



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
DRENAJE CON ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD PARA
LA ZONA URBANA DEL CANTÓN YACUAMBI**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

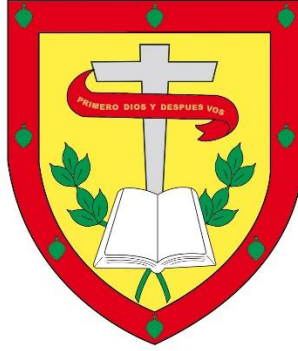
AUTOR: TALIA BEATRIZ MOROCHO PAQUI

DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA INDUSTRIA
Y CONSTRUCCION**

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
DRENAJE CON ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD PARA LA ZONA
URBANA DEL CANTÓN YACUAMBI**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

AUTOR: TALIA BEATRIZ MOROCHO PAQUI

DIRECTOR: JOSE LUIS SOLANO PELAEZ

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Talia Beatriz Morocho Paqui portador de la cédula de ciudadanía N° 1900959188. Declaro ser el autor de la obra: **“Propuesta de implementación de un sistema de drenaje con enfoque de sostenibilidad para la zona urbana del cantón Yacuambi”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 02 de diciembre de 2025

F: 
Talia Beatriz Morocho Paqui
1900959188

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Yo **Ing. José Luis Solano Peláez**, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta, **TALIA BEATRIZ MOROCHO PAQUI**, egresada de la UNIDAD ACADEMICA DE INGENIERIA INDUSTRIA Y CONSTRUCCION, carrera de INGENIERIA CIVIL, fue desarrollado bajo mi supervisión y tutoría con el tema: **“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DRENAJE CON ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD PARA LA ZONA URBANA DEL CANTÓN YACUAMBI”**.



Ing. José Luis Solano Peláez

CI: 0103101937

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios y a la Virgencita del Cisne que han sido fuentes de fortaleza y guía en cada paso de este camino.

Desde lo más profundo de mi corazón se lo dedico a mi padre, Manuel Morocho que ha sido pilar fundamental para poder culminar mis estudios, dándolo todo hasta cuando no lo tenía, hacia lo posible para solucionar, Mi madre Laudina Paqui por su amor inmenso, así como la confianza, por inculcarme el valor del esfuerzo y por ser ejemplo constante de dedicación y humildad. Gracias por apoyarme siempre y confiar en mis capacidades. A mis hermanos, Marlene, Norma, Romel, Nelly, Taylor, Carlos por ser compañía y respaldo en los momentos más importantes, por su apoyo y comprensión incondicional.

A mi hijo, Isaac, cuya presencia ha sido mi mayor inspiración, su sonrisa y ternura iluminaron mis días y me alentaron a continuar aun en medio del cansancio y las dificultades. Este logro es también para él, con todo mi amor. Así mismo lo dedico a mi esposo, su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, su paciencia y aliento permanente me ayudaron a seguir adelante. Gracias por caminar conmigo en este proceso, por sostenerme en los momentos de incertidumbre y celebrar conmigo cada avance alcanzado.

A mi tutor de tesis, Ing. José Luis Solano, por brindarme de manera generosa su experiencia y saberes durante todo este proceso, orientándome con paciencia y precisión en cada fase del trabajo. De igual manera, manifiesto mi profundo agradecimiento a la Ing. Daniela Ortiz, cuyo acompañamiento constante, guía y aportes fueron determinantes para el desarrollo y finalización de esta investigación

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la Virgencita del Cisne, por permitirme llegar hasta este momento con salud, fortaleza y fe. Su guía espiritual fue luz en los momentos de cansancio y dudas, sosteniendo mi corazón y mi voluntad para continuar.

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su esfuerzo incansable, por las veces en que, aun cuando las circunstancias fueron difíciles, hicieron lo imposible para que nunca me faltara nada. Su sacrificio silencioso, su trabajo honesto y su amor incondicional me han enseñado que los sueños se alcanzan con perseverancia y humildad. Este logro es el reflejo de todo lo que me han dado, de sus manos cansadas, sus palabras de aliento y su fe en mí incluso cuando yo misma dudaba.

A mis hermanos, por estar siempre presentes con apoyo sincero, comprensión y cariño. Gracias por acompañarme en los momentos importantes y por celebrar conmigo cada paso alcanzado.

A mi hijo, Isacc, quien ha sido mi mayor fuerza y motivación. Gracias por dar sentido a mis días, por recordarme con tu mirada y tu sonrisa que valen la pena todos los esfuerzos. Este triunfo es también para ti, con todo mi amor. También a mi esposo, por su apoyo incondicional, por su paciencia, su compañía y sus palabras que me animaron a continuar. Gracias por estar a mi lado, por comprender mis ausencias y cansancios, y por creer en mí incluso en los momentos más exigentes.

RESUMEN

La presente investigación analiza las deficiencias del sistema de drenaje urbano en la zona central del cantón Yacuambi, donde la alta impermeabilidad superficial genera escorrentías elevadas y reboses en nudos del alcantarillado pluvial. La importancia del estudio radica en la necesidad de implementar soluciones sostenibles que mejoren la gestión de aguas lluvias sin recurrir a la ampliación de la infraestructura existente. El objetivo general fue diseñar un sistema de drenaje con enfoque de sostenibilidad mediante la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), tales como jardines de lluvia y pavimento permeable. El estudio es de tipo descriptivo aplicado, y se modeló la red utilizando el software EPA SWMM, considerando como población el área urbana consolidada de la parroquia 28 de Mayo. Los resultados demostraron que los jardines de lluvia reducen aproximadamente un 29.55% del caudal pico, mientras que el pavimento permeable disminuye alrededor del 13.35%, disminuyendo también los reboses y mejorando la eficiencia hidráulica del sistema. Se concluye que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son una alternativa viable, sostenible y adaptable al territorio.

Palabras clave: drenaje, escorrentía superficial, sostenibilidad, SWMM

ABSTRACT

This study analyzes deficiencies in the urban drainage system in the central area of the Yacuambi canton, where high surface impermeability leads to increased runoff and overflows at storm sewer junctions. The importance of the study lies in the need to implement sustainable solutions that improve stormwater management without expanding existing infrastructure. The general objective was to design a drainage system focusing on sustainability by incorporating Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS), such as rain gardens and permeable pavement. The study follows a descriptive applied approach, and the current network was modeled using the EPA Storm Water Management Model (SWMM) software, considering the consolidated urban area of the 28 de Mayo parish as the study population. The results showed that rain gardens reduce peak flow by approximately 29.55%, while permeable pavement reduces it by around 13.35%, also reducing overflows and improving the hydraulic efficiency of the system. It is concluded that Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) are a viable, sustainable, and adaptable alternative for the territory.

Keywords: drainage, surface runoff, sustainability, SWMM

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE ANEXOS.....	XV
CAPÍTULO I.....	- 1 -
1 INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	- 1 -
1.2 OBJETIVOS	- 4 -
1.2.1 Objetivo General.....	- 4 -
1.2.2 Objetivo Especifico	- 4 -
CAPÍTULO II.....	- 3 -
2. REVISIÓN DE LITERATURA	- 3 -
2.1 FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA APLICADOS AL DRENAJE URBANO.....	- 3 -
2.2 CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL ALCANTARILLADO PLUVIAL EXISTENTE	- 4 -
2.2.1 Aspectos Hidráulicos	- 5 -
2.4 LINEAMIENTOS TÉCNICOS APLICABLES AL ANÁLISIS DE REDES DE DRENAJE PLUVIAL	- 8 -
2.4.1 Aspectos hidrológicos.....	- 8 -
2.4.2 Datos necesarios para la evaluación del alcantarillado pluvial existente.....	- 11 -
2.5 ACTIVIDADES DE CAMPO PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA PLUVIAL	- 11 -
2.6 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS).....	- 24 -

2.6.1 Funcionamiento de los SUDS.....	- 24 -
2.6.2. Tipo de drenaje sostenible.....	- 26 -
2.6.3 La cadena de drenaje sostenible.....	- 33 -
2.7 ASPECTOS TÉCNICOS ADICIONALES A CONSIDERAR.	- 34 -
2.7.1 Redes de recolectores y capacidad disponible.....	- 34 -
2.7.2 Infraestructuras existentes.....	- 35 -
2.8 BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)	- 36 -
2.9 HERRAMIENTAS Y MODELOS PARA EL ANÁLISIS (SWMM, SIG, ETC.).....	- 38 -
2.9.1 Storm Water Management Model EPA-SWMM.....	- 38 -
2.9.2 Modelos de simulación computacional	- 42 -
2.9.3 Herramientas Low Impact Development (LID).....	- 44 -
2.10 ELEMENTOS FÍSICOS ESENCIALES PARA LA MODELACIÓN EN SWMM	- 45 -
2.10.1 Métodos computacionales para el cálculo de escorrentía	- 53 -
2.11 REVISIÓN DE CASOS DE ESTUDIO EN CONTEXTOS URBANOS SIMILARES.....	- 60 -
CAPÍTULO III.....	- 68 -
3. MATERIALES Y MÉTODOS (METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN)	- 68 -
3.1 INFORMACIÓN BASE PARA EL ANÁLISIS DEL DRENAJE PLUVIAL	- 71 -
3.1.1 Estudios topográficos	- 71 -
3.2 SECTORIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	- 72 -
3.3. REDES DE DRENAJE EXISTENTES.....	- 78 -
3.4 SUPERFICIE DE RODADURA.....	- 78 -
3.5 USO DEL ÁREA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS APORTANTES.....	- 80 -
3.6 DETERMINACIÓN DE SUBCUENCAS URBANAS	- 81 -
3.8 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS	- 85 -
3.9 REVISIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO DE DRENAJE PLUVIAL URBANO EXISTENTE EN BASE A ESCENARIOS DE MAYOR EXIGENCIA HIDRÁULICA	- 91 -
3.10 MODELAMIENTO DEL DRENAJE PLUVIAL EXISTENTE CON EL PROGRAMA EPA SWMM CON Y SIN LOS SUDS	- 92 -
3.10.1 Criterios para el modelo del drenaje pluvial existente	- 93 -
3.10.2 Propuesta de implementación SUDS	- 101 -

