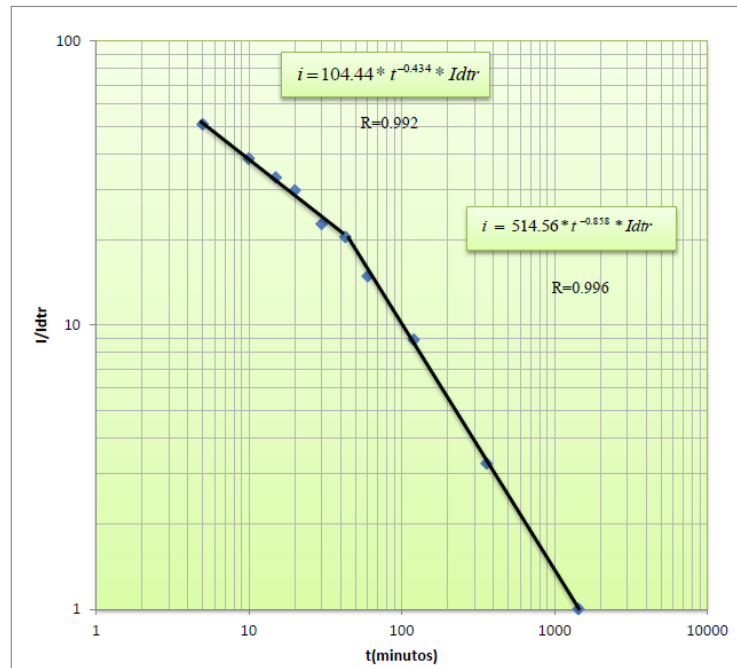
Tabla 4.4: Intensidad, duración y frecuencia máxima en 24 horas de la estación Izobamba.

Zona	Estación	Intervalos de Tiempo	Ecuaciones	R ²
	Código	Nombre		
2	M003	Izobamba	$I_{TR} = 104,44 * Id_{TR} * t^{-0,4326}$	0,984
			5 < 42,99	
			42,99 < 1440	0,9992

$$I_{TR} = 514,56 * Id_{TR} * t^{-0,858}$$

Fuente: (Actualización del estudio de lluvias intensas - INAMHI, 2015, pág. 19)

Figura 4.4: Curvas de intensidad – duración estación Izobamba

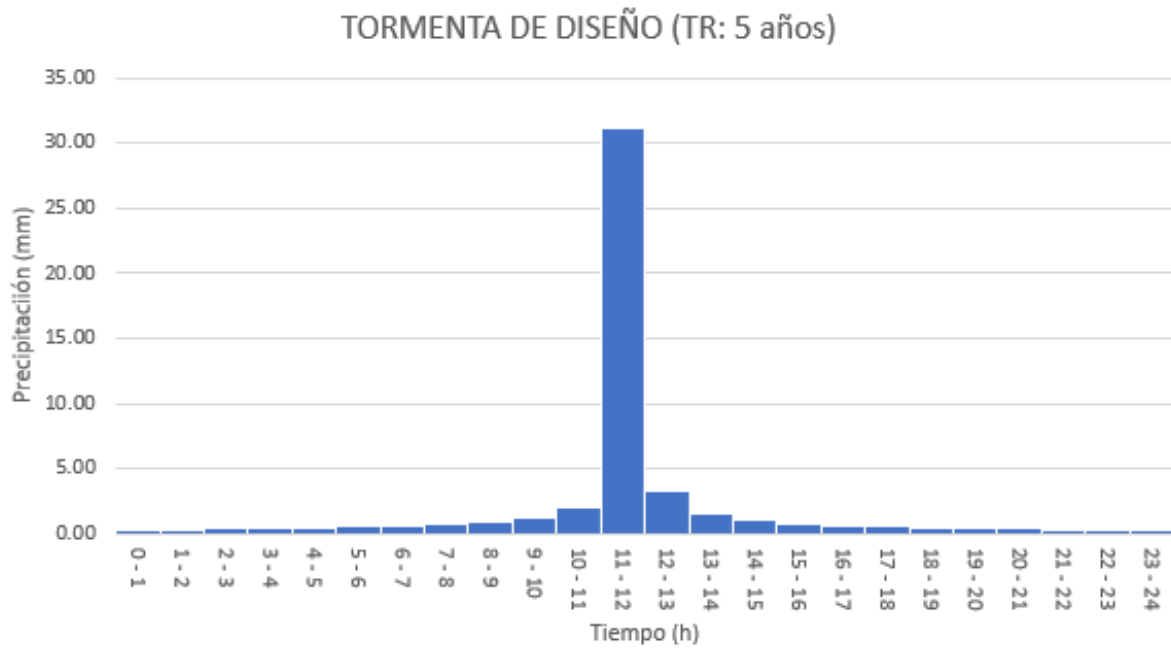


Nota: (Actualización del estudio de lluvias intensas - INAMHI, 2015, pág. 182)

4.2.5 CONSTRUCCIÓN DE HIETOGRAMAS DE DISEÑO – ESTACIÓN IZOBAMBA

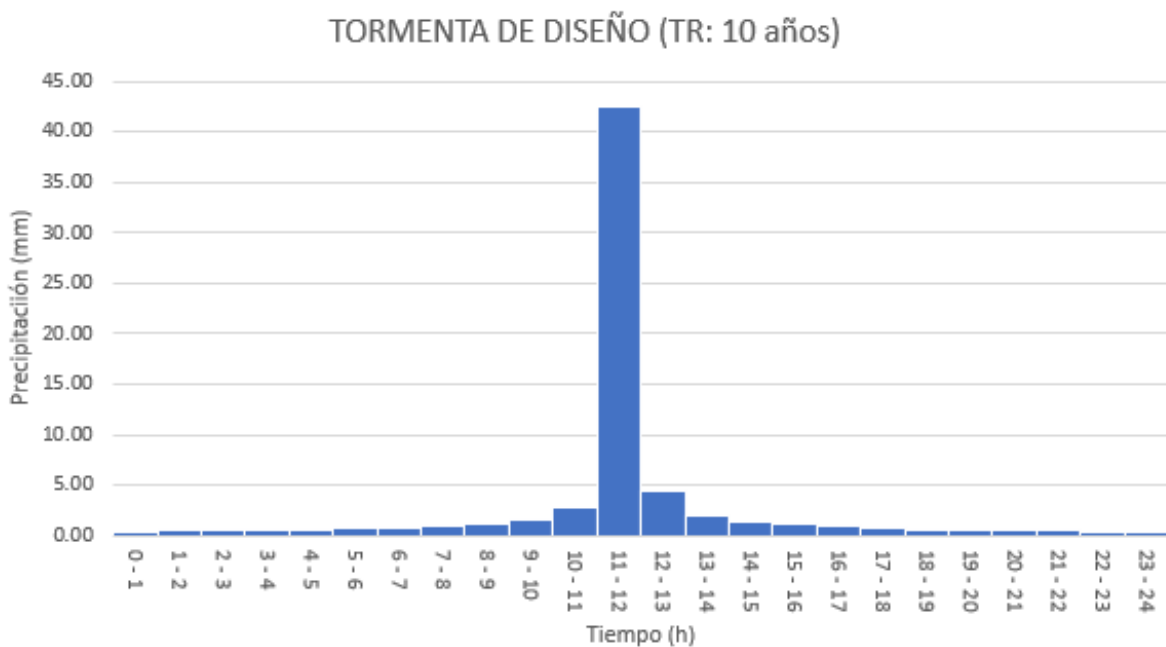
Sobre la base de las curvas IDF de la estación meteorológica de Izobamba, se construyó una tormenta de diseño para la cuenca de la Cooperativa Eloy Alfaro, proporcionando la entrada necesaria para determinar el flujo máximo de inundación para diferentes períodos de retorno. Esto se logró utilizando el método de bloques alternos, con períodos de retorno de 5, 10 y 25 años, y se produjeron hietogramas sintéticos con una duración de 24 horas con intervalos de precipitación de 60 minutos, y una duración de 12 minutos con intervalos de precipitación de 1 minuto para modelar en EPA SWMM, como se hizo en el modelo convencional de este diseño de alcantarillado. A continuación, en las figuras N°5, 6, 7, 8, 9 y 10 se exponen los hietogramas que se utilizaron para la modelación en el EPA SWMM.

Figura 4.5: Hietograma con un periodo de retorno de 5 años con duración de 24 horas.



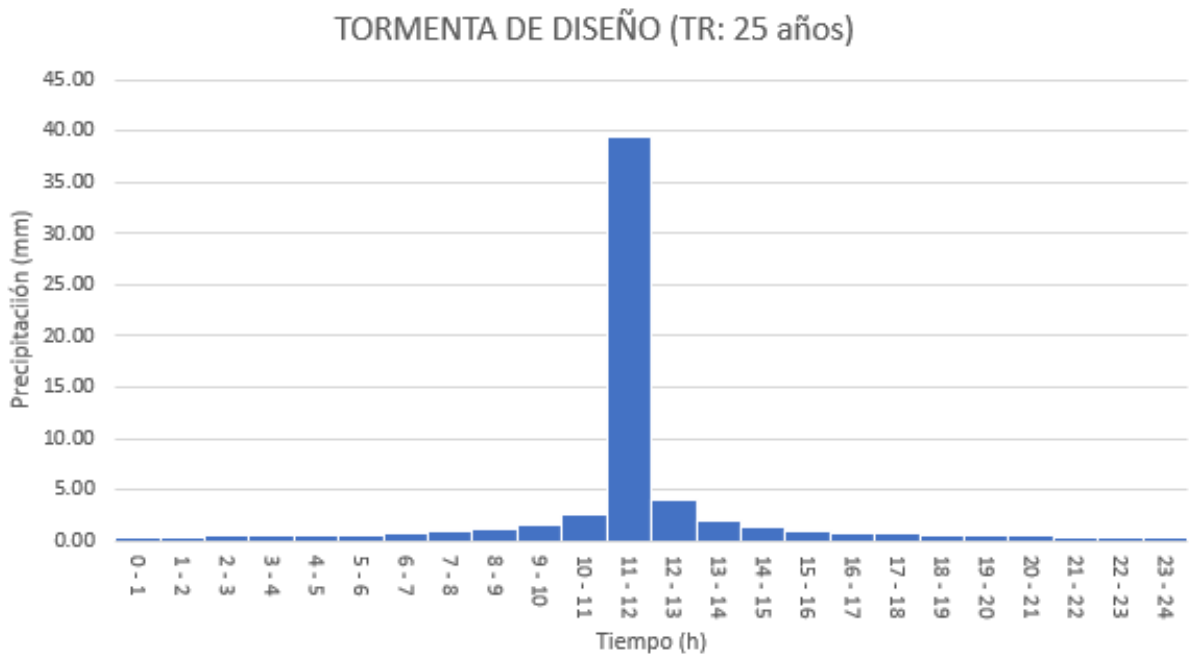
Fuente: Propia.

Figura 4.6: Hietograma con un periodo de retorno de 10 años con duración de 24 horas.



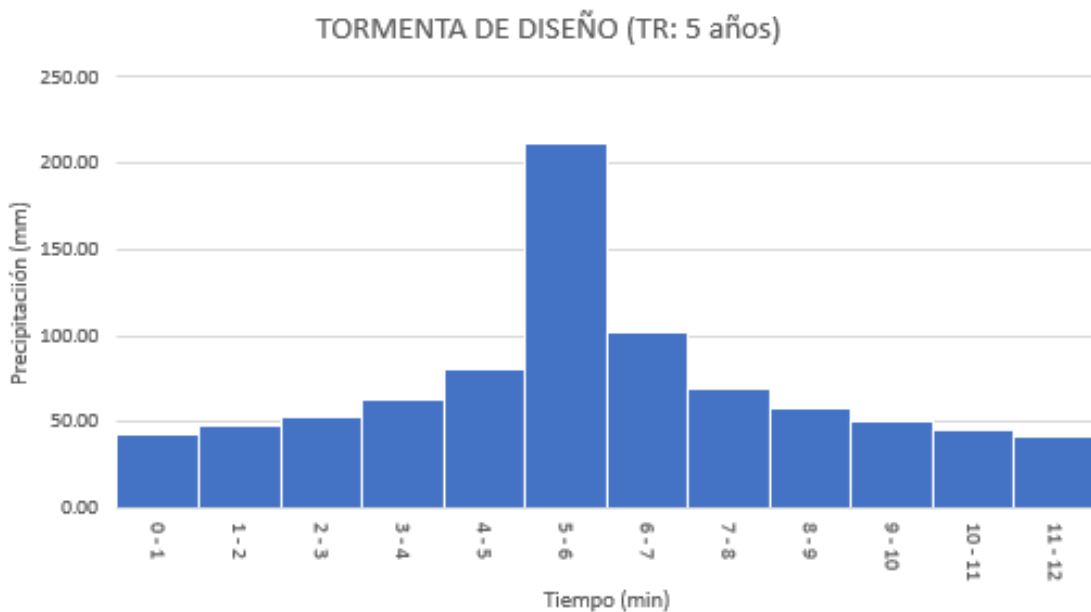
Fuente: Propia.

Figura 4.7: Hietograma con un periodo de retorno de 100 años con duración de 24 horas.



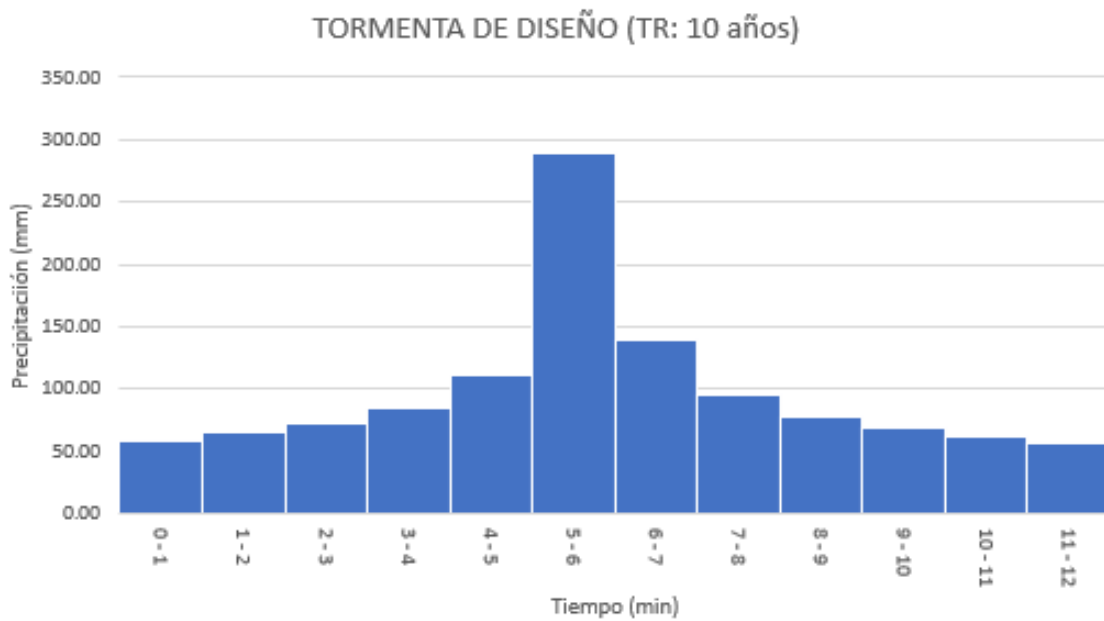
Fuente: Propia.

Figura 4.8: Hietograma con un periodo de retorno de 5 años con duración de 12 minutos.



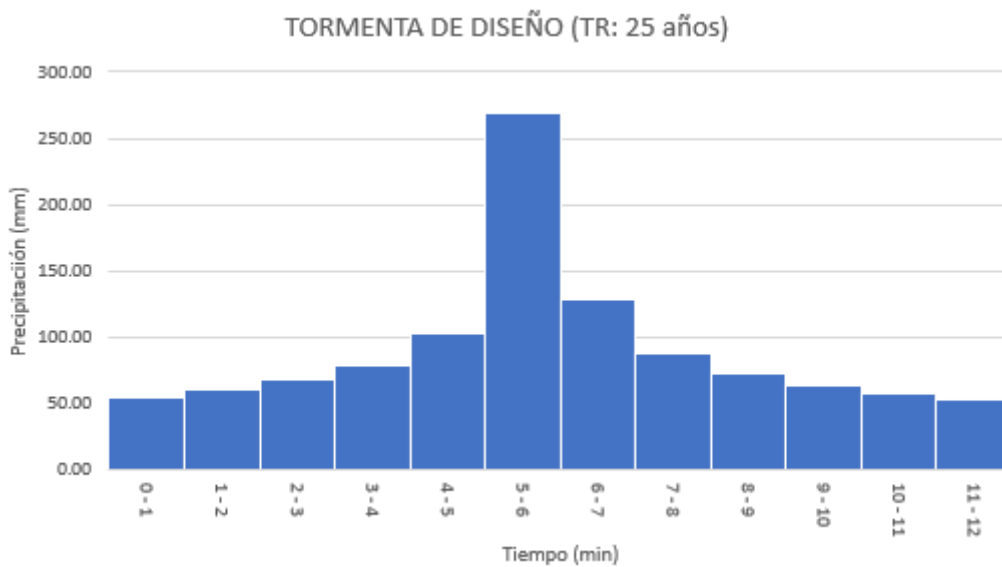
Fuente: Propia.

Figura 4.9: Hietograma con un periodo de retorno de 10 años con duración de 12 minutos.



Fuente: Propia.

Figura 4.10: Hietograma con un periodo de retorno de 25 años con duración de 12 minutos.



Fuente: Propia.

Este procedimiento permitió crear tormentas de diseño sintéticas representativas para la modelación hidráulica de la Cooperativa Eloy Alfaro, suministrando el insumo

meteorológico necesario para la comparación entre el diseño convencional y la modelación en EPA SWMM.

4.2.6 DESCRIPCIÓN DEL ALCANTARILLADO CONVENCIONAL

El diseño original del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial para la Cooperativa Eloy Alfaro de Rumiñahui se formó con base en las leyes ecuatorianas existentes, los procedimientos y las normas y reglas prácticas universalmente aceptadas en las ciudades consolidadas. Una de las metodologías utilizadas en las etapas preliminares del proyecto es un análisis detallado del sistema y un levantamiento de campo de todas las instalaciones, pozos de inspección, conexiones domiciliarias y desagües, para indicar el envejecimiento y deterioro de las tuberías y encontrar secciones que no son suficientes para el flujo actual. El levantamiento involucró información socioeconómica para la población de diseño y la contribución del área para aguas residuales y pluviales (aproximadamente 435 habitantes, 25 hectáreas y recibidas), base necesaria para la carga contaminante, estimación de volúmenes de agua. Luego se calcularon los parámetros hidráulicos necesarios incorporando coeficientes de escorrentía basados en la cobertura y el tipo de uso del suelo, la escorrentía pluvial podría determinarse utilizando el método racional con curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) locales como datos de apoyo. Se definieron las asignaciones de agua para la población y las tasas de generación de aguas residuales domésticas, de modo que se pudieran crear las cargas de diseño tanto sanitarias como pluviales. El dimensionamiento de la red se llevó a cabo principalmente en una hoja de Excel, de acuerdo con el asesoramiento de SENAGUA y en las guías técnicas de EMAPP-Q, y se mantuvieron pendientes mínimas para la autolimpieza y el número de diámetros encontrados compatibles con la ley. Estimaron tuberías de PVC y Hormigón Simple: para el alcantarillado sanitario, principalmente de 200 mm de diámetro y una longitud total de alrededor de 3.7 km y para las tuberías de alcantarillado pluvial entre 300 y 1,000 mm de diámetro, aproximadamente alrededor de 3.3 km, un número significativo de pozos de inspección y desagües instalados de acuerdo con la demanda topográfica del área. Las especificaciones de construcción incluyeron el ajuste del terreno, la profundidad de instalación, la colocación de pozos para permitir la inspección, la presentación de planos y perfiles longitudinales de las redes. Al hacerlo, se pudieron identificar las limitaciones asociadas con el método

tradicional, es decir, cuellos de botella en los segmentos muy húmedos, cableado doméstico mal planificado, acumulación de sedimentos dentro de la red actual, y se identificaron para garantizar un rediseño completo y la separación de los dos sistemas el sanitario y el pluvial. Dicha metodología tradicional permitió una visión clara de la condición actual del alcantarillado, y ha sido un enfoque de comparabilidad con el modelado computacional avanzado utilizado simultáneamente en el proyecto.

Los diámetros en el EPA-SWMM se mantuvieron fijos para evaluar el diseño realizado de manera convencional y poder realizar una respectiva comparación

En la tabla N°4.4 a continuación se exponen los parámetros utilizados en el alcantarillado convencional.

Tabla 4.4: Criterios utilizados en el alcantarillado convencional

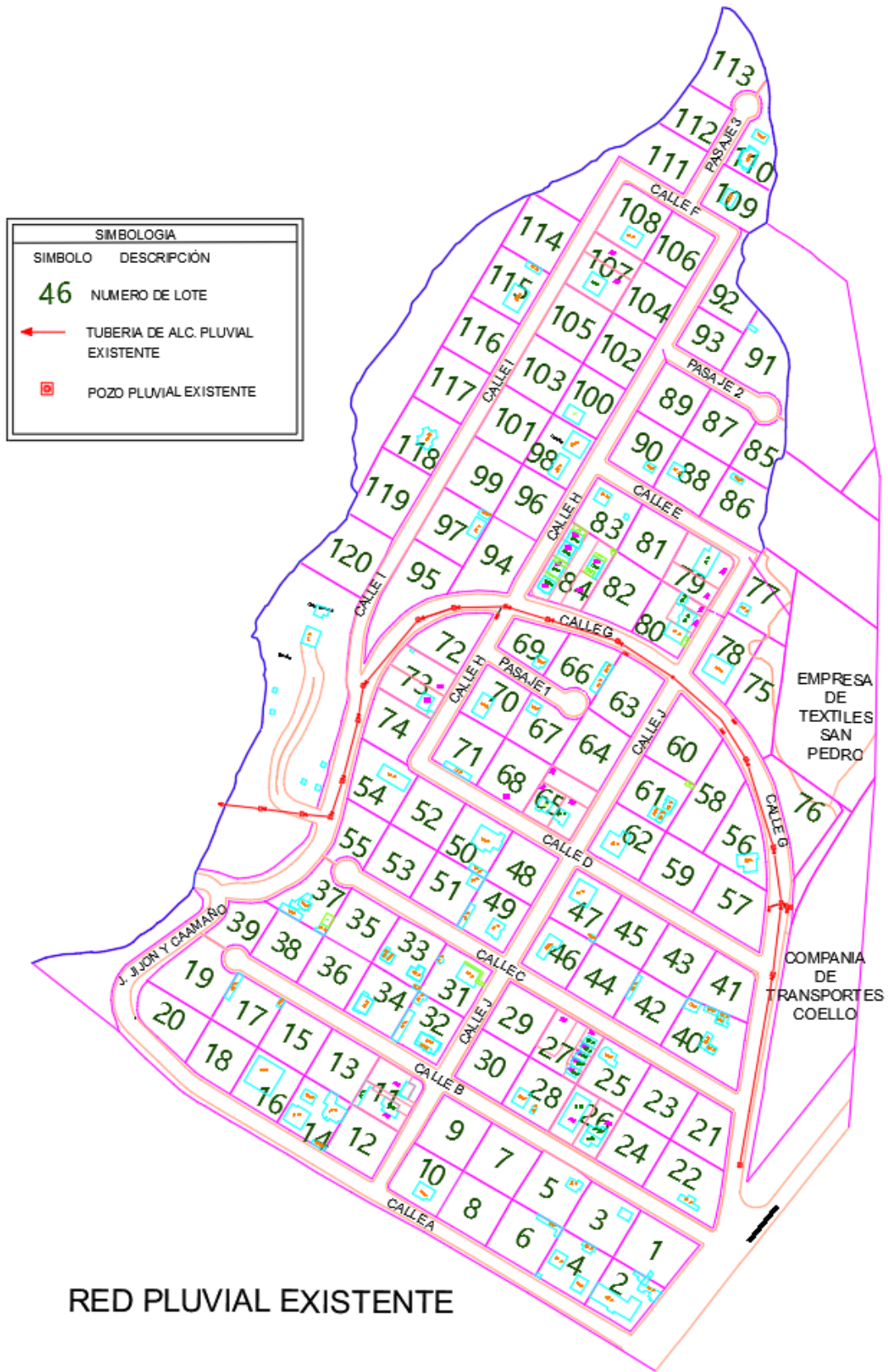
Parámetro	Valor / Descripción
DATOS DE DISEÑO BASE	
Población de diseño	891 hab
Área tributaria del sistema	25.00 Ha
Densidad poblacional	35.64 hab/Ha
Dotación de agua	138 lt/hab/día
Coefficiente de retorno	0.80
Período de retorno (TR)	5 años
CRITERIOS HIDRÁULICOS	
Velocidad mínima (tubo lleno)	0.90 m/s
Velocidad máxima (tubo lleno)	6.00 m/s
Velocidad de autolimpieza mínima	0.35 m/s
Pendiente mínima	10 ‰ (10 mm/m)
Coefficiente de rugosidad (Manning)	0.013 (tuberías PVC)
Factor de infiltración	0.1 lt/s-hab
Aporte de aguas ilícitas	0.5 lt/s-hab
CARACTERÍSTICAS DE LA RED SANITARIA	
Longitud total de tuberías	≈ 3.7 km
Material predominante	PVC y Hormigón Simple
Diámetro predominante	200 mm
Número de pozos de inspección	46+ pozos
Profundidad típica de instalación	1.60 m a 1.80 m
Caudal de diseño máximo (colector final)	≈ 10.43 lt/s
Método de dimensionamiento	Ecuación de Manning (flujo permanente)
Herramienta de diseño	Excel (cálculos manuales)
COMPONENTES DEL CAUDAL TOTAL	
Aguas servidas domesticadas	$Q_{md} \times \text{Factor mayoración (4)}$
Aguas de infiltración	$0.1 \text{ lt/s-ha} \times \text{Área tributaria}$
Aguas ilícitas	$0.5 \text{ lt/s-ha} \times \text{Conexiones inadecuadas}$
Caudal total de diseño	$Q_{\text{diseño}} = \text{Aguas servidas} + \text{Infiltración} + \text{Ilícitas}$

Fuente: Propia

4.2.7 CRITERIOS PARA EL MODELO DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL

Las subcuencas pluviales se delimitaron considerando tanto el sistema existente, que cubría 16,12 hectáreas, como la ampliación proyectada para alcanzar la cobertura total de 25 hectáreas, se mantuvo las áreas tributarias definidas en el diseño hidráulico. Para el cálculo del escurrimiento se empleó un coeficiente de escurrimiento $C=0,52$, explicado en la sección 4.2.3. A continuación en la figura 4.11 se aprecia la red existente y en la figura 5.1 el nuevo alcantarillado propuesto.