CAPÍTULO IV.....	- 106 -
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 106 -
4.1 DISEÑO DEL DRENAJE PLUVIAL Y ANÁLISIS DE RESULTADO.....	- 106 -
4.1.1 Anisáis de la red actual para un Tr:25 años	- 106 -
4.1.2 Resultados de análisis de la red implementando SUDS	- 115 -
RESULTADO Y DISCUSIÓN 1	- 115 -
RESULTADO Y DISCUSIÓN 2	- 117 -
4.1.3 Comparación de caudales de los diferentes SUDS implementados y el sistema sin SUDS	- 119 -
CAPÍTULO V.....	- 121 -
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	- 121 -
5.1 CONCLUSIONES	- 121 -
5.2 RECOMENDACIONES	- 122 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 123 -
ANEXOS	- 126 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tubo parcialmente lleno _____	- 7 -
Figura 2: Ciclo hidrológico _____	- 9 -
Figura 3: Hietograma de diseño. _____	- 10 -
Figura 4: Curvas de intensidad IDF _____	- 18 -
Figura 5: Metodología del modelo matemático _____	- 22 -
Figura 6: Clasificación de los tipos de drenaje sostenible. _____	- 27 -
Figura 7: Esquema de una cubierta vegetada _____	- 27 -
Figura 8: Esquema de un parterre inundable _____	- 28 -
Figura 9: Balsas de detención y/o infiltración _____	- 29 -
Figura 10: Cunetas vegetales _____	- 29 -
Figura 11: Alcorques estructurales _____	- 30 -
Figura 12: Pavimentos permeables _____	- 31 -
Figura 13: Drenes filtrantes _____	- 31 -
Figura 14: Esquema de una zanja de infiltración _____	- 32 -
Figura 15: Depósitos reticulares _____	- 32 -
Figura 16: Humedades artificiales y estanques _____	- 33 -
Figura 17: Fases del proceso de gestión de los SUDS _____	- 34 -
Figura 18: Sistema de drenaje _____	- 39 -
Figura 19: Componentes físicos representados en un sistema de drenaje modelado con SWMM. - 41 -	-
Figura 20: Visión conceptual del modelo de escorrentía superficial. _____	- 43 -
Figura 21: Tipos de secciones transversales de conductos disponibles en el software EPA- SWMM. _____	- 52 -
Figura 22. Representación conceptual del proceso de escorrentía _____	- 54 -
Figura 23: Acumulación de agua en la zona céntrica de Yacuambi durante una lluvia intensa. -	68 -
Figura 24: Polígono del área de estudio _____	- 73 -
Figura 25: Subcuenca hidrográficas 18 de noviembre, dirección de flujo _____	- 74 -
Figura 26. Subcuenca hidrográfica Nueva vida, dirección de flujo _____	- 75 -
Figura 27: Subcuenca aportante de la zona oeste del área de estudio, dirección de flujo _____	- 77 -

Figura 28. Tipo de superficie de red vial _____	- 79 -
Figura 29: Mapa de dirección del flujo superficial y áreas de contribución hídrica. _____	- 82 -
Figura 30: Dirección de flujo superficial y puntos de descarga identificados en el área de estudio. -	83 -
Figura 31. Plano catastral del centro urbano 28 de mayo _____	- 84 -
Figura 32. Cotas de puntos utilizados para determinar las subcuencas. _____	- 85 -
Figura 33. Curvas IDF obtenidas a partir del ajuste estadístico de precipitaciones máximas mediante el método de Gumbel, aplicado a datos registrados por el INAMHI. _____	- 89 -
Figura 34: Mapa de proyecto con el que se diseñara en el programa SWMM _____	- 93 -
Figura 35. Uso de suelo del área de estudio de la parroquia 28 de Mayo. _____	- 97 -
Figura 36. Distribución temporal de lluvia correspondiente a un período de retorno de 25 años. _	- 100 -
Figura 37: Jardín de lluvias _____	- 102 -
Figura 38: Pavimentos permeables _____	- 104 -
Figura 39: Mapa de especificaciones del área de estudio del drenaje pluvial _____	- 107 -
Figura 40: Plano de red de alcantarillado pluvial _____	- 108 -
Figura 41. Plano de red de alcantarillado _____	- 108 -
Figura 42: Resultados de análisis de escorrentía en el programa SWMM _____	- 109 -
Figura 43: Análisis hidráulico _____	- 109 -
Figura 44: Escorrentía de cada subcuenca _____	- 110 -
Figura 45: Velocidades en las tuberías en el tiempo más crítico de 35 min. _____	- 111 -
Figura 46: Resultados de la capacidad máxima de cada tubería _____	- 112 -
Figura 47: Aporte de nodos en el programa SWMM _____	- 112 -
Figura 48: Caudales medios y máximos en los diferentes puntos de salida. _____	- 113 -
Figura 49: Resultados de la red actual (red 1) _____	- 114 -
Figura 50: Resultados de la red actual (red 2) _____	- 114 -
Figura 51: Resultados de la red actual. (red 3 y 4) _____	- 115 -
Figura 52: Resultados obtenidos con la implementación de SUDS. _____	- 115 -
Figura 53: Resultados mediante jardines verdes _____	- 116 -
Figura 54: resultados mediante la implementación de jardines verdes. _____	- 117 -

Figura 55: Salida del modelo hidrológico SWMM correspondiente al caso con pavimento permeable.	_____	- 117 -
Figura 56: Análisis con implementación de pavimento permeable	_____	- 118 -
Figura 57: Resultados con implementación de pavimentos permeables	_____	- 118 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Límites de velocidad máxima y coeficientes de rugosidad en distintos materiales de tuberías según SENAGUA (2010)	- 7 -
Tabla 2: Probabilidad de falla admisible en diferentes obras hidráulicas	- 15 -
Tabla 3: Periodo de retorno según la normativa SENAGUA	- 15 -
Tabla 4: Coeficiente de escorrentía según el tipo de superficie.	- 17 -
Tabla 5: Secuencia para determinar las curvas IDF	- 18 -
Tabla 6: Intensidades diarias (IdTR) de diferentes periodos de la estación M0502.	- 21 -
Tabla 7: Coeficientes de incremento poblacional,	- 23 -
Tabla 8: Funcionamiento de los SUDS	- 25 -
Tabla 9: Pretratamiento anterior a SUDS y procedencia del agua para cada tipología	- 37 -
Tabla 10: Elementos auxiliares para cada tipología	- 37 -
Tabla 11: Componentes estructurales del sistema de drenaje en SWMM	- 42 -
Tabla 13: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para escorrentía en superficies de subcuencas	- 46 -
Tabla 14: Valores referenciales de almacenamiento superficial según el tipo de cobertura del terreno.	- 47 -
Tabla 15: tipos de suelo según el NRCS	- 55 -
Tabla 16: Numero de curva para escorrentía (CN) según el SCS	- 57 -
Tabla 17: Resultados de la reducción del flujo máximo al implementar LID después del análisis de sensibilidad.	- 61 -
Tabla 18: Resultados del escenario LID.	- 62 -
Tabla 19: Resultados de análisis de la escorrentía total de la zona analizada bajo el modo de desarrollo tradicional (TD) y el modo de desarrollo de bajo impacto (LID).	- 64 -
Tabla 20: Resultados de rendimiento del sistema en modo TD y LID para diversos periodos de recurrencia.	- 64 -
Tabla 21: Resultados de rendimiento del sistema en modo TD y LID para diversos periodos de recurrencia.	- 65 -
Tabla 22: Coeficientes de escorrentía que se analizó según la ocupación del suelo del área de estudio	- 86 -

Tabla 23: Tabla de intensidades - Tiempo de duración _____	- 87 -
Tabla 24: Valores de intensidad máxima de lluvia asociados a un período de retorno de 25 años.	- 89 -
Tabla 25: Valores para la obtención de caudal de diseño, mediante el método racional _____	- 90 -
Tabla 26: Resumen del cálculo de CN de la zona urbana de 28 de mayo _____	- 96 -
Tabla 27: Precipitaciones de series temporales _____	- 100 -
Tabla 28: Porcentaje de área de cada subcuenca y su impermeabilidad _____	- 103 -
Tabla 29: Porcentaje de áreas que se usó para implementación de pavimentos permeables en el programa SWMM _____	- 104 -
Tabla 30: Comparación de caudales finales de la salida de la red 1. _____	- 119 -

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: sistemas de drenaje que tiene la parroquia 28 de mayo.	- 126 -
Anexo 2: mapas de susceptibilidad, de diferentes zonas del área de estudio.....	- 126 -
Anexo 3: susceptibilidad de movimiento de masa (pugs, 2023) del cantón yacuambi, parroquia 28 de mayo.	- 129 -
Anexo 4: mapa de pendientes del área urbana del cantón yacuambi, parroquia 28 de mayo. -	130 -
Anexo 5: sistema de alcantarillado pluvial actual	- 131 -
Anexo 6: información sobre los parámetros de creación de subcuencas obtenida mediante el uso del software arcgis.	- 133 -
Anexo 7: aporte caudal de esorrentía en nodos del sistema actual.....	- 135 -

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización de la problemática

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), actualmente más del 54% de la población mundial reside en ciudades, y se estima que esta cifra alcanzará el 66% para el año 2050 (United Nations, 2015). En América Latina, la urbanización es aún más acelerada, con más del 80% de la población viviendo en áreas urbanas, lo que la convierte en una de las regiones más urbanizadas del planeta (United Nations, 2018). Este proceso ha intensificado los efectos del cambio climático en las ciudades, generando problemas como inundaciones, olas de calor, sequías y tormentas (Borja L. , 2021).

El crecimiento continuo de las zonas urbanas ha reducido significativamente las superficies permeables, alterando el ciclo natural del agua. Como consecuencia, se han incrementado los eventos de inundación y la contaminación de cuerpos hídricos (Chen et al., 2017). Frente a esta realidad, la ingeniería ha comenzado a adoptar un enfoque más sostenible, que busca gestionar el agua desde su origen mediante estrategias integrales. En este contexto surgen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales imitan procesos naturales de retención, infiltración y tratamiento del agua de lluvia, priorizando su aprovechamiento en lugar de su rápida evacuación (Cerrado, 2020)

En Ecuador, la adopción de estos sistemas ha empezado a incorporarse dentro de la planificación urbana, especialmente en contextos donde la resiliencia climática y la conservación de servicios ecosistémicos son fundamentales (Salmon et al., 2023). Sin embargo, esta modernización no ha llegado de manera uniforme a todos los territorios del país. En la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi, en la provincia de Zamora Chinchipe, es un claro ejemplo de esta brecha. Su actual proceso de expansión urbana se desarrolla sobre una topografía compleja sin que la infraestructura de drenaje pluvial existente haya sido adaptada para gestionar los riesgos hidrológicos asociados a futuro (PUGS, 2023). La problemática no radica en la inexistencia de drenaje, sino en la falta de infraestructura

complementaria que permita gestionar la escorrentía de forma sostenible. Por ello, este estudio propone la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) como refuerzo del sistema actual, orientada a disminuir caudales, reducir reboses y aumentar la resiliencia urbana.