Figura 4.11 Red pluvial existente



Fuente: Propia.

Basado en las especificaciones establecidas en el diseño convencional, el diseño hidráulico del sistema de aguas pluviales asumió diámetros de tubería que van desde 300 mm en las secciones iniciales hasta 1200 mm en el colector principal. Para la parametrización meteorológica, se eligió el formato de lluvia como "INTENSITY", permitiendo la entrada directa de intensidades procesadas de la estación Izobamba en el EPA SWMM. Se estableció un intervalo de precipitación de 5 a 60 minutos para capturar adecuadamente la variabilidad de eventos intensos. También se procesaron series de tiempo de precipitación a partir de datos históricos de la estación Izobamba del INAMHI. Para la generación de tormentas sintéticas, se modelaron eventos para un período de retorno de 25 años como el diseño principal, aplicando el mismo enfoque de distribución temporal utilizado en el sistema convencional. La tormenta de diseño se construyó con intensidades calculadas utilizando las ecuaciones IDF de la estación Izobamba. Durante el procedimiento de cuadrar el modelo, los resultados fueron validados contra el diseño convencional comparando los flujos generados por el EPA SWMM con los calculados usando métodos clásicos (método racional para aguas pluviales y método de área para sanitarios). Se realizó un análisis de sensibilidad de los coeficientes de Manning, ajustando los valores base dentro de rangos técnicamente aceptables identificados en el diseño convencional, y se verificaron velocidades, profundidades y capacidades hidráulicas utilizando el software.

4.2.8 EMPLEO DEL MÉTODO GREEN-AMPT EN LA MODELACION EN EL SOFTWARE EPA-SWMM

La técnica de infiltración de Green-Ampt se utilizó en la modelación hidrológica realizada con EPA SWMM como uno de los esquemas disponibles para realizar la simulación de infiltración de agua en lluvias urbanas durante simulaciones hidrológicas de estilo urbano. El enfoque empleado por Green y Ampt (1911) modela la infiltración en virtud de la presencia de un frente de humedad distinto entre las porciones saturadas y no saturadas en el perfil del suelo, asumiendo una conductividad hidráulica constante y una succión capilar característica del suelo (Dialnet, s.f.; Diana, s.f.). El algoritmo de EPA SWMM proporciona una escala adecuada de parámetros: conductividad hidráulica, succión y déficit de humedad inicial, lo que permite simular física y analíticamente el proceso de infiltración a escala puntual y en el espacio. Debido a su buen ajuste con los

datos observacionales y de laboratorio, esto permite su aplicación en estudios urbanos. El método de Green-Ampt es relativamente bien conocido y empleado en la modelación hidrológica urbana debido a su flexibilidad y versatilidad para varios tipos de suelo y condiciones iniciales de humedad (Universidad de los Andes, s.f.; UNAM, 2013; MDPI, s.f.).

4.2.9 DETERMINACIÓN DEL ERROR DE CONTINUIDAD EN EPA-SWMM

En las simulaciones hidráulicas realizadas en EPA-SWMM, se utilizó el esquema de enrutamiento de onda dinámica completa con un esquema numérico implícito que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo no permanente en la red de alcantarillado. Para la validación numérica del modelo, se verificó el balance de volumen entre el agua suministrada al sistema (precipitación efectiva más flujos sanitarios e infiltraciones) y el agua evacuada (descarga en los puntos de salida y almacenamiento final en conductos y nodos).

Este procedimiento se realiza para verificar que la diferencia relativa entre el volumen total suministrado y el volumen total que sale del sistema esté dentro de los rangos recomendados en la literatura para modelos de drenaje urbano, que típicamente es menos del 1% cuando se implementa la simulación del evento real. El error de continuidad global en el estudio actual de alrededor de -0.013% se encontró que era muy bajo, es decir, la masa de agua se conserva suficientemente en todos los intervalos de tiempo y no hay pérdidas numéricas significativas o inestabilidades en el cálculo.

Los errores de continuidad por debajo del 1% se consideran satisfactorios para simulaciones hidrológicas e hidráulicas de sistemas de drenaje urbano y representan una solución numéricamente estable y precisa. Por lo tanto, los resultados basados en el modelo se considerarán confiables para el dimensionamiento y diagnóstico del sistema propuesto, y permitirán juzgar la comparación del rendimiento del diseño estándar con las alternativas que se han probado con SWMM.

4.2.10 CRITERIOS PARA EL MODELO DEL ALCANTARILLADO SANITARIO

Los criterios empleados en la modelación del sistema de alcantarillado sanitario de la Cooperativa Eloy Alfaro se establecieron basándose en una evaluación exhaustiva de las características físicas, topográficas y socioeconómicas del área de estudio situada en Rumiñahui, Ecuador. Para las subcuencas o áreas contribuyentes, se determinaron anchos característicos basados en la zonificación del territorio, valores obtenidos a través de un análisis detallado de las líneas de flujo natural y la configuración topográfica del terreno. El área tributaria de cada subcuenca se determinó mediante un análisis topográfico, y el resultado determinó nuestra área de estudio de la Cooperativa Eloy Alfaro, con 25 hectáreas bajo el control de las subcuencas con una extensión variable en el rango de terreno de 0.5 a 3.2 hectáreas según el drenaje natural del terreno. Las pendientes del terreno se evaluaron de acuerdo con los perfiles longitudinales y transversales levantados topográficamente, dando un total de tres regiones: una pendiente suave en el área de descarga cerca del río San Pedro de 1-3%, pendiente media de 3-8% en el área residencial intermedia, y pendientes pronunciadas de 8-15% en la zona alta de la cooperativa. Con respecto a las tuberías de recolección, se examinaron tuberías de sección circular de obras parcialmente llenas utilizando límites de diseño establecidos por las directrices ecuatorianas. Para toda la red sanitaria, se eligieron los diámetros mínimos del sistema que deben hacerse de concreto simple o PVC (200 mm). El coeficiente de Manning para los conductos se estableció en $n=0.013$ para las tuberías de concreto simple, lo cual es un indicador para tuberías nuevas que tienen características del diseño convencional. En el modelo del sistema de alcantarillado sanitario, se definieron algunas propiedades específicas en líneas y nodos. En primer lugar, la pendiente de las líneas se mantuvo en el valor de profundidad predeterminado (DEPTH), ya que las tuberías de inicio que se conectan en el fondo del nodo son necesarias, aunque la pendiente pueda cambiar en el curso del desarrollo del diseño. El cálculo hidráulico se modeló con una suposición de flujo uniforme, ya que esa condición sigue de cerca el comportamiento del agua dentro de los conductos y permite el flujo a cada nodo terminal de las secciones del sistema. En cuanto a las ecuaciones que rigen el flujo en tuberías forzadas, se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach porque es

ampliamente utilizada para estimar con precisión las pérdidas por fricción. En términos de contribuciones del sistema, los flujos obtenidos según la metodología del área fueron evaluados y descritos como variables de flujo (FLOW) en cada nodo a lo largo de los sistemas y enfocándose en el flujo del alcantarillado sanitario, donde se realizaron mediciones de flujo. La geometría de la tubería consiste en una sección circular incompletamente llena, un enfoque común en proyectos de este tipo. Finalmente, la pendiente de la entrada y salida también será investigada y ajustada de acuerdo con los requisitos del diseño propuesto.

4.2.11 VERIFICACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

Para obtener resultados confiables en la simulación hidráulica e hidrológica mediante EPA SWMM para modelar las instalaciones de drenaje y saneamiento de alcantarillado sanitario y pluvial, se llevó a cabo una calibración y validación adecuada del modelo a escala EPA SWMM para confirmar la fiabilidad de los hallazgos. La calibración se basó en variaciones significativas de una parametrización crítica del coeficiente de rugosidad de tuberías (n de Manning), el coeficiente de escorrentía, las propiedades de infiltración (utilizando el método de Green-Ampt), así como las configuraciones de subcuencas y elementos componentes, hasta que sus resultados estuvieran en línea con los valores proyectados por el enfoque convencional y datos secundarios del mismo sistema existente. La disposición específica del modelo EPA SWMM fue la siguiente: para el LPS, las unidades de flujo en el modelo LPS utilizadas fueron unidades de flujo, para el análisis de enrutamiento de flujos se utilizó la onda dinámica (Dynwave), se adoptaron las mediciones de curvas típicas para hacer una disposición conveniente para el enrutamiento de flujos, la longitud y forma del círculo es el diámetro regular de líneas y geometrías utilizando longitud y formas de conductos circulares, la rugosidad fue de 0.013 y se utilizó la ecuación de Hazen-Williams para el bombeo principal para obtener una cobertura realista del sistema bajo diferentes condiciones operativas. La validación del modelo se realizó verificando el balance de volumen, monitoreando parámetros como el resultado de la escorrentía superficial simulada, la infiltración simulada o el error de continuidad que siempre está por debajo del 1%, para que la simulación sea estable y precisa. Esto se complementó comparando flujos, niveles y velocidades con los observados en el diseño tradicional para varios escenarios simulados y confirmando que

no hubiera sobrecargas no intencionadas o nodos no convergentes en la red. La robustez numérica del modelo se observó más efectivamente en condiciones extremas, que incluyen lluvias severas de corta y larga duración. Los períodos de retorno de 5, 10 y 25 años se justificaron para alcantarillas pluviales, así como simular con tormentas sintéticas (duración de 12 minutos y 24 horas) de acuerdo con la norma ecuatoriana INEN 005-9:2011 así como SENAGUA 2012, que recomiendan considerar períodos de retorno altos durante áreas urbanas consolidadas debido al alto riesgo y costo de daño en eventos extremos. Las curvas IDF y los hietogramas de diseño de la estación Izobamba sirvieron como ejemplos definitorios para eventos representativos, a saber, tormentas intensas de corta duración de 12 minutos para caracterizar la respuesta dinámica y la capacidad máxima de la red y tormentas extensas de 24 horas para probar la resiliencia y la capacidad de evacuación cuando el sistema está saturado por períodos prolongados. De esta manera, fue posible analizar la flexibilidad y los límites operativos del sistema bajo varias condiciones de carga. Por último, se compararon escenarios a través de la evaluación de indicadores principales, incluyendo el flujo máximo de escorrentía, el volumen evacuado, los puntos de hallazgo de sobrecarga y los errores de continuidad. El análisis y los resultados de la modelación avanzada a través de EPA SWMM comparados con los alcanzados mediante métodos clásicos enfatizaron las posibles mejoras de la modelación dinámica para la identificación de cuellos de botella, la optimización hidráulica y la identificación de métodos preventivos y adaptativos. Esta evaluación general ayudó a confirmar la predictibilidad y el valor del modelo, así como la facilidad de su aplicabilidad en la toma de decisiones y el diseño mejorado de instalaciones de alcantarillado modificadas al contexto urbano y climático localizado.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de resultados se centra en los cálculos matemáticos realizados con modelado utilizando el software EPA SWMM, que es capaz de proporcionar una simulación precisa del comportamiento de los sistemas de aguas pluviales y alcantarillado sanitario y simula las condiciones reales en el área de estudio de las cuencas, nodos, líneas, descargas y

pluviómetros. A través de este proceso, se detallan los aspectos hidrológicos y de diseño del rendimiento del sistema, de modo que se pueden identificar y analizar los aspectos críticos del rendimiento, y se evalúa el rendimiento hidráulico de la red. Aquí también presentamos los resultados que se generan mediante métodos tradicionales de diseño, los cuales se compararán con los producidos por el software; esta comparación es especialmente significativa, ya que ilustra la eficiencia del EPA SWMM para manejar múltiples variables y las características dinámicas y controlables de los escenarios complejos en comparación con los métodos tradicionales. Se examinó el rendimiento del EPA SWMM y se presentan sus resultados a continuación para demostrar cómo el EPA SWMM hace una contribución significativa para optimizar todo el diseño, gestión y análisis de redes de alcantarillado utilizando un enfoque holístico basado en el contexto del área analizada.

5.1 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL

Figura 5.1: Red de Alcantarillado Pluvial de la cooperativa Eloy Alfaro – EPA SWMM



Fuente: Propia.

5.1.1 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 24 HORAS – 5 AÑOS DE RETORNO

La simulación realizada utilizando EPA SWMM para el hietograma con un período de retorno de 5 años y una duración de lluvia de 24 horas se asemeja a la respuesta del sistema de alcantarillado pluvial, modelado bajo condiciones de tormenta moderada para la cooperativa Eloy Alfaro bajo condiciones de lluvia más intensas y menos frecuentes, pero no en comparación con escenarios de diseño de alto retorno. Según el modelo, la precipitación resultante medida por la lluvia acumulada recibida para el evento modelado fue de 48.92 mm, lo que resultó en una escorrentía superficial de 0.987 hectárea-metros (43.23 mm de profundidad sobre el área considerada) y una infiltración de 0.129 hectárea-metros (5.652 mm); estos dos últimos valores evidencian un equilibrio entre la infiltración y la generación de flujo superficial, representativo de un evento intermedio.

El comportamiento hidrodinámico del sistema fue altamente estable: el valor de error del balance de continuidad se mantuvo bajo (-0.012%), y no ocurrieron pérdidas significativas debido a inundaciones, evaporación o almacenamiento excesivo dentro de la red. La cantidad total de flujo en la simulación fue de 0.986 hectáreas-metros (9.86 millones de litros de agua), valores consistentes con un evento de diseño típico en infraestructura urbana. Como se mostró para el enlace 68 en el 57.78% de los pasos de simulación, fue el más exigente hidráulicamente durante más de la mitad de los marcos de tiempo estudiados. Este comportamiento es relevante tanto en términos de su lugar en la red, es decir, generalmente en una zona de convergencia topográfica donde se encuentran flujos de diferentes subcuencas, como en términos de diámetro de tubería, pendiente y conexiones con otros enlaces. De hecho, aumentar el flujo de agua hacia el enlace 68, especialmente durante eventos de lluvia intermedios como se observó en el estudio actual, puede llevar a que el enlace 68 registre los valores más altos de carga y flujo en las diferentes etapas de la simulación. Sin embargo, a pesar de su alta carga con alta ocupación, no se consideró crítico en ninguno de los enlaces o nodos de la red, lo que indica que aunque su demanda era alta, el sistema sigue siendo operable. La

simulación logró una convergencia total en todos los pasos, confirmando así la coherencia hidráulica del modelo. La tabla 5.1 resume los parámetros importantes obtenidos.

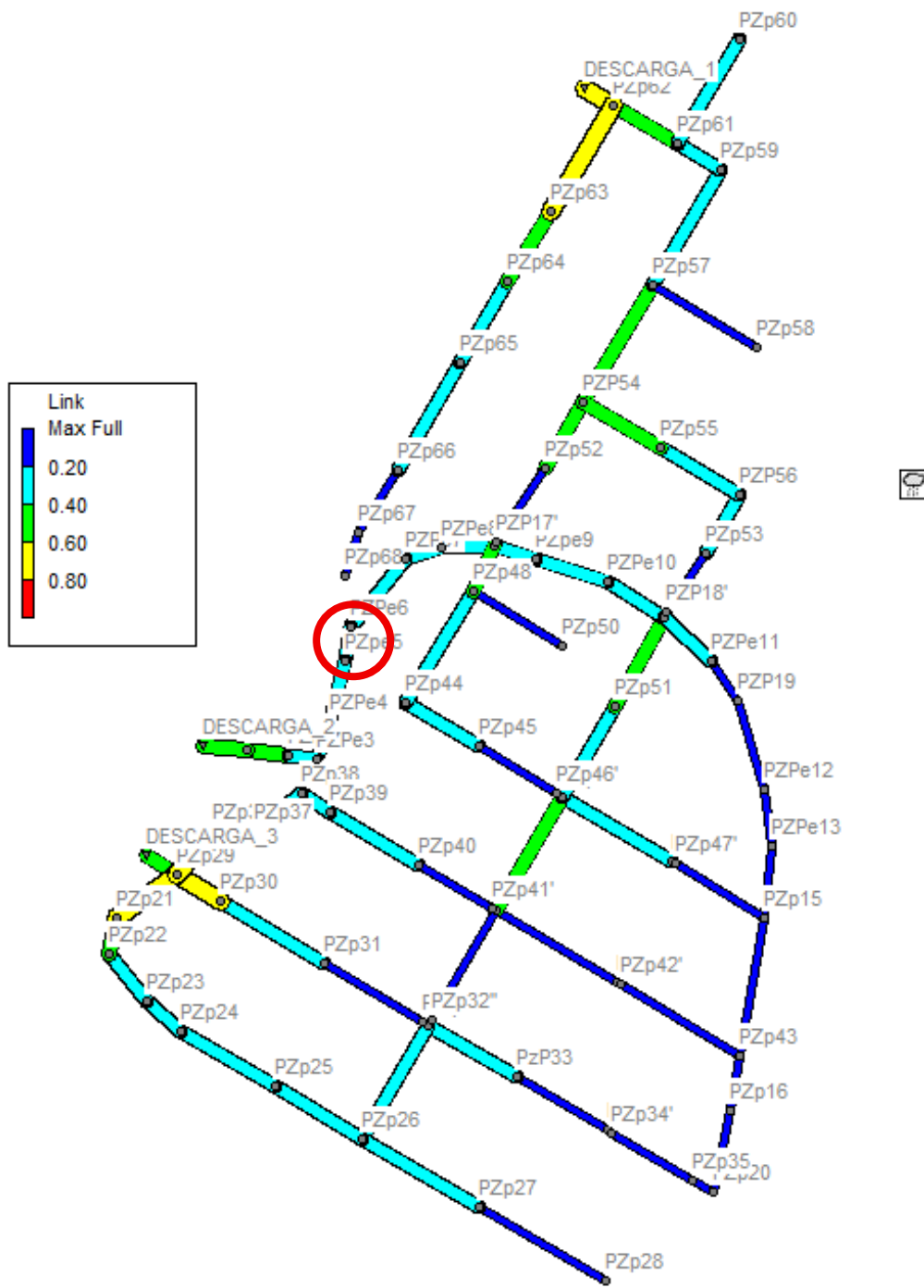
Tabla 5.1: Parámetros obtenidos en la simulación (24 horas) – (5 años retorno)

Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	48.92
Volumen de escorrentía (ha-m)	0.987
Escorrentía superficial (mm)	43.23
Infiltración (ha-m)	0.129
Infiltración (mm)	5.652
Error de continuidad (%)	-0.012
Volumen entrante/saliente (ha-m)	0.986
Nodos no convergentes (%)	<0.3

Fuente: Propia.

En la figura N°5.2 se puede observar la capacidad de las tuberías a la cual trabajan.

Ilustración 5.2: Caudales máximos en tuberías (24 horas) – (5 años de retorno)



Nota: En el gráfico se puede observar el punto en la red en el cual se presentan condiciones desfavorables.

5.1.2 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 24 HORAS – 10 AÑOS DE RETORNO

La modelación con un período de retorno de 10 años y una duración de 24 horas en la cooperativa Eloy Alfaro mostró un comportamiento hidráulico típico de un evento de intensidad moderada-alta. La precipitación total acumulada durante el evento fue de 66.69 mm, generando un volumen de escorrentía superficial de 1.376 hectárea-metros, equivalente a 60.29 mm de profundidad sobre la superficie modelada. La infiltración utilizando el método de Green-Ampt fue de 0.145 hectárea-metros (6.36 mm), lo que indica que una parte del agua precipitada se infiltró en el suelo, mientras que el resto contribuyó a la escorrentía superficial.

El balance de volumen proporcionó un error de continuidad muy bajo (-0.013%), demostrando una simulación estable y exacta. El flujo entrante del sistema de agua fue efectivamente el mismo que el saliente (1.376 hectáreas-metros) y no se produjeron pérdidas significativas por inundaciones, evaporación o exfiltración. El modelo encontró nuevamente que el enlace 68 era el más crítico y se encontró que funcionaba en el 73.56% de los pasos de tiempo, aunque todos los enlaces permanecieron estables durante la simulación. Se alcanzó la convergencia en casi todos los pasos, con una tasa que se mantuvo muy baja (0.02%), en concordancia con un rendimiento hidráulico robusto. Se utilizaron pasos de tiempo variables que duraron un promedio de 7.4 segundos y un máximo de 10 segundos, ajustando el ritmo de la escorrentía y tomando así registros detallados de la evolución de la escorrentía. Esta configuración de marco de tiempo permitió una alta precisión sin ningún impacto en la estabilidad del modelo. En áreas urbanas con asentamientos consolidados y una demanda moderada de protección contra eventos de lluvia, un período de retorno de 10 años es apropiado. Este criterio logra un equilibrio entre evitar inundaciones frecuentes que serían perjudiciales para la infraestructura y la población, y consideraciones económicas que evitan un sobredimensionamiento innecesario. Además, el hidrograma de 24 horas empleado en este estudio representa las características generales de las tormentas de la región, y la modelización proporciona una representación adecuada del comportamiento del sistema durante eventos importantes, pero no extremos. Los resultados más relevantes de la modelización se resumen en la Tabla 5.2.

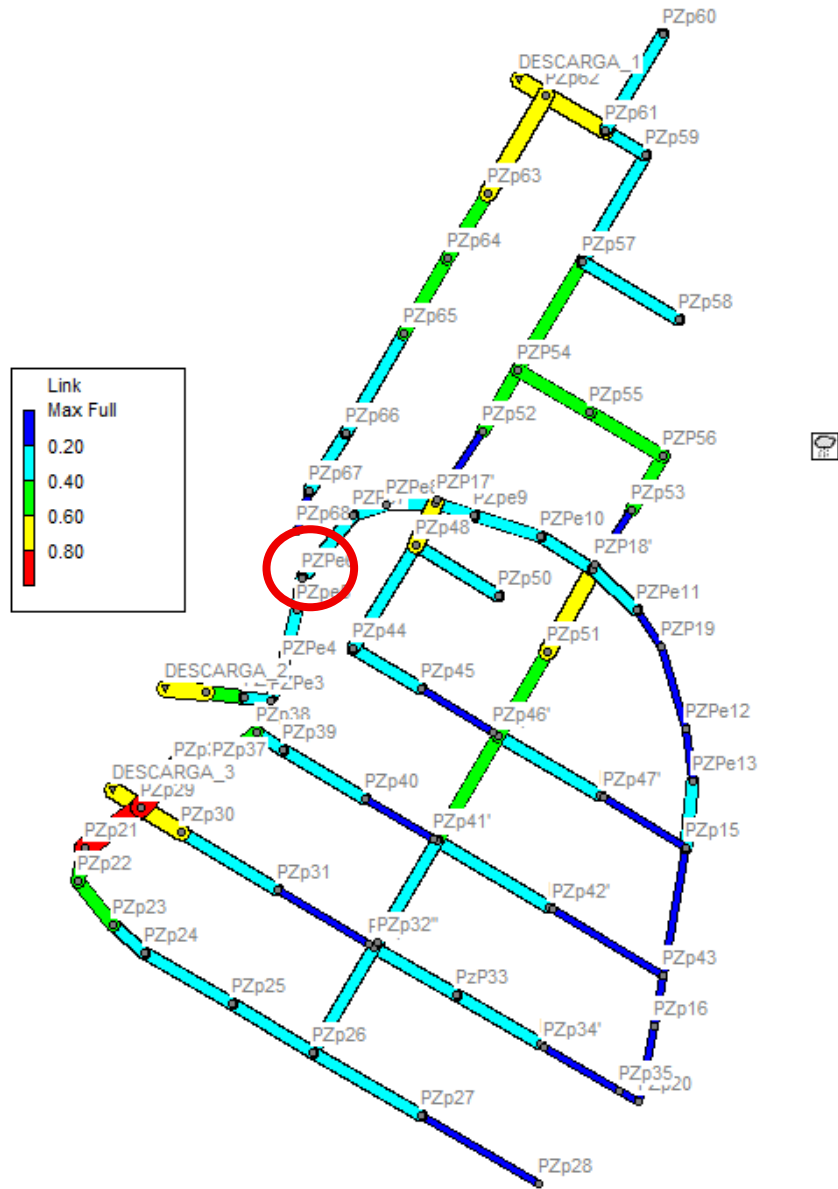
Tabla 5.2: Parámetros obtenidos en la simulación (24 horas) – (10 años retorno)

Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	66.69
Volumen de escorrentía (ha-m)	1.376
Escorrentía superficial (mm)	60.29
Infiltración (ha-m)	0.145
Infiltración (mm)	6.36
Error de continuidad (%)	-0.013
Volumen entrante/saliente (ha-m)	1.376
Nodos no convergentes (%)	<0.3

En conclusión, este estudio ofrece un examen confiable y práctico del comportamiento hidráulico de la red durante períodos de retorno anual de tormentas de 10 años, y ha establecido una base sólida para la comparación con eventos de mayor o menor retorno y ayuda en la construcción de un plan estratégico para el sistema de drenaje pluvial. Los

flujos máximos en las tuberías a la hora 12 de la simulación se grafican en la Figura No. 5.3.