Además, se realizó un diagnóstico de la vulnerabilidad hídrica actual, empleando herramientas de modelación para cuantificar el comportamiento del sistema de drenaje existente e identificar las zonas críticas donde se presentan mayores aportes de escorrentía y reboses. A partir de esta evaluación, surge la necesidad de incorporar unidades de drenaje sostenible (SUDS) que permitan complementar la infraestructura pluvial, regulando los caudales generados durante los eventos de lluvia y reduciendo la presión sobre la red. El uso de herramientas computacionales especializadas para el análisis hidrológico proporciona una base técnica sólida para definir el dimensionamiento hidráulico y la ubicación estratégica de estas soluciones, lo que permitiría mejorar el desempeño del sistema sin requerir su reemplazo, especialmente en un contexto urbano con crecimiento acelerado y limitada disponibilidad de expansión de infraestructura.

En la zona urbana del cantón Yacuambi, la expansión reciente se ha desarrollado sobre terrenos con pendientes variables, lo que genera condiciones que favorecen la acumulación de escorrentía pluvial durante episodios de lluvia intensa. A partir del análisis del territorio y de la observación directa, se identifica que el crecimiento poblacional de los últimos años, sumado a las deficiencias presentes en la red de drenaje urbano, está produciendo episodios recurrentes de saturación del sistema. En sectores como la parroquia 28 de Mayo, donde se concentra una mayor proporción de población urbana, estas condiciones se manifiestan con mayor intensidad. Esta situación evidencia la necesidad de incorporar soluciones sostenibles que mitiguen los efectos de la escorrentía y mejoren el comportamiento de la infraestructura de drenaje urbano.

Según proyecciones demográficas, se prevé que entre 2030 y 2035 la cabecera urbana superará en población a las parroquias rurales del cantón (PUGS, 2023). Este crecimiento ha incrementado la impermeabilización del suelo, elevando los caudales de escorrentía y provocando anegamientos en zonas planas (Chen et al., 2017). En zonas inclinadas, el agua se infiltra de manera desordenada, saturando los taludes y aumentando el riesgo de deslizamientos, tal como se evidencia en las zonas de susceptibilidad a movimientos en masa identificadas en el PUGS del cantón. La ausencia de infraestructura de drenaje sostenible agrava esta vulnerabilidad, comprometiendo la seguridad, la estabilidad territorial y la infraestructura urbana existente (PUGS, 2023).

De esta manera, la investigación plantea como objetivo central proponer la implementación de un sistema de drenaje pluvial sostenible, mediante la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como complemento al sistema existente en la zona urbana del cantón Yacuambi. Para ello, la metodología se estructurará en tres fases lógicas. Primero, se establecerá un marco de referencia técnico mediante el análisis de literatura científica y casos de estudio donde los SUDS se han aplicado en contextos urbanos similares, con el fin de seleccionar las tipologías más adecuadas para las condiciones locales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de drenaje para la zona urbana del cantón Yacuambi, con un enfoque de sostenibilidad, mediante la modelación hidrológica y el diseño de un conjunto integrado de sistemas urbanos de drenaje sostenible, para la mitigación de los riesgos e impactos ambientales,

1.2.2 Objetivo Especifico

Identificar, mediante la revisión de literatura científica y casos de estudio, las principales técnicas de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), analizando sus criterios de diseño para establecer un marco de referencia aplicable a las condiciones del cantón Yacuambi.

Diagnosticar la vulnerabilidad hídrica de la zona urbana de Yacuambi, a través del análisis integrado de la cartografía temática existente, para identificar las limitaciones del sistema de drenaje actual y delimitar las zonas críticas por escorrentía superficial.

Diseñar las unidades de ingeniería que componen el sistema de drenaje, definiendo su ubicación estratégica, dimensionamiento hidráulico y detalles constructivos, con el propósito de una alternativa sostenible que mejore la capacidad de regulación del sistema de drenaje actual.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Fundamentos de Hidrología e Hidráulica Aplicados al Drenaje Urbano

2.1.1 Conceptos básicos

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Se refieren a un conjunto de estrategias de ingeniería que buscan manejar el agua de lluvia en entornos urbanos imitando los procesos hidrológicos naturales. Su objetivo es ofrecer una alternativa más eficiente y ecológica frente a los sistemas de drenaje convencionales. (De la Fuente García et al., 2021)

Drenaje urbano: El drenaje urbano incluye las obras y estrategias destinadas a manejar las aguas pluviales y residuales en la ciudad, con el fin de prevenir inundaciones y reducir impactos ambientales. (Antonio et al., 2023)

Aguas pluviales: Se denomina así al agua proveniente de la precipitación que no logra infiltrarse en el suelo debido a superficies impermeables como techos, calles, estacionamientos o edificaciones. Generalmente, es recolectada por sistemas pluviales y conducida hacia puntos de disposición final. (Pacheco & Coraisaca, 2022)

Áreas de aporte: Se denominan áreas de aporte a las superficies que generan y concentran el escurrimiento superficial, canalizando el agua de lluvia hacia un punto común dentro del sistema de drenaje urbano. (Chow & Maidment, 1998)

Precipitación: La precipitación comprende toda forma de agua que cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, ya sea en estado líquido (como lluvia o llovizna) o sólido. (Chow & Maidment, 1998)

Hidrología: Ciencia que estudia el agua en la Tierra, considerando su distribución, circulación, ocurrencia y propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como fenómenos asociados como precipitación, escorrentía, humedad del suelo, glaciares y evapotranspiración. (Nardi, 2013)

Intensidad de lluvia: Corresponde a la cantidad de precipitación que ocurre en un determinado intervalo de tiempo, generalmente expresada en milímetros por hora, minuto o segundo. (Chow & Maidment, 1998)

Tiempo de concentración: Es el periodo necesario para que una gota de lluvia que cae en el punto más distante de una cuenca llegue, por escorrentía superficial, hasta su punto de salida.(Chow & Maidment, 1998)

Periodo de retorno: Tiempo estadístico, expresado en años, durante el cual se espera que un evento hidrológico (como lluvias intensas, huracanes o temperaturas extremas) sea igualado o superado al menos una vez.(Pacheco & Coraisaca, 2022)

Sistema de drenaje pluvial: Es un conjunto de infraestructuras hidráulicas que incluye tuberías, colectores, sumideros y otros elementos complementarios, cuya función principal es captar, conducir y evacuar el agua de lluvia generada durante eventos pluviales. (J. Calle, 2019)

2.2 Criterios técnicos para la evaluación del alcantarillado pluvial existente

Es necesario considerar los criterios técnicos que regulan su funcionamiento, tales como diámetros mínimos, pendientes recomendadas, distancias de seguridad entre redes y condiciones de operación a gravedad. Estos parámetros sirven como referencia para identificar deficiencias estructurales y funcionales que justifican la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Aunque la normativa ecuatoriana no establece detalladamente los diámetros mínimos, diversos estudios técnicos en el país adoptan un valor mínimo de 250 mm para garantizar una capacidad hidráulica adecuada y evitar obstrucciones. Asimismo, se recomienda una pendiente mínima del 1 %, similar a la exigida para sistemas sanitarios. Estas directrices permiten mantener la eficiencia del sistema bajo condiciones de lluvia intensa. (Lopez & Gualan, 2021)

Las tuberías deben instalarse a una profundidad que permita recoger eficazmente el escurrimiento superficial desde las viviendas ubicadas en cotas inferiores. En los tramos que cruzan zonas con tráfico vehicular, se exige una cobertura mínima de 1.2 m para asegurar la protección estructural del conducto (SENAGUA, 2010).

Cuando las tuberías laterales desembocan en un pozo cuya dirección de flujo principal es diferente, se debe construir el canal de fondo de modo que la conexión se realice con un ángulo de 45 grados respecto al eje del flujo principal, facilitando así las labores de mantenimiento. Asimismo, se recomienda evitar descargas libres desde alcantarillas poco profundas hacia pozos más profundos; si esto fuera inevitable, la altura máxima de caída libre del agua no debe superar los 0.6 metros (SENAGUA, 2010)

El diseño hidráulico de las redes destinadas a la recolección de aguas pluviales se basa en el principio del flujo a superficie libre, donde el agua circula sin ejercer presión dentro de las tuberías. Para mantener condiciones de autolimpieza y evitar la sedimentación, se recomienda que las pendientes garanticen velocidades mínimas superiores a 0.6 m/s bajo caudal máximo instantáneo (SENAGUA, 2010) Asimismo, la capacidad operativa de las conducciones debe mantenerse entre el 75 % de llenado en sistemas sanitarios y hasta el 90 % en sistemas pluviales, con el propósito de conservar la eficiencia hidráulica y prolongar la vida útil de la infraestructura.

2.2.1 Aspectos Hidráulicos

- ✓ **Capacidad hidráulica:** La capacidad hidráulica representa el volumen de agua que puede circular por un conducto o canal bajo determinadas condiciones de pendiente, rugosidad y forma de la sección. Este parámetro resulta fundamental en el diseño de los sistemas de drenaje urbano, ya que garantiza que la red tenga la capacidad suficiente para conducir la escorrentía producida durante un evento de lluvia de diseño (Chafra, 2018).
- ✓ **Ecuación de Manning:** Constituye una de las herramientas más utilizadas en la hidráulica para estimar el caudal en conducciones a superficie libre. Relaciona el

caudal (Q) con la rugosidad del material (n), el radio hidráulico (R) y la pendiente de energía (S), siendo expresada como:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Este método es aplicado ampliamente en el diseño de alcantarillados pluviales y sistemas de drenaje urbano por su simplicidad y precisión (Pacheco & Coraisaca, 2022)

- ✓ **Redes de recolección:** Están diseñadas para funcionar por gravedad, lo que significa que las tuberías deben seguir una pendiente constante que permita el desplazamiento natural del flujo. Esta pendiente debe ser suficiente para evitar la acumulación de sedimentos dentro de los colectores, cumpliendo así con la condición de autolimpieza. Estas redes se modelan como canales con flujo a superficie libre y se calculan por tramos. Además, se establece que las tuberías trabajen parcialmente llenas: al 90 % en sistemas pluviales (Lopez & Gualan, 2021)
- ✓ **Velocidad mínima, máxima y autolimpieza:** Para asegurar una circulación eficiente del agua residual y evitar la generación de gases como el sulfhídrico, es necesario mantener una velocidad mínima del flujo dentro de las tuberías. Esta velocidad no debe ser inferior a 0.45 m/s bajo condiciones de caudal máximo, aunque lo recomendable es que supere los 0.6 m/s. Este criterio también permite cumplir con la condición de autolimpieza, evitando que los sólidos se depositen en las redes (SENAGUA, 2010)

La durabilidad de los materiales empleados en los sistemas de alcantarillado está estrechamente vinculada con la velocidad de flujo para la cual fueron diseñados. Si la velocidad excede los valores recomendados, puede producirse desgaste o erosión en las conducciones, afectando su vida útil. Por tal motivo, es necesario respetar los límites de velocidad máxima sugeridos para cada material, conforme a las recomendaciones técnicas de las normas ecuatorianas tabla 1. (SENAGUA, 2010).