Figura 5.3: Caudales máximos en tuberías (24 horas) – (10 años retorno)



Fuente: Propia.

5.1.3 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 24 HORAS – 25 AÑOS DE RETORNO

Esta es una respuesta significativa para un evento de lluvia intensa en un diseño urbano con un período de retorno de 25 años y una duración de 24 horas. La precipitación total durante el evento fue de 61.90 mm, generando un volumen de escorrentía superficial de 1.270 hectárea-metros (55.64 mm sobre la superficie) e infiltración de 0.142 hectárea-metros (6.22 mm), lo que implica que el suelo tenía cierta capacidad de absorción de agua incluso en condiciones extremas.

El balance de continuidad fue muy preciso, con un error computacional de menos del 0.02%, lo que indica la estabilidad del modelo y su configuración numérica. En la red, el volumen total de agua entrante y saliente fue uniforme y no hubo pérdidas debidas a inundaciones, evaporación o exfiltración. Notablemente, el enlace 68 fue el elemento más crítico durante el 67.92% de los pasos de tiempo, ya que, aunque no tuvo inestabilidades, la convergencia de la simulación fue constante, sin problemas con los nodos durante el evento. Se utilizaron pasos de tiempo variables, con un promedio de 7.55 segundos y un máximo de 10 segundos, equilibrando el detalle temporal y la eficiencia computacional, proporcionando una simulación de alta precisión de las dinámicas hidrológicas.

La tabla 5.3 resume los resultados más relevantes del modelamiento.

Tabla 5.3: Parámetros obtenidos en la simulación (24 horas) – (25 años retorno)

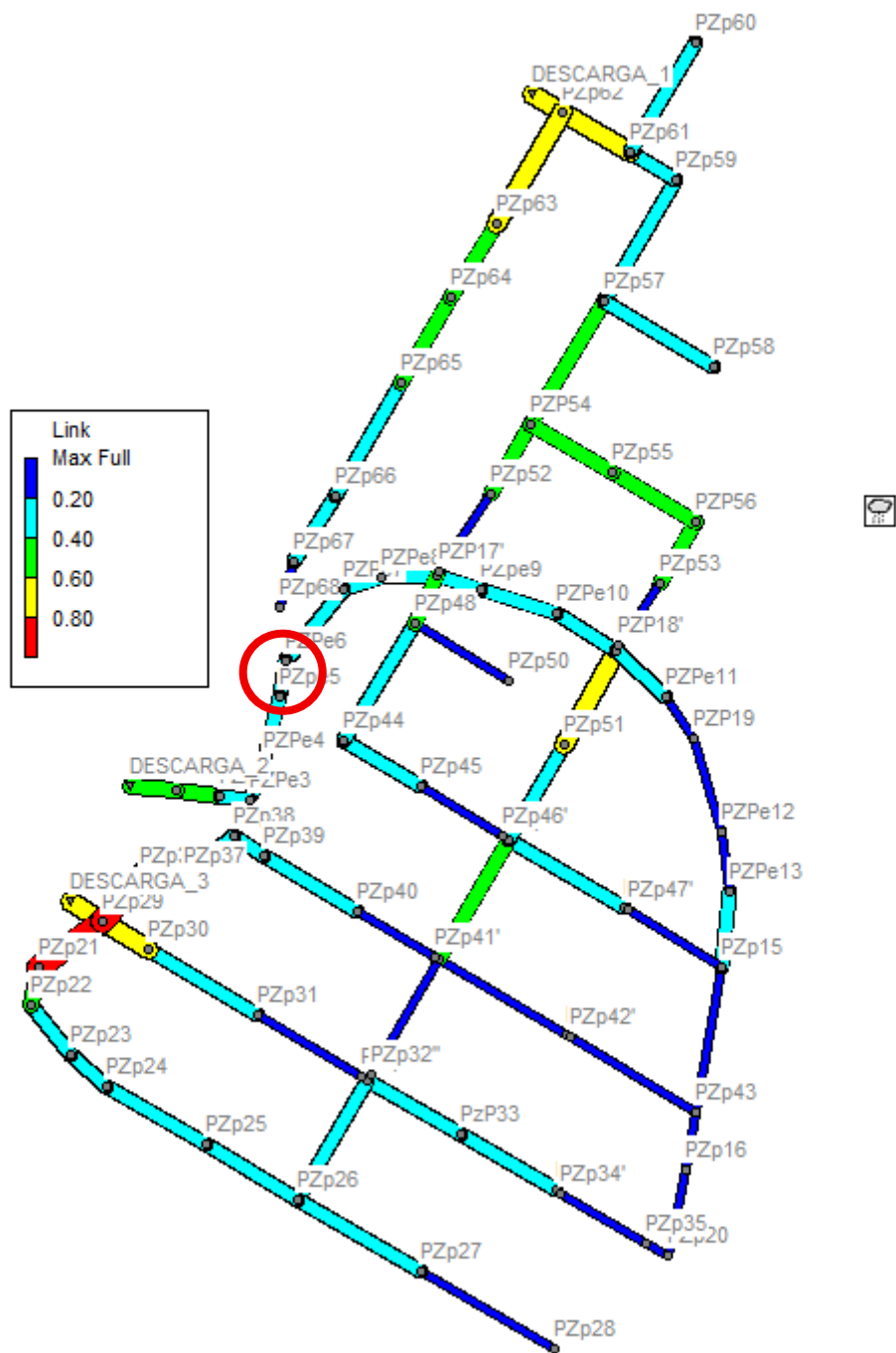
Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	61.90
Volumen de escorrentía (ha-m)	1.270
Escorrentía superficial (mm)	55.64
Infiltración (ha-m)	0.142
Infiltración (mm)	6.22
Error de continuidad (%)	-0.013
Volumen entrante/saliente (ha-m)	1.260
Nodos no convergentes (%)	<0.30

Fuente: Propia.

En las normas ecuatorianas actuales para alcantarillado sanitario y pluvial, que recomiendan el diseño considerando períodos de retorno entre 10 años y 25 años para áreas urbanas consolidadas como función del riesgo, la vulnerabilidad y los costos asociados. Esta base de diseño para un período de 25 años se ajusta a estas directrices

y protege adecuadamente el sitio contra eventos de lluvia severos que, aunque infrecuentes, pueden causar daños significativos a la infraestructura y las áreas urbanas. Por lo tanto, este estudio es una simulación útil como ejercicio de prueba y adaptación del diseño hidráulico del sistema, lo cual ayudará a planificar medidas preventivas y diseñar adecuadamente la capacidad de la red. Bajo este modelo, se pueden hacer comparaciones técnicas con simulaciones para períodos de retorno más cortos o más largos, lo que permite un análisis detallado para el período de diseño óptimo basado en el propósito del proyecto y la situación en el entorno urbano. En la figura N°5.4 se puede observar la capacidad de las tuberías a la cual trabaja el sistema.

Figura 5.4: Capacidad a la cual trabajan las tuberías (24 horas) – (25 años retorno)



Fuente: Propia.

5.1.4 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 12 MINUTOS – 5 AÑOS DE RETORNO (PERIODO DE MODELAMIENTO EN ALCANTARILLADO CONVENCIONAL)

Se comporta de manera muy diferente cuando se experimenta un evento con lluvia intensa, un período de retorno de 5 años y una duración total de 12 minutos, que cuando se trata de un evento de larga duración en la cooperativa Eloy Alfaro. El hidrograma ilustrado en la parte superior presenta un patrón de precipitación extremadamente concentrado en los primeros minutos del evento, lo que resulta en condiciones de escorrentía y respuesta hidráulica mucho más críticas durante breves períodos de tiempo. En el evento de 12 minutos, la precipitación total en el área consistió en 14.42 mm, con un volumen de escorrentía superficial de 0.270 hectárea-metros (11.85 mm sobre toda el área). La infiltración fue baja (0.007 hectárea-metros o 0.32 mm) ya que la lluvia fue tan intensa que la capacidad de absorción del suelo pronto se volvió insuficiente y hubo más flujo en la interfaz. El análisis hidráulico reveló una acumulación significativa en el almacenamiento final (0.053 hectárea-metros o 2.32 mm), en comparación con el volumen generado en poco tiempo, y la pequeña cantidad de exfiltración es insignificante. La tabla 5.4 resume los resultados más relevantes del modelamiento.

Tabla 5.4: Parámetros obtenidos en la simulación (12 minutos) – (5 años retorno)

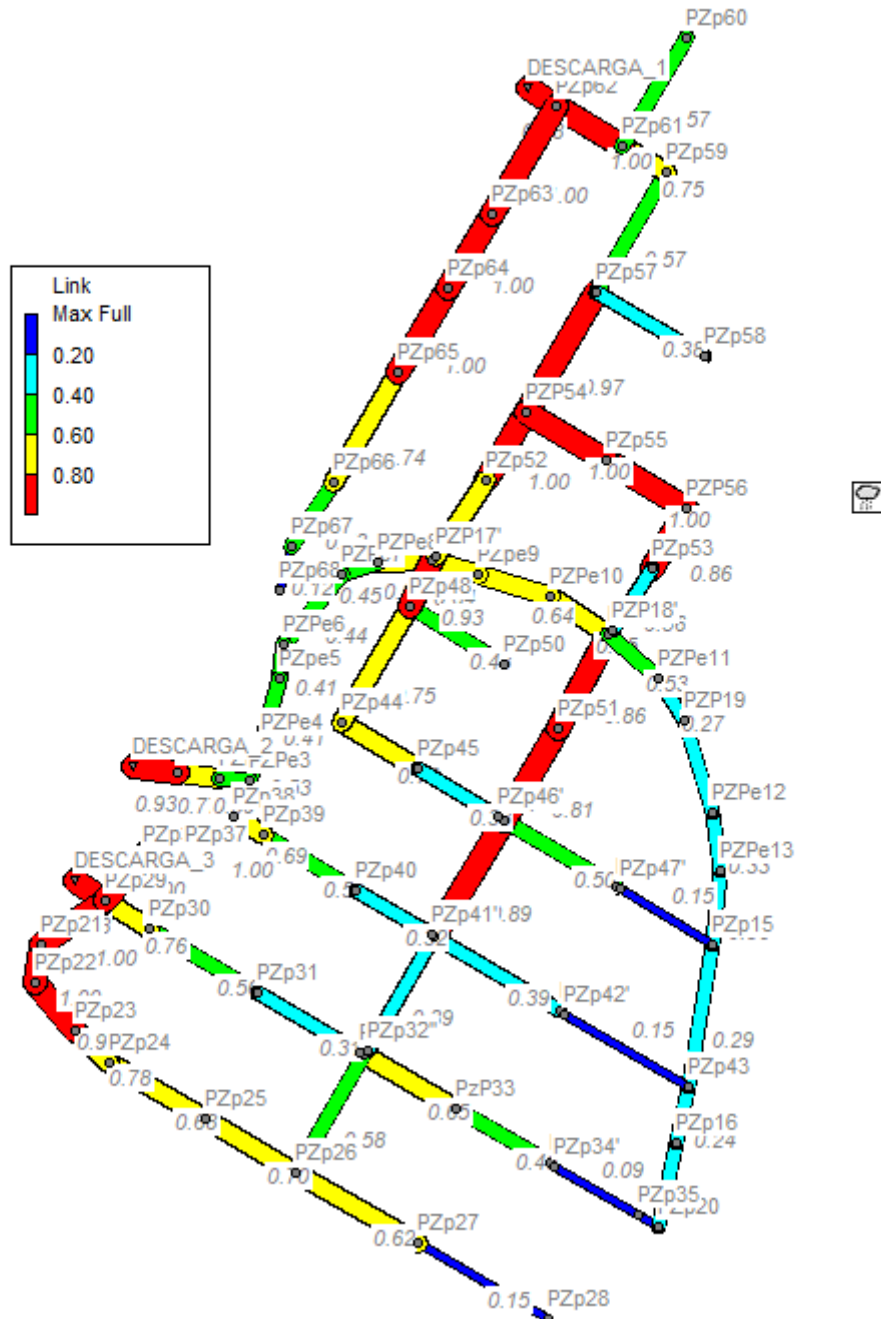
Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	14.42
Volumen de escorrentía (ha-m)	0.270
Escorrentía superficial (mm)	11.85
Infiltración (ha-m)	0.007
Infiltración (mm)	0.32
Error de continuidad (%)	-0.47
Volumen entrante/saliente (ha-m)	0.269
Nodos no convergentes (%)	<0.30

Fuente: Propia.

Una tormenta de corta duración y alta intensidad demanda mucho de la capacidad del alcantarillado para evacuar agua rápidamente. Este tipo de modelación es clave para encontrar puntos críticos de congestión y afinación del diseño, especialmente en zonas donde los eventos extremos de corta duración pueden causar inundaciones localizadas.

En la figura N°5.5 se puede observar la capacidad de las tuberías a la cual trabaja el sistema.

Figura 5.5: Capacidad a la cual trabajan las tuberías (12 minutos) – (5 años retorno)



Fuente: Propia.

5.1.5 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 12 MINUTOS – 10 AÑOS DE RETORNO

El modelamiento realizado para un periodo de retorno de 10 años y una duración de lluvia de 12 minutos, realizamos un modelo en la cooperativa Eloy Alfaro de la capacidad hidráulica del sistema bajo lluvias intensas y concentradas en un corto período. La precipitación total acumulada fue de 19.68 mm, y el volumen de escorrentía superficial acumulada se estima en 0.38 hectáreas-metros o 16.67 mm sobre la superficie. Debido a esto, el valor de infiltración fue insignificante (0.008 hectáreas-metros o 0.34 mm), dada la alta intensidad de la lluvia en tan poco tiempo. El valor final de almacenamiento fue una cifra notable de 0.063 hectáreas-metros (2.77 mm), lo que indica cierta acumulación temporal que potencialmente refleja limitaciones en la capacidad de evacuación del sistema.

Según los datos de balance de continuidad, el error en el flujo de agua para estos períodos es del -0.47%; la entrada total en tiempo húmedo fue de 0.378 hectáreas-metros (3.78 millones de litros) y la descarga efectiva corresponde a 0.295 hectáreas-metros (2.95 millones de litros), lo que significa que la pérdida por inundación es de 0.036 hectáreas-metros. Los resultados más útiles de la modelización se pueden encontrar en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Parámetros obtenidos en la simulación (12 minutos) – (5 años retorno)

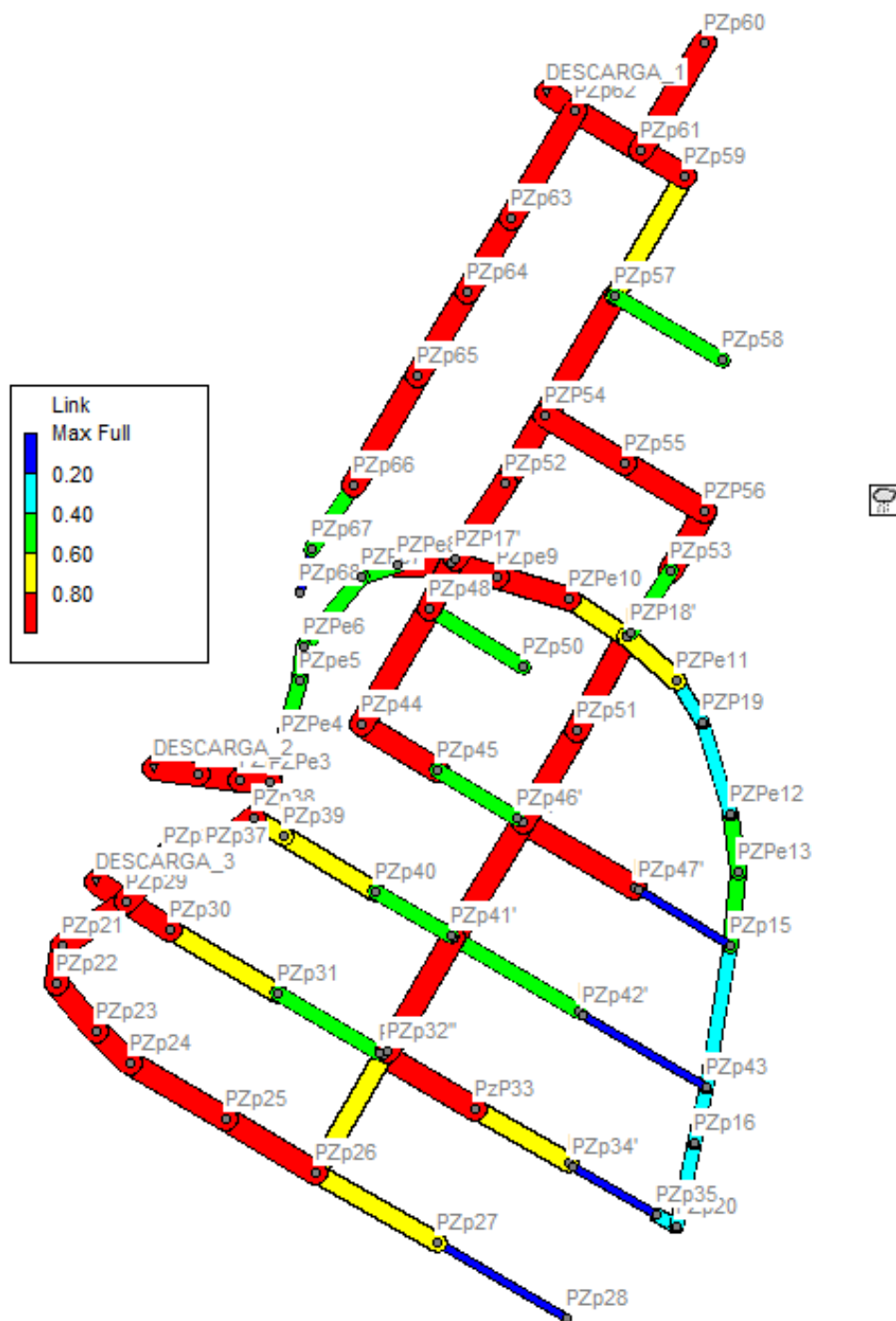
Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	19.68
Volumen de escorrentía (ha-m)	0.380
Escorrentía superficial (mm)	16.67
Infiltración (ha-m)	0.008
Infiltración (mm)	0.34
Error de continuidad (%)	-0.47
Volumen entrante/saliente (ha-m)	0.378
Nodos no convergentes (%)	37.90

Fuente: Propia.

Además, estos resultados nos permiten caracterizar la respuesta del sistema a la intensificación de las lluvias, destacando la necesidad de calibrar aún más el modelo y evaluar posibles expansiones o provisiones complementarias para asegurar la efectividad del sistema de alcantarillado pluvial. La modelización para un período de retorno de 10 años sigue siendo esencial, ya que puede servir como referencia básica

en el diseño urbano considerando la frecuencia y severidad de eventos como el modelado aquí. En la Figura No. 5.6, se puede ver la capacidad de las tuberías a la que opera el sistema.

Figura 5.6: Capacidad a la cual trabajan las tuberías (12 minutos) – (10 años retorno)



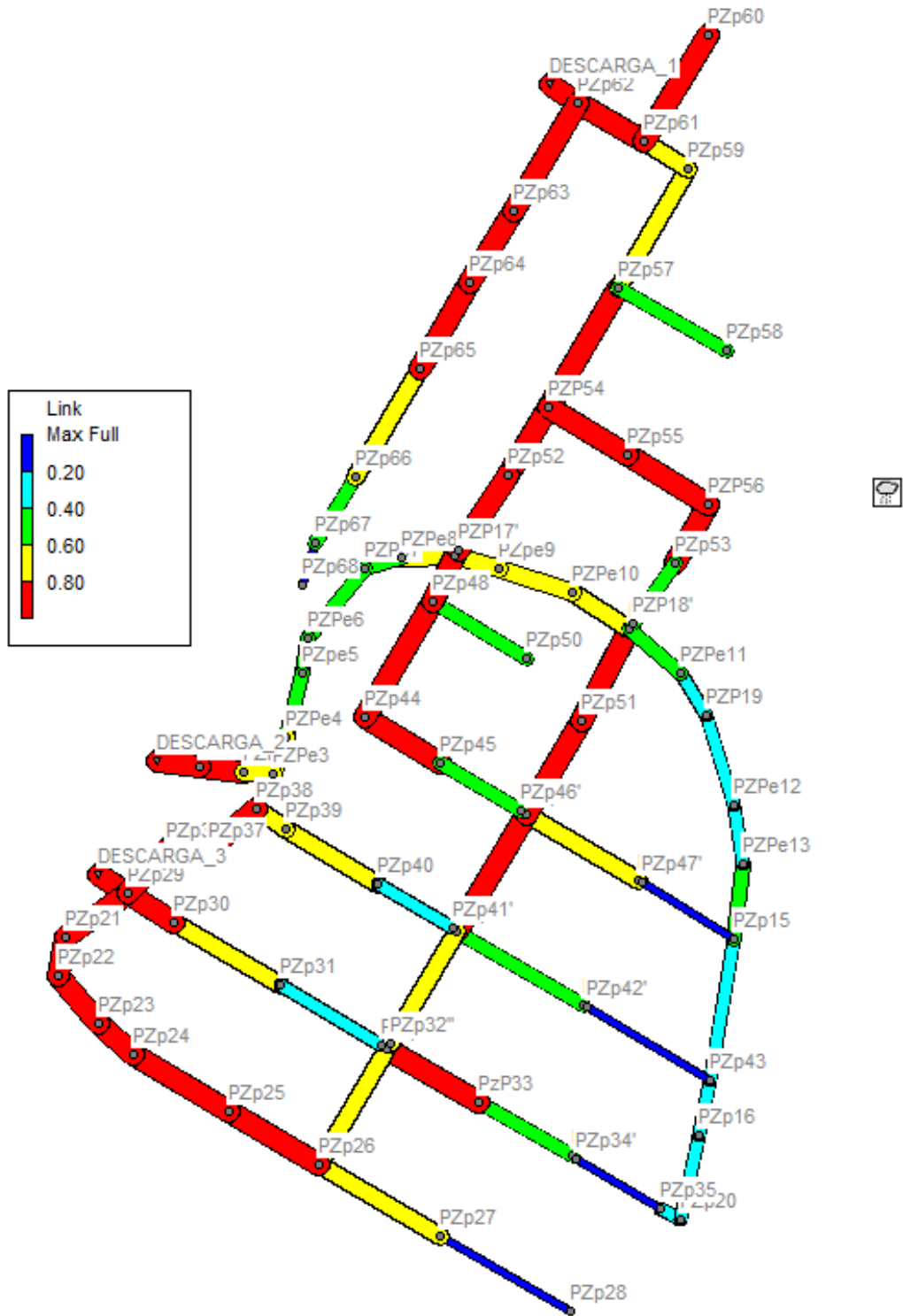
Fuente: Propia.

La mayoría de los enlaces principales están en rojo, es decir, flujos cercanos o iguales al 80% o más de su capacidad máxima, mostrando que hay una alta demanda hidráulica para la red en el pico del evento. Llevar los conductos cerca de la capacidad máxima significa que existe el riesgo de congestión y posibles desbordamientos si ocurre un evento de severidad casi igual o incluso mayor del mismo tipo o similar a este hidrograma. Esta característica muestra la necesidad de una correcta evaluación del modelo y la implementación de acciones de mantenimiento, expansiones o instalaciones de infraestructura complementaria que optimicen la capacidad hidráulica del sistema. Además, se enfoca en la importancia de considerar escenarios probables de lluvias intensas y breves para minimizar los impactos adversos en áreas densamente urbanizadas debido al aumento de eventos climáticos extremos y tendencias climáticas observadas en Ecuador en la última década.