Tabla 1. Límites de velocidad máxima y coeficientes de rugosidad en distintos materiales de tuberías según SENAGUA (2010)

Material	Velocidad máxima (m/s)	Coefficiente de rugosidad
Hormigón simple con uniones de mortero	4	0.013
Hormigón simple con uniones de neopreno para nivel freático alto	3.5 – 4	0.013
Asbesto cemento	4.5 – 5	0.011
Plástico	4.5	0.011

Fuente: (SENAGUA, 2010)

- ✓ **Velocidad del flujo:** La velocidad del flujo constituye un parámetro esencial para garantizar el adecuado desempeño de los sistemas de drenaje. Cuando esta velocidad es demasiado baja, puede favorecer la acumulación de sedimentos en el interior de las tuberías; por el contrario, si es excesiva, puede generar procesos erosivos en cunetas o conducciones (Calle, 2019).
- ✓ **Tubo parcialmente lleno:** La aplicación de relaciones hidráulicas es especialmente útil en el diseño de sistemas de alcantarillado, dado que estos suelen operar con conductos que trabajan bajo condiciones de flujo parcial. Por tal motivo, en los apartados siguientes se presentan las ecuaciones necesarias para su análisis (Gallardo Armijos, 2018).

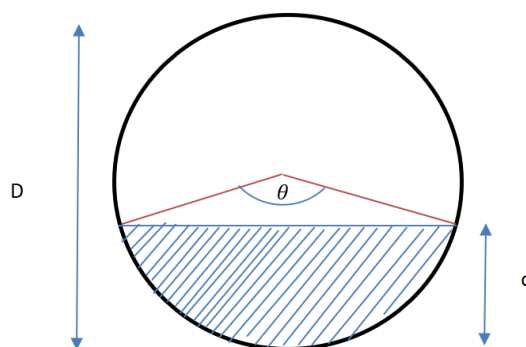


Figura 1. Tubo parcialmente lleno

Fuente: Elaboración propia

Para iniciar, es importante considerar que existen distintas ecuaciones según la condición del flujo dentro del conducto. Estas varían dependiendo de si el calado se encuentra por debajo o por encima del eje medio de la tubería.

2.4 Lineamientos técnicos aplicables al análisis de redes de drenaje pluvial

La evaluación del sistema de drenaje pluvial existente requiere considerar los parámetros técnicos que condicionan su funcionamiento, con el propósito de verificar su capacidad para captar, conducir y evacuar adecuadamente el agua lluvia generada en la zona urbana de estudio. Estos lineamientos permiten identificar posibles deficiencias hidráulicas y estructurales que influyen en la formación de escorrentía superficial, acumulaciones temporales o riesgos de inundación.

Para este análisis, se emplean como base las directrices establecidas en la NEC-SE-HM para la estimación hidrológica de caudales, complementadas con los lineamientos técnicos del MAATE, SENAGUA y referencias internacionales sobre el funcionamiento de redes pluviales. Si bien el Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC) se orienta principalmente a agua potable, incluye criterios que van encaminados con la correcta disposición de aguas superficiales y la interacción con sistemas existentes, aspectos relevantes para una planificación urbana integral y para el diagnóstico del drenaje pluvial actual.

2.4.1 Aspectos hidrológicos

Según (Edwards et al., 2015) la hidrología se encarga del estudio del comportamiento del agua tanto en la superficie como en el subsuelo terrestre, analizando su distribución, propiedades y la forma en que se relaciona con el entorno. Mediante el análisis de las cuencas hidrográficas, esta ciencia permite entender cómo el agua interactúa con el suelo y el uso del territorio, constituyéndose en un elemento esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Ciclo Hidrológico: El ciclo del agua explica el proceso permanente mediante el cual el agua se desplaza entre la tierra, los océanos, la atmósfera y la tierra. Para este proyecto, nos enfocaremos en la precipitación y la escorrentía superficial, ya que estos fenómenos pueden causar serios problemas a las comunidades si no están preparadas. (J. Calle, 2019)



Figura 2: Ciclo hidrológico

Fuente: Adaptado por (Los Huertos, 2020)

Precipitación: Este proceso constituye una de las principales variables del ciclo hidrológico, pues regula la disponibilidad de agua en los ecosistemas. Además, es un elemento clave en la recarga de acuíferos y en la generación de escorrentías superficiales, influyendo directamente en la gestión hídrica (De la cruz & Fernández, 2024).

Cuenca: Es una unidad hidrológica delimitada por divisorias topográficas que determinan la dirección del flujo superficial hacia un único punto de drenaje, permitiendo analizar el comportamiento del agua dentro de un mismo sistema. (Londoño, 2001)

Infiltración: Es el proceso por el cual el agua de lluvia penetra la superficie del terreno e ingresa al subsuelo dentro del ciclo hidrológico. Su comportamiento depende de factores como la cobertura vegetal, la textura y estructura del suelo, la porosidad y la conductividad hidráulica. La proximidad del nivel freático y las características estratigráficas también influyen en la capacidad de infiltración. Estos elementos determinan cuánto del agua precipitada puede almacenarse o desplazarse hacia capas más profundas. (Campos, 1992)

Hietograma de diseño: Los hietogramas se elaboran a partir de series estadísticas y reflejan la evolución de las tormentas en función del tiempo, generalmente en forma de barras. Cabe destacar que constituyen distribuciones promedio, ya que no reproducen las variaciones abruptas que pueden presentarse en las precipitaciones reales (Chow et al., 1994).

- 1) En una primera etapa, se calcula la precipitación correspondiente a cada intervalo de tiempo mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$\Delta = I - t \quad (2)$$

- 2) Cálculo de la variación entre precipitaciones consecutivas, Una vez determinadas las precipitaciones para cada intervalo, se procede a calcular la variación entre las alturas de lluvia sucesivas, con el objetivo de identificar los periodos más intensos del evento. Esta variación, denotada como ΔP , se obtiene mediante la ecuación:

$$\Delta P = P1 - P2 \quad (3)$$

- 3) Construcción del gráfico del hietograma de diseño, Con los datos de precipitación organizados y analizados, se elabora el hietograma de diseño en formato gráfico. Este gráfico muestra la evolución de la precipitación en función del tiempo, reflejando la distribución temporal del aguacero analizado. Para ello, se emplean los intervalos de tiempo definidos previamente, ubicando las precipitaciones más intensas en el centro del evento, conforme al método de bloques alternos, figura 3.

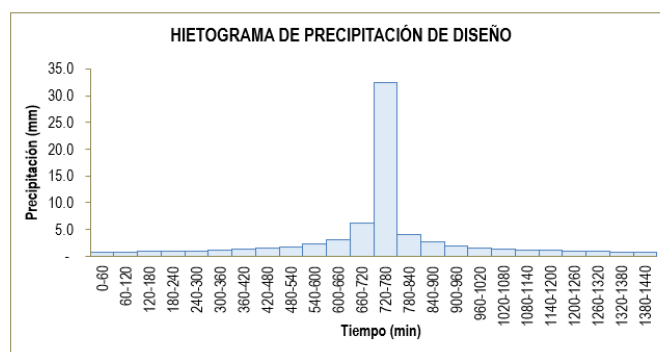


Figura 3: Hietograma de diseño.

Fuente: (Guevara & Jabo, 2025a)

Existen diversas metodologías para la elaboración de estos hietogramas. Para los fines de la presente investigación, se ha seleccionado el método del bloque alterno, una técnica ampliamente reconocida en la literatura. La justificación de esta elección y el procedimiento detallado de su aplicación se expondrán en el capítulo de Metodología.

2.4.2 Datos necesarios para la evaluación del alcantarillado pluvial existente

En esta sección se describen las características y propiedades esenciales que deben tenerse en cuenta para calcular el caudal de aguas pluviales correspondiente al área de estudio.

- **Levantamiento de información.**

La primera etapa para el diseño del sistema de alcantarillado pluvial consistió, es necesario realizar previamente un análisis hidrológico. Para ello, se requiere la recopilación de la siguiente información:

- ✓ Plano catastral del área del centro de la parroquia 28 de Mayo.
- ✓ Plano del alcantarillado pluvial actual.
- ✓ Datos meteorológicos específicos del área de estudio.

2.5 Actividades de campo para el análisis del sistema pluvial

Inspección del área de estudio: Las visitas de campo tienen como propósito reconocer directamente las condiciones físicas del entorno urbano analizado. Durante estas inspecciones se evalúan aspectos relevantes como el estado de las vías, características del suelo, configuración topográfica, presencia de drenajes superficiales, así como la localización de elementos estructurales que influyen en el comportamiento del escurrimiento pluvial.

Análisis preliminar de las condiciones topográficas del drenaje pluvial: Para analizar el funcionamiento del sistema de drenaje pluvial actual, se consideran factores que

condicionan la generación y conducción de escorrentía. Uno de los más relevantes es la pendiente del terreno, debido a que las redes pluviales operan por gravedad. En el área de estudio se identifican pendientes pronunciadas, superiores al 60 % en algunos sectores y cercanas al 25 % en gran parte del territorio, según el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS, 2023). Estas características favorecen el rápido escurrimiento del agua lluvia hacia los puntos bajos, influyendo directamente en el comportamiento hidráulico del sistema (Ver Anexo 2).