5.1.6 MODELAMIENTO CON UN TIEMPO DE DURACIÓN DE LLUVIA DE 12 MINUTOS – 25 AÑOS DE RETORNO

El modelo en el EPA-SWMM considerado para una tormenta de 25 años de periodo de retorno y duración de 12 minutos muestra que el sistema de drenaje pluvial opera bajo condiciones más exigentes, con varios tramos de tuberías trabajando a máxima capacidad durante el evento de diseño los mismos que se pueden apreciar en la figura 5.7 que se expone a continuación.

Figura 5.7: Capacidad a la cual trabajan las tuberías (12 minutos) – (25 años retorno)



Fuente: Propia.

Se observó que la precipitación total fue, respectivamente, de 0.417 ha (18.259 mm) y las pérdidas por infiltración fueron menores a 0.008 ha (0.331 mm). La escorrentía superficial acumulada fue de 15.36 mm (0.351 hectáreas-m) y el volumen evacuado al exterior llegó a 2.776 millones de litros (0.278 ha). Se muestra que las pérdidas por inundación son iguales a 0.026 ha (0.261 millones de litros), aproximadamente el 7.5% del volumen estimado gestionado por el sistema. Tanto la escorrentía superficial como los errores de flujo (en conductos) se han visto por debajo del 1% para mantener el equilibrio hídrico en general. La modelización, como se describe en la Tabla 5.6, ha obtenido implicaciones principales.

Tabla 5.6: Parámetros obtenidos en la simulación (12 minutos) – (25 años retorno)

Parámetro	Valor
Precipitación total (mm)	18.259
Volumen de escorrentía (ha-m)	0.351
Escorrentía superficial (mm)	15.360
Infiltración (ha-m)	0.008
Infiltración (mm)	0.331
Error de continuidad (%)	-0.47
Volumen entrante/saliente (ha-m)	0.348
Nodos no convergentes (%)	33.03

Fuente: Propia.

En resumen, el sistema procesa la mayor parte del agua de lluvia durante condiciones limitantes, pero debido a las grandes pérdidas por inundaciones y a varias áreas y secciones que operan a plena capacidad, es de gran importancia analizar medidas de drenaje complementarias y revisar los detalles hidráulicos en secciones y nodos críticos para evitar sobrecargas y eventos de inundación recurrentes durante tormentas de diseño extremas. La Tabla 5.7 resume los principales parámetros y pone en perspectiva las diferencias y tendencias dependiendo del período de retorno y la duración de la tormenta modelada, con el fin de analizar el comportamiento de la red y la capacidad de respuesta a diferentes eventos de diseño.

Tabla 5.7: Resumen de datos obtenidos en las distintas modelaciones

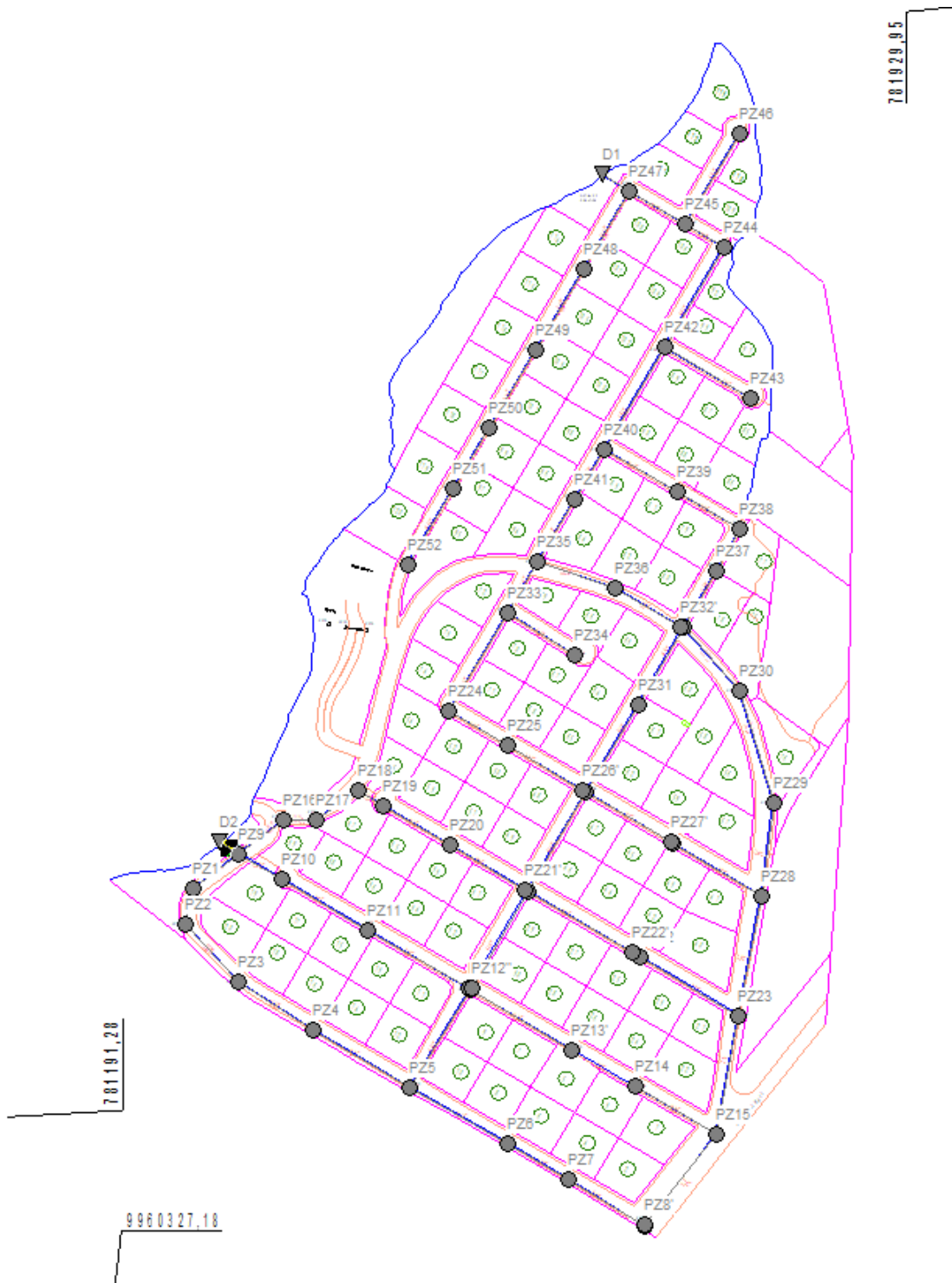
Escenario	Resumen comparativo de resultados						
	Precipitación total (mm)	Vol. escorrenta (ha-m)	Escor. superficial (mm)	Infiltración (ha-m)	Infiltración (mm)	Error continuidad	Nodos no convergentes
24 h, 5 años retorno	48.92	0.987	43.23	0.129	5.652	-0.012	0.3
24 h, 10 años retorno	66.69	1.376	60.29	0.145	6.36	-0.013	0.3
24 h, 25 años retorno	61.9	1.27	55.64	0.142	6.22	-0.013	0.3
12 min, 5 años retorno	14.42	0.27	11.85	0.007	0.32	-0.47	0.3
12 min, 10 años retorno	19.68	0.38	16.67	0.008	0.34	-0.47	37.9
12 min, 25 años retorno	18.26	0.351	15.36	0.008	0.331	-0.47	33.03

Fuente: Propia.

Al comparar los caudales máximos registrados con el método racional y con el EPA-SWMM, se puede observar que para eventos de tormenta intensos y de corta duración (12 minutos), el método racional tiende a subestimar los picos de escorrentía en comparación con los calculados con el modelo dinámico, mientras que para lluvias de 24 horas las diferencias son menores. Este comportamiento coincide con lo que se ha reportado en estudios previos de drenaje urbano, donde se ha documentado que los modelos simplificados de tipo racional representan adecuadamente tormentas de duración similar al tiempo de concentración, pero pierden la capacidad de reproducir los picos instantáneos en eventos muy concentrados. De manera similar, los resultados del SWMM para la cooperativa Eloy Alfaro exhiben tendencias análogas a otros estudios realizados en cuencas urbanas, donde la red de aguas pluviales muestra una mayor sensibilidad a los cambios en la intensidad de la lluvia y el período de retorno que la red sanitaria, cuyo comportamiento es más estable ya que está dominado por aportes domésticos relativamente constantes.

5.2 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL ALCANTARILLADO SANITARIO

Figura 5.8: Red de Alcantarillado Sanitario de la cooperativa Eloy Alfaro – EPA SWMM



Fuente: Propia.

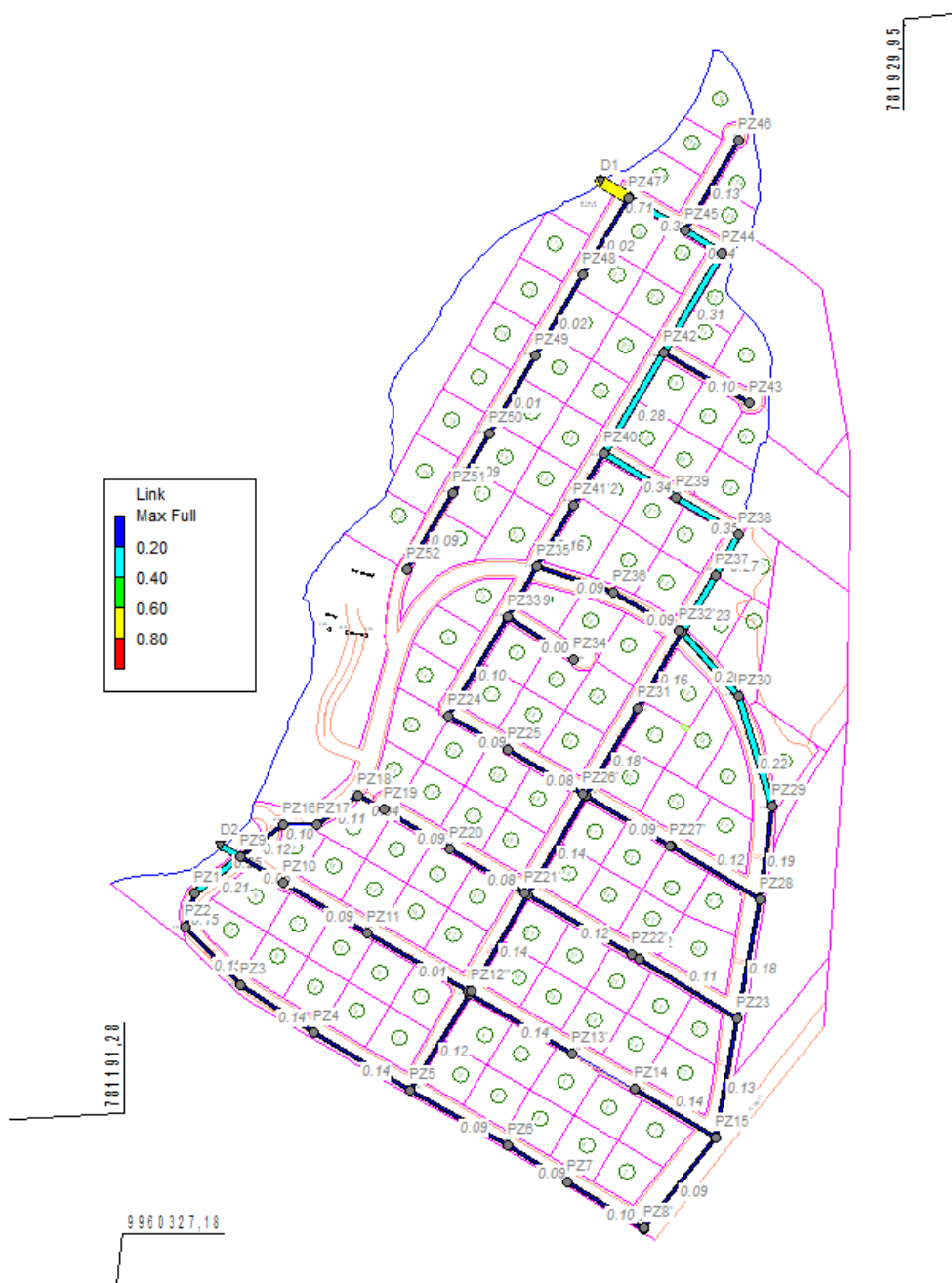
El modelo SWMM demostró para la misma operación que el flujo en todas las secciones es hidráulicamente estable, y que el balance de continuidad no presenta pérdidas debido a inundaciones y errores despreciables (0%) en la contabilidad de volumen. Además, no hay problemas de inestabilidad o no convergencia en los nodos; todas las etapas experimentaron condiciones estables durante el período analizado. Eso significa que, según el modelo, el sistema de alcantarillado puede transmitir los flujos calculados en Excel y no tener que lidiar con grandes problemas hidráulicos. Sin embargo, SWMM proporciona un detalle mucho más fino que permite identificar el comportamiento en cada sección y garantiza que los diámetros, pendientes y velocidades no creen confluencias críticas, complementando y confirmando el proceso de dimensionamiento convencional. En la figura 18, a continuación, podemos ver la capacidad a la que están operando las tuberías. A continuación, en la tabla N°5.8 se puede observar los resultados de la comparación de los alcantarillados sanitarios (convencional – modelamiento).