Identificación de puntos de descarga del sistema pluvial: El agua captada por los sumideros y colectores del sistema existente es finalmente conducida hacia puntos naturales de descarga. En el caso de la parroquia 28 de Mayo, los caudales pluviales son vertidos en dos quebradas principales: quebrada Nueva Vida y quebrada 18 de Noviembre, ambas tributarias del río Yacuambi, que constituye el receptor final del sistema pluvial urbano.

El método racional para el análisis hidrológico de caudales: Es una de las metodologías más consolidadas y ampliamente utilizadas en la ingeniería para la estimación del caudal máximo de escorrentía. Su simplicidad y eficacia lo han convertido en un estándar para el diseño de sistemas de drenaje en contextos urbanos, rurales y agrícolas. (Pacheco & Coraisaca, 2022)

El principio fundamental de este método se basa en una relación de proporcionalidad directa entre la intensidad de la lluvia y el caudal pico generado. La hipótesis central postula que el caudal máximo en el punto de salida de una cuenca se alcanza precisamente cuando la duración de la tormenta es igual o mayor al tiempo de concentración de dicha cuenca. En ese instante, se asume que toda la superficie de la cuenca está contribuyendo simultáneamente al flujo en el punto de análisis (Chiarito et al., 2018)

$$Q = 2.778 * C * I * A \quad (4)$$

Donde:

Q = caudal de diseño o caudal pico $\left(\frac{l}{s}\right)$

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

I = Intensidad de la lluvia de diseño $\left(\frac{mm}{h}\right)$

A = Area de drenaje o aportacion (Ha)

C = 2.778 = Coeficiente de converison

$$\frac{mm}{hora} * \frac{1m}{1000mm} * \frac{1000L}{1m^3} * \frac{1hora}{3600s} * \frac{10000m^2}{1Ha} = 2,78 * \frac{mm}{hora}$$

Área de aporte: Las áreas que generan escorrentía pluvial deben ser delimitadas y representadas mediante formas geométricas, considerando tanto la topografía del lugar como las características urbanísticas, de manera similar al procedimiento utilizado en sistemas de alcantarillado sanitario.(G. Calle & Chuico, 2019)

En el área de estudio, la mayor concentración de habitantes se encuentra consolidada en los alrededores de las vías principales y sectores urbanizados, mientras que las zonas periféricas presentan una ocupación dispersa y menor densidad poblacional, por lo que no se consideran como parte de una cuenca urbana consolidada. No obstante, para efectos del análisis hidrológico, se definió el área de contribución como una cuenca de características mixtas (rural-urbana), considerando la trayectoria del flujo superficial durante los eventos de precipitación. Esta delimitación se realizó mediante el procesamiento de la información topográfica, imágenes satelitales, así como la información catastral disponible, determinándose una superficie aproximada de 18.84 hectáreas, sobre la cual se evaluará el comportamiento hidráulico y se diseñarán las posibles estrategias de drenaje sostenible.

Intensidad de Precipitación: Se entiende como una propiedad cuya manifestación se percibe de manera casi inmediata durante la ocurrencia de una tormenta

(Maderey, 1980). Este parámetro resulta esencial para calcular los picos de escorrentía en una cuenca y su valor se obtiene mediante el análisis de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

$$i = \frac{p}{t} \quad (5)$$

Donde:

$$i = \text{intensidad} \left(\frac{mm}{h} \right)$$

$$p = \text{precipitacion} (mm)$$

$$t = \text{duracion} (h)$$

Periodo de retorno (T): La principal característica de este evento es su período de retorno, entendido como el intervalo de recurrencia promedio, en años, entre dos sucesos de igual o mayor magnitud. Así, al utilizar un período de retorno de 25 años, se asume que pueden presentarse eventos más intensos con menor frecuencia, los cuales podrían generar afectaciones no contempladas en el diseño. Según (Volpi et al., 2015), el período de retorno es una herramienta estadística ampliamente utilizada en hidrología para representar la rareza o frecuencia de eventos extremos como lluvias intensas o caudales máximos, aunque su uso requiere comprender sus limitaciones e interpretar adecuadamente sus implicaciones en el diseño de infraestructura hidráulica. (Volpi et al., 2015)

$$P = \frac{1}{Tr} \quad (6)$$

El riesgo hidrológico se define como la probabilidad de que ocurra un evento dentro de un periodo determinado, considerando un periodo de retorno (T) específico, durante la vida útil prevista de una infraestructura (n). Esta probabilidad puede calcularse mediante una fórmula establecida para este propósito. (Guevara & Jabo, 2025b)

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (7)$$

Donde:

R: Riesgo de falla admisible

T: Periodo de retorno

n: Periodo de vida útil

Tabla 2. Probabilidad de falla admisible en diferentes obras hidráulicas

COMPONENTES Y EQUIPOS	Años
Obras de captación	25 a 50
Conducciones PVC	20 a 30
Plantas de tratamiento	20 a 30
Tuberías principales y secundarias de la red de distribución: PVC	20 a 30

Fuente: Información tomada y adaptada de Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (p. 25), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2012.

El periodo de diseño: Hace referencia al lapso durante el cual una infraestructura puede operar eficientemente sin requerir modificaciones ni ampliaciones. Este periodo se define considerando aspectos como la viabilidad económica del proyecto, la tasa de actualización aplicable, y la durabilidad estimada de los materiales empleados en su construcción tabla 3.

Tabla 3. Periodo de retorno según la normativa SENAGUA

COMPONENTES Y EQUIPOS	Años
Obras de captación	25 a 50
Conducciones PVC	20 a 30
Plantas de tratamiento	20 a 30
Tuberías principales y secundarias de la red de distribución: PVC	20 a 30

Fuente. (SENAGUA, 2010)

Según las recomendaciones establecidas por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), los periodos de diseño estén comprendidos entre 20 y 25 años para aquellas infraestructuras que, por su naturaleza, pueden ser ampliadas con relativa facilidad. En este grupo se incluyen obras como tuberías, colectores y estaciones de bombeo. En cambio, cuando se proyectan estructuras con una vida útil de hasta 50 años, su ampliación se vuelve mucho más compleja. Por esta razón, este tipo de periodo se reserva principalmente para obras de gran escala y difícil modificación, como embalses, diques o sistemas de captación de aguas superficiales (SENAGUA, 2010)

Tiempo de concentración (Tc): Permite establecer el tiempo de la lluvia máxima que incide de manera directa en su dimensionamiento. Este periodo determina el intervalo en el cual la intensidad de la precipitación es considerada máxima. Una tormenta con una duración inferior a dicho tiempo no alcanza a generar el volumen necesario para comprometer el sistema, mientras que una de mayor duración produce caudales más estables, generalmente menores a los picos iniciales. (Rosales & Quiroga, 2025)

El tiempo de concentración se entiende como el intervalo que tarda el agua de lluvia en recorrer la cuenca y producir el caudal máximo en la salida. En el diseño hidrológico se asocia con la duración crítica de la lluvia obtenida de las curvas IDF, donde eventos más breves generan mayores intensidades (M. J. Guevara, 2025). En este estudio, al tratarse de una cuenca pequeña, el tiempo de concentración se estimó con la ecuación empírica de Kirpich, que se encuentra en el manual de hidrología, hidráulica y drenaje pagina 39. (Ministerio de transporte y comunicaciones (MTC), 2012)

$$tc = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (8)$$

L = Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m

H = Diferencia de nivel entre la divisora de aguas arriba y salida, m

Coefficiente de escorrentía: Esta influenciada por múltiples factores, entre ellos el tipo de evento meteorológico (como lluvias, nevadas o granizadas), las condiciones

superficiales del terreno, el periodo de retorno considerado y los posibles cambios futuros en el uso del suelo. Este coeficiente es adimensional y expresa la proporción de la precipitación total que se transforma en escorrentía tabla 4, lo que permite relacionar el volumen de agua que escurre sobre la superficie del terreno con el volumen total de lluvia registrada (MVCS, 2006).

Tabla 4: Coeficiente de escorrentía según el tipo de superficie.

Tipo de superficie	Coeficiente
Zonas comerciales	0.9
Desarrollos residenciales con casa continuas y predominio de zonas duras	0.75
Desarrollos residenciales multifamiliares con bloques contiguas y predominio de jardines.	0.75
Desarrollo residencial unifamiliar con casas contiguas y predominio de jardines	0.55
Desarrollo residencial con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0.45
Áreas residenciales con predominio de zonas verdes y cementerios tipo jardines.	0.3
Laderas desprovistas de vegetación	0.6
Laderas protegidas con vegetación	0.3

Fuente: Adaptado por (Pacheco & Coraisaca, 2022)

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF): En el libro *Hidrología aplicada*, Chow y Maidment (1998, p. 454) explican que, cuando se dispone de datos locales de precipitación, las curvas IDF pueden obtenerse mediante el análisis de frecuencia de las lluvias máximas anuales para distintas duraciones. Para este propósito se utiliza con

frecuencia la distribución de Valor Extremo Tipo I o distribución de Gumbel, que permite asociar cada lámina de lluvia a un periodo de retorno. En cada duración se seleccionan las precipitaciones máximas registradas y se ajusta la distribución elegida para obtener las lluvias de diseño. (Chow, Maidment, et al., 1998)

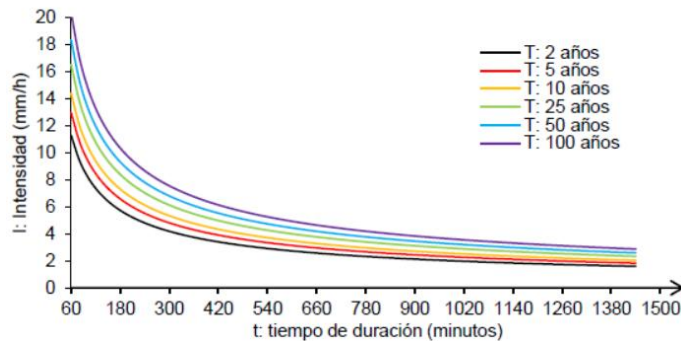


Figura 4: Curvas de intensidad IDF

Fuente: Adaptado por (Suárez-Aguilar et al., 2020)

El desarrollo de estas curvas implica la consideración de diversos componentes hidrológicos y suele llevarse a cabo en cuatro fases principales: recopilación inicial de datos, procesamiento de la información, modelación probabilística y, finalmente, la representación gráfica de las curvas IDF, como se observa en la tabla 4.