Tabla 5.8: Comparación de alcantarillado sanitario (convencional-modelamiento)]

Comparación del alcantarillado sanitario									
Referencia	Tramos	Caudales Lts/seg		Diámetros Requeridos mm		Capacidad Hidráulica y/H		Velocidades m/seg	
		Convencional	SWMM	Convencional	SWMM	Convencional	SWMM	Convencional	SWMM
Descarga 2	PZ16-PZ9	0.897	1.5	200	200	0.104	0.12	0.643	0.74
	PZ1-PZ9	2.762	5.76	200	200	0.17	0.21	0.738	1.19
	PZ10-PZ9	1.043	1.5	200	200	0.037	0.05	1.102	2.46
Descarga 1	PZ45-PZ47	10.429	20.3	200	200	0.274	0.33	1.503	2.27
	PZ48-PZ47	2.16	2.22	200	200	0.158	0.14	0.665	0.69

Fuente: Propia.

Figura 5.9: Capacidad a la cual trabajan las tuberías – Alcantarillado Sanitario



Fuente: Propia.

5.3 COMPARACIÓN DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL CONVENCIONAL CON EL MODELAMIENTO

El diseño convencional, realizado en Excel con base en el método convencional, el mismo que se puede apreciar en el (anexo 2), donde se utilizó un período de retorno de 5 años y un tiempo de concentración de 12 minutos; se consideraron coeficientes de escorrentía típicos para superficies pavimentadas (0.51) y rugosidad de material PVC

(0.013). Por otro lado, se aplicó la modelación hidráulica EPA SWMM, habiéndose empleado con diferentes períodos de retorno (5, 10 y 25 años) y duraciones de lluvia de 12 minutos y 24 horas para observar la respuesta dinámica del sistema a diferentes tipos de tormentas.

Esto se demuestra con los datos de salida: el modelo SWMM proporciona un equilibrio hídrico completo: el equilibrio numérico reduce la discrepancia. La escorrentía, proporcional al período de retorno, aumenta, mientras que la infiltración representa entre el 10% y el 15% del volumen total precipitado, reflejando condiciones de suelo semi-impermeable en el área urbana modelada. El diseño en Excel dimensionó las tuberías para funcionar parcialmente llenas con una velocidad mínima de sedimentación y un máximo de 9 m/s, independientemente del almacenamiento transitorio o los efectos de sobrecarga. Por el contrario, la modelización con SWMM permitió un análisis en profundidad del comportamiento hidrodinámico, mostrando algunos enlaces críticos (por ejemplo, PZp68 y PZp46) con un 80-100% de capacidad cuando se someten a lluvias excesivas, lo que indica puntos sensibles cuando ocurren eventos severos.

Según la Norma Ecuatoriana para el Diseño de Sistemas de Alcantarillado, el diseño de sistemas pluviales y sanitarios se rige por parámetros técnicos, para la eficiencia hidráulica y la durabilidad. Se sugieren períodos de retorno en áreas residenciales entre 5 y 10 años, así como en áreas urbanas consolidadas entre 10 y 25 años, con una velocidad mínima de autolimpieza de 0.6 m/s para evitar la acumulación de sedimentos. De manera similar, con respecto a los conductos de pequeño diámetro, las pendientes mínimas deben ser del 0.5% para tener un flujo ininterrumpido sin estancamiento y se utiliza PVC con un coeficiente de rugosidad $n = 0.013$, de acuerdo con las prácticas nacionales. El diseño convencional estructural y de dimensionamiento evaluado es compatible con los requisitos de diseño establecidos, pero no toma en cuenta la variabilidad temporal de la precipitación, ni los fenómenos de almacenamiento transitorio. La modelación hidráulica con EPA SWMM con diferentes duraciones y períodos de retorno proporciona una imagen más precisa y realista del comportamiento dinámico del sistema pluvial durante eventos de lluvia. A continuación, en la tabla N° 5.9 se puede observar la comparación del alcantarillado pluvial (convencional – modelamiento).

Tabla 5.9: Comparación de alcantarillado pluvial (convencional-modelamiento)

Referencia	Tramos	Comparación del alcantarillado pluvial							
		Caudales Lts/seg		Diámetros Requeridos mm		Capacidad Hidráulica y/D		Velocidades m/seg	
		Convencional	SWMM	Convencional	SWMM	Convencional	SWMM	Convencional	SWMM
Descarga 1	PZp61-PZp62	628.62	1361.89	700	900	0.45	0.74	3.82	2.75
	Pzp63-PZp62	384.58	676.19	600	800	0.53	0.75	2.61	1.91
Descarga 2	PZPe2-PZPe1	1273.91	2861.69	1100	1100	0.3	0.76	5.23	3.76
Descarga 3	PZp36-PZp29	165.58	320.01	400	1100	0.68	0.71	1.86	0.73
	PZp30-PZp29	185.43	383.86	300	300	0.36	0.76	7.95	6.71
	PZp21-PZp29	248.69	696.06	500	900	0.48	0.72	2.75	2.21

Fuente: Propia.

6 CONCLUSIONES

- La modelización mediante el uso del EPA SWMM permitió que las estimaciones de los flujos máximos fueran mucho mayores que las obtenidas por el enfoque convencional, superando el 124% en alcantarillas pluviales y más del 100% en alcantarillas sanitarias, siendo las condiciones críticas el mayor beneficio. De manera similar, el diámetro necesario y las capacidades hidráulicas de las tuberías para SWMM resultaron ser un 28.5% más grandes que la construcción tradicional y las velocidades de flujo se duplicaron o triplicaron para estos métodos, lo que indica que los parámetros hidráulicos fueron marcadamente subestimados en el método convencional.
- La comparación integral entre el diseño convencional y el modelamiento dinámico en EPA-SWMM confirma el cumplimiento de los objetivos específicos del estudio: se verificó el desempeño hidráulico de las redes sanitaria y pluvial bajo distintos periodos de retorno (5, 10 y 25 años) y duraciones de lluvia (12 minutos y 24 horas), se identificaron tramos y nodos con sobrecarga o riesgo de inundación, y se propusieron ajustes de diámetros, pendientes y configuraciones de red que incrementan la capacidad de transporte y la seguridad hidráulica del sistema de la Cooperativa Eloy Alfaro
- El software EPA-SWMM, utilizando simulación dinámica, permitió el descubrimiento de ubicaciones sobrecargadas, peligros de erosión y problemas operativos que no podían ser detectados por enfoques más simples. Estas diferencias numéricas enfatizan la necesidad de incorporar herramientas computacionales para la recalibración y rediseño de sistemas sanitarios y pluviales, es decir, que los parámetros de diseño coincidan con la realidad hidráulica y climática de las áreas urbanas que están sujetas a eventos de lluvia severos.
- El diseño tradicional cumple con las regulaciones existentes, pero los hallazgos muestran que puede subdimensionar la infraestructura y aumentar la vulnerabilidad a fenómenos hidrológicos altamente intensos. El uso de SWMM, que está diseñado para promover la detección de puntos críticos optimizando

diámetros y profundidades en secciones comprometidas, ha proporcionado recomendaciones sobre cómo hacer que la red sea más resiliente con respecto tanto a la resiliencia como a la seguridad funcional.

- Esta investigación ofrece un enfoque replicable para el uso de modelado avanzado en proyectos de saneamiento urbano a gran escala para verificar su efectividad en condiciones extremas, lo que podría impulsar mejoras en la planificación técnica, a escalas municipales y nacionales. La exploración conjunta del modelado tradicional e hidrodinámico para el crecimiento urbano y la infraestructura adaptada a la variabilidad climática conduce al diseño de instalaciones más rápidas, seguras y receptivas.
- El monitoreo en tiempo real, la validación post-implementación y el análisis de sensibilidad deberían ampliarse en estudios futuros para consolidar la fiabilidad de los modelos y mejorar la toma de decisiones en la ingeniería sanitaria urbana.
- También se sugiere que los organismos municipales y académicos utilicen consistentemente el modelado dinámico en el diseño y operación de redes de alcantarillado, integrando datos actuales y enfoques participativos para que el servicio sea sostenible y eficiente.

REFERENCIAS

- Bermeo Cuzco, V. A., & Vega Hernández, E. E. (2024). *Evaluación y ampliación del sistema de alcantarillado sanitario: Estudio de caso en Ecuador* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27038/1/UPS-CT011216.pdf>
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater hydrology*. McGraw-Hill.
- Calle Rivero, G. I. (2019). *Diseño de los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial de una comunidad urbana en Ecuador* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/51433/1/T-70540.pdf>
- Chow, V. T. (2010). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.
- Concha, G., & Gómez, A. (2011). Aproximación a la modelización del drenaje dual utilizando SWMM 5.0. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 170–180. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v34n2/riha09213.pdf>
- Diana. (s. f.). [Tesis de grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. <https://dspace.utelvt.edu.ec/bitstream/123456789/1363/3/Diana.pdf>
- Fernández, J. P., Fariña, J. A., & Marsili-Libelli, S. (2024). *SWMM como herramienta para la gestión pluvial urbana (Proyecto Final Integrador EHvS-3IA)*. Universidad Nacional de San Martín. <https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/3007/1/PFI%20EHvS-3IA%202024%20EEP.pdf>
- Gómez-Belandria, D., & Mejía-Toro, L. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y modelación con EPA SWMM. *Ingeniería y Universidad*, 22(2), 302–322. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672018000200032
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Huber Plaza Villamizar, J. (2021). *SWMM para la simulación y modelación de inundaciones urbanas en Colombia* [Tesis de grado, Universidad de Pamplona]. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/10037/1/Melchan_Villamizar_2021_TG.pdf
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 005-9:2011. Sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial: Requisitos de diseño*. INEN.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Actualización del estudio de lluvias intensas en el Ecuador*. INAMHI.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2020). *Normas y lineamientos para el manejo de aguas residuales en el territorio ecuatoriano*. <https://www.ambiente.gob.ec>
- Ochoa Vásquez, M. (2023). *Aplicación del software EPA SWMM para el análisis del diseño de un sistema de alcantarillado sanitario y pluvial: Caso Bullcay (Ecuador)* [Tesis de grado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/4af65b24-162e-4f99-952a-74e5167105ca>
- Parnas, A. (2021). *Evaluating three commonly used infiltration methods for urban sandy soils* [Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology]. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/3035794/Parnas.pdf>
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model user's manual (Version 5.1)*. United States Environmental Protection Agency, Office of Water. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Secretaría Nacional del Agua. (2012). *Manual de diseño hidráulico sanitario y pluvial para sistemas de agua potable y alcantarillado*. SENAGUA.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). *Storm Water Management Model (SWMM): Hydrology and hydraulics reference manual*. U.S. EPA, Office of Water.

Universidad de los Andes. (s. f.). [Tesis

académica]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/8b0f4b13-7fb3-4486-8841-466592eb686e/download>

Universidad Nacional Autónoma de México. (2013, enero). [Tesis

profesional]. <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/enero/0687000/0687000.pdf>

Universidad Politécnica de Cartagena. (2021). *Diseño de modelo de drenaje dual*

urbano mediante EPA SWMM 5.0: Caso El Algar, Cartagena [Tesis de máster]. <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/12b6217b-fab4-4ca3-98e8-aaa9699b5c9d/content>

Universidad de Valencia. (s. f.). Cortés, Y. *Modelación sostenible de sistemas urbanos de drenaje usando SWMM 5.1.0* [Tesis de

maestría]. [https://repositoriobibloetcas.uv.cl/bitstream/handle/uvsc1/9790/Cort%C3%A9s%20Yanedil%20Modelaci%C3%B3n%20de%20sistemas%20urbanos%20de%20Drenaje%20Sostenible%20\(SUDS\)%20usando%20SWMM%205.1.0.pdf](https://repositoriobibloetcas.uv.cl/bitstream/handle/uvsc1/9790/Cort%C3%A9s%20Yanedil%20Modelaci%C3%B3n%20de%20sistemas%20urbanos%20de%20Drenaje%20Sostenible%20(SUDS)%20usando%20SWMM%205.1.0.pdf)

ANEXOS

ALCANTARILLADO SANITARIO CONVENCIONAL

ALCANTARILLADO SANITARIO PLUVIAL