Tabla 5: Secuencia para determinar las curvas IDF

SECUENCIA PARA DETERMINAR LAS CRUVAS IDF	
INICIO	<ul style="list-style-type: none"> Recopilación de información histórica pluviométrica y pluviográfica. Organización de información.
PROCESAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de tormentas. Relleno de datos faltantes. Definición de la base de datos: pruebas de hipótesis.
MODELACION	<ul style="list-style-type: none"> Ajuste de los modelos.
PROBABILISTICA	<ul style="list-style-type: none"> Pruebas de bondad de ajuste Estimación de intensidades
CURVAS IDF	<ul style="list-style-type: none"> Gráfico de curvas IDF

- Determinación matemática de las curvas IDF.

Fuente: Información tomada y adaptada de. +Determination of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Equation due to Presence of ENSO and Niño Costero. Study Case: Piura City (p. 2), Farías y Ruiz, 2018, 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.

Para la determinación de las curvas IDF en el desarrollo de este estudio, se utilizó como fuente principal el documento técnico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) titulado “Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación”, el cual proporciona ecuaciones empíricas específicas para diversas zonas del país.

Dado que el área de estudio corresponde a la parroquia 28 de Mayo, en el cantón Yacuambi, provincia de Zamora Chinchipe, se identificaron diversas estaciones pluviométricas dentro de la demarcación hidrográfica Santiago, que abarca todo el sector de análisis. Sin embargo, muchas de estas estaciones como M0680 (Yacuambi - 28 de mayo), M0681 (Yacuambi en Tutupali), M0682 (Yacuambi en La Paz), M0503 (San Francisco – San Ramón, cantón Zamora), M0506 (Paquisha), El Pangui) y M0502 (El Pangui Paquisha) presentaban limitaciones en cuanto a la disponibilidad de datos históricos completos y continuos para realizar análisis estadísticos confiables.

En virtud de lo anterior, y considerando la necesidad de contar con una serie continua y representativa, se seleccionó la estación M0502 – El Pangui como fuente principal para definir las curvas IDF del estudio. Esta estación, además de ubicarse dentro de la misma región hidrográfica, dispone de una base de datos pluviométricos más consistente, lo cual permite obtener estimaciones adecuadas de intensidades máximas para la zona urbana de Yacuambi.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) proporciona ecuaciones específicas que permiten estimar las intensidades máximas de lluvia para distintos periodos de retorno y duraciones. Estas fórmulas son fundamentales para construir las curvas de

Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), herramientas esenciales en el análisis hidrológico de eventos extremos.

Para el presente estudio, se ha tomado como referencia la estación M0502 – El Pangui, coordenadas (X:758210,00170 Y:9564912,80074), cuyas ecuaciones se presentan más adelante en las ecuaciones 9 y 10, y que permiten obtener las intensidades necesarias para simular escenarios de diseño con base en lluvias críticas en la zona urbana de Yacuambi.

$$5 \text{ Min} < 47.27 \quad I_{TR} = 62.854 * Id_{TR} * t^{-0.344} \quad R^2 = 0.9944 \quad (9)$$

$$47.27 \text{ Min} < 1440 \quad I_{TR} = 386.42 * Id_{TR} * t^{-0.815} \quad R^2 = 0.9987 \quad (10)$$

Donde:

I_{TR} = Intensidad para cualquier periodo de retorno y duracion

Id_{TR} = Intensidad diariaa para un periodo de retorno dado en $\left(\frac{mm}{h}\right)$

El registro de intensidad de precipitación en escala diaria correspondiente a un periodo de retorno específico se obtiene a partir de las tablas proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), dentro del apartado titulado “Intensidades Máximas en 24 horas determinadas con Información Pluviométrica”, ubicado en la página 277 del documento. En dicha tabla se presentan las intensidades correspondientes a períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años , estos datos sirven como base para el desarrollo del análisis hidrológico de eventos extremos. En la página 98 del citado documento se detallan los coeficientes obtenidos para cada año de registro, los cuales fueron recopilados y sistematizados en la Tabla 5 para su análisis comparativo.(INAMHI, 2015)

Tabla 6: Intensidades diarias (IdTR) de diferentes periodos de la estación M0502.

Tr(Años)	IdTR (mm/h)
2	2.33
5	2.95
10	3.37
25	3.89
50	4.18
100	4.67

Fuente: (INAMHI, 2015)

Se optó por utilizar las ecuaciones propuestas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para la determinación de las intensidades máximas de precipitación, debido a que los valores obtenidos a partir de dichas expresiones resultan ser mayores en comparación con aquellos generados mediante distribuciones probabilísticas aplicadas sobre registros pluviográficos disponibles entre los años 1981 y 2011. La selección de este criterio se justifica por la necesidad de aplicar un enfoque de diseño conservador, que garantice márgenes de seguridad adecuados frente a eventos extremos, minimizando así el riesgo de su dimensionamiento en las infraestructuras de drenaje proyectadas.

Tormenta de diseño. Corresponde a un episodio de precipitación definido a partir de análisis estadísticos de registros pluviógrafos históricos, cuya probabilidad de ocurrencia se establece para distintas duraciones y frecuencias. Este tipo de tormenta puede representarse mediante un hietograma de diseño, en el cual se sintetizan tanto la altura máxima de lluvia como su distribución temporal durante el evento. A partir de este esquema hipotético, y en combinación con modelos de escorrentía, es posible calcular los caudales de diseño que se utilizarán en la planificación hidráulica. (Pizarro-Tapia et al., 2014)

Población a beneficiarse: Si bien existe un estudio que presenta proyecciones poblacionales para la parroquia 28 de Mayo hasta el año 2035, dicho horizonte resulta insuficiente para el presente análisis, pues la evaluación hidrológica y la propuesta de

Drenaje Sostenible, adopta un periodo de diseño de 25 años. Dado que el crecimiento poblacional está directamente relacionado con la expansión urbana y, por tanto, con el incremento de las superficies impermeables, resulta necesario extender la proyección existente mediante un modelo matemático que permita estimar la tendencia futura de ocupación del suelo.

Para ello, se empleó el modelo de crecimiento geométrico, que considera la población actual, el incremento anual recomendado para la región amazónica y el periodo de proyección. Esta estimación no tiene como finalidad dimensionar infraestructura sanitaria, sino comprender la evolución del uso del suelo y anticipar el aumento esperado en la impermeabilización de la zona urbana, insumo fundamental para evaluar los cambios en la escorrentía superficial y justificar técnicamente la necesidad de implementar soluciones basadas en SUDS.

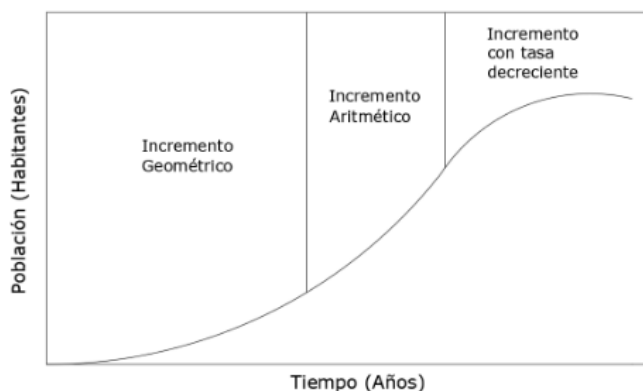


Figura 5: Metodología del modelo matemático

Fuente: (Carrera Orbe; 2011)

El crecimiento poblacional, más allá de ser una simple variación numérica, refleja la manera en que una comunidad se expande y transforma su territorio. Según (Tang et al., 2019), esta evolución demográfica atraviesa fases de rápido aumento, estabilización y eventual desaceleración, procesos que inciden de manera directa en la forma en que el suelo urbano se ocupa y se modifica. Comprender este comportamiento es esencial para estudios de drenaje pluvial, pues el incremento progresivo de habitantes suele traducirse

en nuevas viviendas, más vías y mayores superficies impermeables, limitando la infiltración del agua en el terreno y elevando los volúmenes de escorrentía superficial. En este contexto, la proyección poblacional no se emplea para dimensionar infraestructura sanitaria, sino como una herramienta para anticipar cómo la urbanización futura alterará el balance hídrico del área de estudio, justificando así la necesidad de incorporar soluciones de drenaje urbano sostenible que mantengan su eficacia frente a las variaciones generadas por el desarrollo urbano.

Tabla 7: Coeficientes de incremento poblacional,

Parámetros de incremento geométrico de la población	
Región Geográfica	r (%)
Sierra	1
Costa sierra, Oriente y Galápagos	1.5

Fuente: Adaptado de Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2000: Agua Potable y Alcantarillado Sanitario. Criterios de Diseño (INEN, 1997).

Método matemático: Se usará el método de crecimiento geométrico, la fórmula es:

$$Pf = Pi * e^{r*\Delta t} \quad (11)$$

Donde:

Pf: Poblacionn proyectada

Pi: Población inicial o de referencia

r: Tasa de crecimiento geométrico (% anual)

Δt: *Variacion de tiempo o periodo de diseño*

En el Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2022, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), se registró una población de 1348 habitantes, lo que constituye el dato base para proyectar el crecimiento poblacional a futuro dentro del presente estudio.

2.6 Sistemas Urbanos de drenaje Sostenible (SUDS)

Son métodos innovadores para manejar las precipitaciones en las ciudades, diseñados para replicar los ciclos naturales del agua. Estos sistemas se desarrollan en armonía con los principios de sostenibilidad, considerando cuidadosamente los elementos de su diseño. Su meta primordial es controlar el flujo del agua de escorrentía, almacenando el agua que normalmente iría a los desagües. En lugar de evacuarla rápidamente, los SUDS buscan disminuir el volumen de agua pluvial y, a la vez, permitir su aprovechamiento y reutilización. (De la Fuente García et al., 2021)

Históricamente, la ingeniería se ha centrado en la evacuación veloz de las precipitaciones en las superficies, a fin de evitar interrupciones en la vida diaria de los ciudadanos. Sin embargo, este enfoque de diseño convencional a menudo falla, especialmente durante lluvias intensas, ya que los componentes de drenaje tradicionales (como imbornales, sumideros y redes de colectores) no logran manejar el gran volumen de agua generado por áreas urbanas cada vez más impermeables. (de la Fuente García et al., s. f.)

Es importante destacar que los SUDS no deben aplicarse de forma independiente, sino en combinación con otras infraestructuras de drenaje, dado que su uso individual no produce beneficios notables. Asimismo, al integrar estos sistemas, es fundamental tener en cuenta aspectos como la apariencia del entorno urbano, el diseño arquitectónico del sector y de las condiciones físicas del suelo ajustando estos componentes a las particularidades de cada lugar (J. Calle, 2019)

2.6.1 Funcionamiento de los SUDS

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son un grupo de estrategias que imitan los ciclos naturales del agua y que, en conjunto con los sistemas de drenaje convencionales, gestionan la escorrentía. La clasificación de los SUDS puede variar, basándose en su propósito principal, el tipo de intervención, la clase de sistema utilizado o su ubicación de implementación.

Para una clasificación inicial basada en su modo de operación, es fundamental entender las diversas funciones hidrológicas que los SUDS pueden desempeñar, en la siguiente tabla se observara cuáles son las funciones que cumple cada una de ellas.

Tabla 8: Funcionamiento de los SUDS

FUNCIONES HIDROLÓGICAS QUE LOS SUDS PUEDEN DESEMPEÑAR	
FILTRACION	Este proceso implica la captura de sedimentos del agua de lluvia. Se logra haciendo que el agua de escorrentía pase por materiales porosos, como suelos diseñados artificialmente o vegetación, que actúan como filtros físicos
DETENCION	Consiste en almacenar retienen por un tiempo el agua de escorrentía y después la conducen de manera controlada hacia la red de drenaje.o al punto de descarga. Esto ayuda a disminuir los picos de caudal y promueve la decantación de partículas.
TRATAMIENTO	Se enfoca en mejorar la calidad del agua de escorrentía mediante procesos naturales, tanto físicos como biológicos. Esto incluye técnicas como la fitorremediación (uso de plantas) o la acción de colonias bacterianas para degradar y remover contaminantes.
RETENCIÓN	Consiste en retener el agua de escorrentía durante un tiempo mayor, con la intención de reutilizarla en usos no potables, como el riego de áreas verdes o determinadas actividades recreativas.
INRILTRACIÓN	Busca facilitar que el agua de escorrentía se mueva verticalmente a través del suelo, permitiendo que se recarguen los acuíferos subterráneos. El agua se absorbe en el subsuelo en lugar de escurrir superficialmente.

Fuente: Adaptado por (De la Fuente García et al., 2021)

2.6.2. Tipo de drenaje sostenible

Suelen dividirse en dos categorías principales, basándose en el tipo de intervención que se va a llevar a cabo. Una de las clasificaciones más básicas es la que divide las medidas en dos categorías: que se observan continuación. (De la Fuente García et al., 2021)

Medidas estructurales: Se refieren a soluciones que requieren la incorporación de elementos constructivos específicos para el manejo del agua de lluvia. Su objetivo es tanto prevenir la contaminación del agua disminuir el volumen de agua que escurre en superficie. Ejemplos de estas medidas incluyen los pavimentos que posibilitan el tránsito del agua, los espacios diseñados alrededor de los árboles para su drenaje o las azoteas con vegetación.(De la Fuente García et al., 2021)

Medidas no estructurales: Se entienden como actuaciones que mejoran la gestión del agua de lluvia sin requerir intervenciones físicas directas sobre el sistema de drenaje. Incluyen acciones de tipo educativo, normativo, de planificación y de gestión institucional. Su propósito central es optimizar el desempeño de los sistemas de drenaje existentes, aumentar la conciencia ciudadana sobre la importancia del drenaje urbano y orientar el diseño de futuras infraestructuras hacia criterios más adecuados (De la Fuente García et al., 2021)

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) no se limitan a una sola función; por su naturaleza, suelen desempeñar múltiples roles. Además, la manera en que se configura un sistema SUDS puede alterar su comportamiento y las funciones que cumple En la siguiente imagen muestran los principales tipos de SUDS.

Tipología SUDS		Función principal				
		Filtración	Detención	Tratamiento	Retención	Infiltración
	Cubiertas vegetadas		S		P	
	Parterres inundables			P		S
	Balsas de detención e infiltración		P			S
	Cunetas vegetadas			P		S
	Alcorques estructurales		S			P
	Pavimentos permeables	P				S
	Drenes filtrantes	P	S			
	Pozos y zanjas de infiltración	S				P
	Depósitos reticulares		S			P
	Humedales artificiales y estanques		S	P		

Figura 6: Clasificación de los tipos de drenaje sostenible.

Fuente: Elaborado a partir de (de la Fuente García et al., s. f.)

Entre los principales tipos de drenajes urbano sostenible que describe (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021) tenemos:

Cubiertas vegetales. Consisten en varias capas que forman una cubierta vegetal sobre el techo de un edificio. Esta vegetación es el primer punto de contacto con la lluvia, permitiendo que el agua se filtre y retenga en la capa de sustrato. Adicionalmente, el agua de escorrentía se almacena temporalmente en una capa de drenaje, desde donde se utiliza para el riego pasivo de la vegetación (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021).

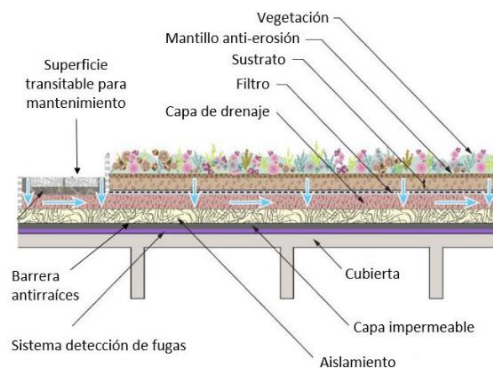


Figura 7: Esquema de una cubierta vegetada

Fuente: Adaptado por (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Parterres inundables. Son áreas ajardinadas con una ligera depresión que reciben la escorrentía procedente de superficies impermeables cercanas y la almacenan durante un tiempo antes de su infiltración o evacuación. Este tipo de elementos puede clasificarse según la procedencia del agua de lluvia que gestionan (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021):

- **Jardines de Lluvia:** Estos sistemas están diseñados para manejar el agua de escorrentía que presenta bajos niveles de contaminación, como la que proviene de áreas peatonales o techos.
- **Áreas de retención:** A diferencia de los jardines de lluvia, estas áreas están destinadas a tratar escorrentías con mayor carga de contaminantes, típicamente originadas en zonas con circulación vehicular, y por lo tanto, necesitan un proceso de purificación más intensivo.



Figura 8: Esquema de un parterre inundable

Fuente: Adaptado por (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Balsas de detención y/o infiltración. Almacenan temporalmente el agua de lluvia, liberándola controladamente por desagüe o infiltración. Esto también ayuda a asentar sedimentos. Según (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021) en su guía nos dice que deben vaciarse en 48 horas para estar listas para la siguiente lluvia. Permanecen secas la mayor parte del año, permitiendo usos alternativos en periodos sin precipitaciones.

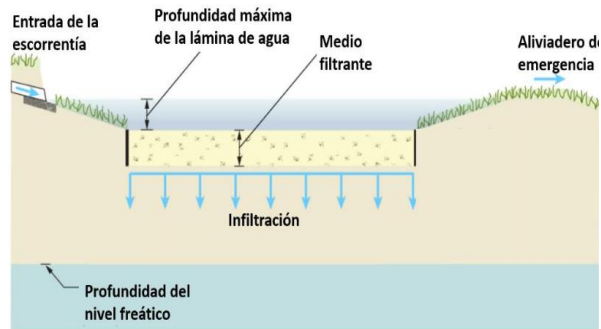


Figura 9: Balsas de detención y/o infiltración

Fuente: Adaptado por (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Cunetas vegetales. Son canales vegetados, anchos y poco profundos, que recogen y transportan escorrentías de zonas impermeables. La vegetación filtra contaminantes y permite la infiltración. Ideales para vías, suelen ser trapezoidales o parabólicos, y pueden incluir represas en pendientes para mejorar el almacenamiento e infiltración (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021).

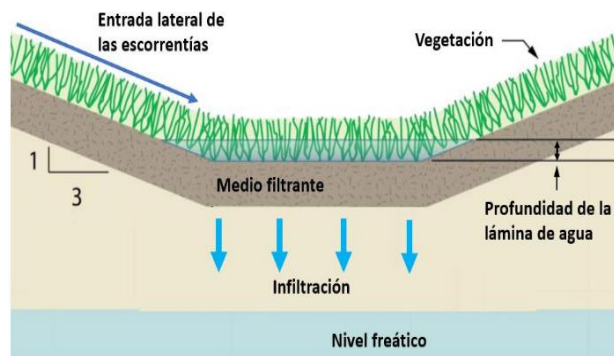


Figura 10: Cunetas vegetales

Fuente: Adaptado por (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Alcorques estructurales. Usan un suelo especial que almacena agua de lluvia y soporta árboles, permitiendo tráfico. Retienen parte del agua en la vegetación y el excedente puede infiltrarse. Su resistencia se logra con material granular o geoceldas rellenas de sustrato (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021).

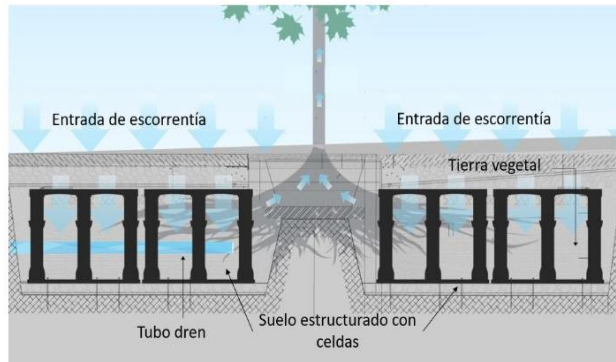


Figura 11: Alcorques estructurales

Fuente: Adaptado por (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Pavimentos permeables. Corresponden a soluciones de pavimentación que permiten que el agua de escurrentía atraviese la superficie y llegue a capas inferiores. De esta manera, el agua se almacena temporalmente en la subbase, por ejemplo, en estratos de grava o en geoceldas y luego puede infiltrarse en el terreno o descargarse de forma controlada. Según la configuración de la superficie, se distinguen dos grupos principales (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021):

- **Pavimentos porosos:** Presentan una capa de rodadura continua elaborada con materiales porosos (como mezclas de hormigón, asfalto o gravas tratadas), que permiten el paso del agua a su interior.
- **Pavimentos permeables por junta:** Se conforman con piezas de material impermeable, pero la disposición de las losas o adoquines genera juntas abiertas a través de las cuales el agua se infiltra hacia las capas subyacentes.

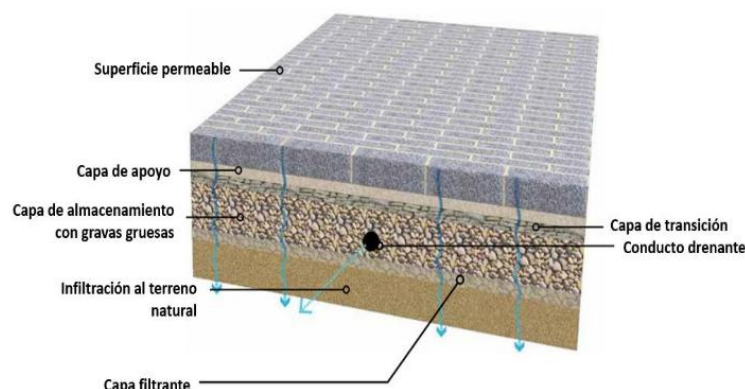


Figura 12: Pavimentos permeables

Fuente: Adaptado por (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Drenes filtrantes: Son zanjas de poca profundidad rellenas con material granular filtrante, en cuyo fondo se dispone un tubo dren perforado. La escorrentía ingresa desde los laterales, atraviesa el relleno y queda almacenada de forma temporal, lo que contribuye a atenuar los picos de caudal. Generalmente se utilizan gravas o módulos de polipropileno como medio de almacenamiento y es recomendable incorporar una capa superficial de geotextil para retener sedimentos y facilitar las labores de mantenimiento (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021).

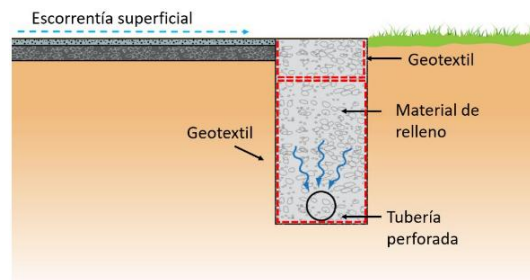


Figura 13: Drenes filtrantes

Fuente: Adaptado (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Zanjas y pozos de infiltración: Son cavidades construidas en el terreno que se rellenan con materiales muy porosos, como gravas u otros elementos sintéticos. Este espacio subterráneo almacena temporalmente el agua de escorrentía antes de que se infiltre. Se clasifican por su forma (Garcia, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021):

- **Zanjas:** Excavaciones lineales y poco profundas, a veces cubiertas con vegetación o gravas.
- **Pozos:** Son excavaciones verticales de mayor profundidad, cuyas paredes pueden mantenerse en suelo natural o recubrirse con anillos prefabricados de hormigón.



Figura 14. Esquema de una zanja de infiltración

Fuente: (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Depósitos reticulares. Son sistemas modulares enterrados que ofrecen una elevada capacidad de almacenamiento y buena resistencia estructural. Permiten guardar el agua de escorrentía de superficies cercanas para luego regular su flujo, reutilizarla o infiltrarla. No tratan el agua por sí solas, por lo que necesitan elementos adicionales de tratamiento y control. El agua entra filtrada desde la superficie o por tubería tras un pretratamiento. Se recomienda añadir un tubo de rebose (Antonio et al., 2023).

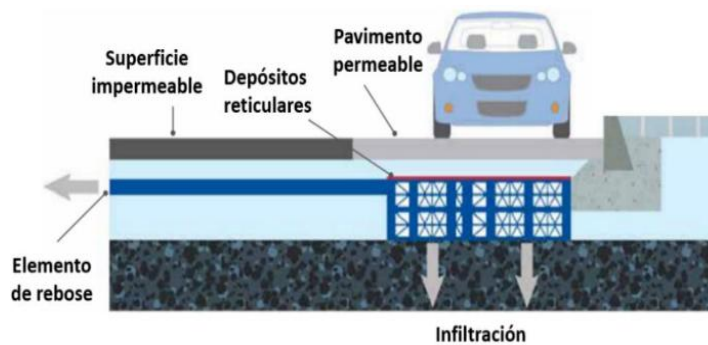


Figura 15. Depósitos reticulares

Fuente: (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

Humedades artificiales y estanques: Son reservorios de agua contruidos que incorporan vegetación acuática para favorecer procesos de fitorremediación y mejorar la calidad del agua. Mantienen un volumen almacenado que varía en función de las lluvias que reciben desde superficies impermeables, ofreciendo un espacio para laminar el exceso. Disponen de estructuras de rebose para evacuar el agua si el nivel supera lo

previsto. Generalmente, manejan grandes volúmenes de escorrentía de diversas fuentes (Antonio et al., 2023).



Figura 16. Humedades artificiales y estanques

Fuente: (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

2.6.3 La cadena de drenaje sostenible

Implementar sistemas de drenaje sostenible de manera individual no resulta del todo eficaz, ya que su verdadero aporte se logra cuando forman parte de una cadena integrada de tratamiento y gestión de aguas pluviales. Estos sistemas pueden complementarse entre sí o combinarse con el drenaje convencional existente para mejorar su funcionamiento. Por ejemplo, las franjas filtrantes pueden actuar como un pretratamiento que retiene sedimentos antes de que el agua pase a sistemas de infiltración o sea conducida mediante cunetas verdes hacia un estanque de retención, permitiendo una mejor regulación y depuración del flujo de aguas pluviales. (Calle, 2019)

Es viable combinar diferentes sistemas, aprovechando y fortaleciendo las características y beneficios de cada uno, para ajustar la cadena resultante a las condiciones particulares de su aplicación. La elección de los componentes más adecuados no es un proceso sencillo, ya que implica un enfoque multidisciplinario en el que deben considerarse factores que habitualmente se han dejado de lado, como la calidad del agua. (Calle, 2019).

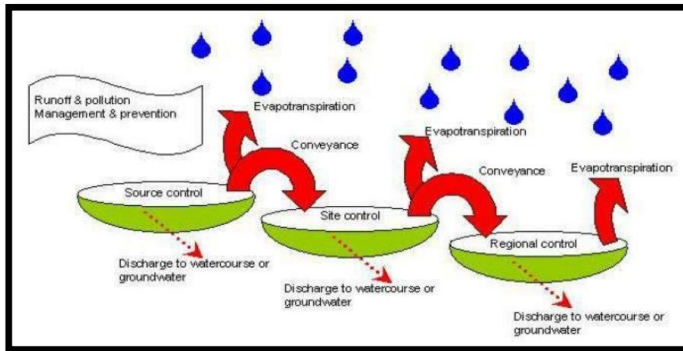


Figura 17: Fases del proceso de gestión de los SUDS

Fuente: Adaptado de (Calle, 2019)

Como se observa en la figura 17 muestra las etapas principales de una cadena de drenaje sostenible: control en origen, local y regional, que gestionan el agua de lluvia en todo el territorio. Un ejemplo sería un sistema de pavimentos permeables, cunetas verdes y drenajes filtrantes, seguido por depósitos de detención y un humedal artificial para el agua sobrante. Este esquema debe adaptarse a cada ubicación, pudiendo ser tan sencillo como un solo pozo de infiltración. (Calle, 2019)

2.7 Aspectos técnicos adicionales a considerar.

Más allá de las restricciones físicas que inciden en el diseño de los SUDS, es necesario considerar también factores de carácter urbano, entre los que se incluyen el desempeño operativo de los colectores existentes, la presencia de obras previamente establecidas y la necesidad de lograr una integración adecuada paisajística de las soluciones de drenaje propuestas. (García, Momparler, Cortes, Domenech, & Marco, 2021)

2.7.1 Redes de colectores y capacidad disponible

Los SUDS aplicados en zonas urbanas deben contar con un punto de descarga posterior a los procesos de detención, filtración o infiltración, que funcione como salida de emergencia o aliviadero. En este contexto, resulta esencial disponer de información precisa sobre la red de colectores municipales, identificando su ubicación y capacidad para evaluar

la viabilidad de conexión y el caudal máximo que puede ser derivado. (De la Fuente García et al., 2021)

Este sistema no solo proporciona la localización de las conducciones, sino también datos técnicos de pozos, imbornales y colectores, incluyendo cotas, pendientes y secciones, lo que facilita el diseño y la integración de los SUDS en la infraestructura existente (De la Fuente García et al., 2021)

2.7.2 Infraestructuras existentes

Estos sistemas demandan espacio tanto superficial como subterráneo y, con frecuencia, permiten la infiltración del agua de escorrentía en el terreno. Este proceso puede generar riesgos para las edificaciones existentes, por lo que es fundamental conservar una distancia de seguridad con respecto a las cimentaciones. Dicha separación dependerá de factores como el tipo de cimentación, el área drenada por la infraestructura y la permeabilidad del terreno, siendo necesaria una mayor distancia en suelos menos permeables. De manera general, se recomienda conservar un margen superior a 3 m, aunque en los casos en que los SUDS gestionen únicamente la escorrentía propia puede reducirse a 1 m. En desarrollos urbanos nuevos, se recomienda prever corredores específicos para los servicios básicos, lo cual minimiza su afectación durante la construcción o el mantenimiento, asegurando así la operatividad y sostenibilidad de los SUDS a lo largo de su vida útil. (De la Fuente García et al., 2021)

- **Integración en el paisaje urbano.** Se orienta principalmente hacia áreas impermeabilizadas, donde actúan como una opción ecológica frente a los sistemas de drenaje convencional. Su presencia genera un impacto positivo en la biodiversidad, al propiciar la conformación de nuevos ecosistemas urbanos. En aquellos espacios con cobertura vegetal preexistente, el diseño de SUDS debe considerar los hábitats y especies presentes, procurando su integración y continuidad con el entorno, con el fin de minimizar la alteración de los ecosistemas locales (de la Fuente García et al., 2021).

- **En relación con la vegetación.** Se recomienda priorizar especies autóctonas, dado que presentan una mayor resistencia a las condiciones climáticas propias del lugar y favorecen el desarrollo de la fauna asociada. No obstante, debe contemplarse que estas especies estarán expuestas a episodios de encharcamiento temporal durante periodos de lluvia. De acuerdo con la selección realizada, podría ser necesario incorporar un sistema de riego complementario, lo que implica verificar previamente la capacidad de la infraestructura existente para atender dicha demanda (de la Fuente García et al., 2021).

2.8 Beneficios de los sistemas de drenaje sostenible (SUDS)

Presenta importantes beneficios, siendo algunos de ellos inmediatos y otros que tienen repercusión en el transcurso del tiempo. Desde un punto de vista estrictamente hidrológico, tres son los beneficios fundamentales que presenta el uso de los SUDS (Antonio et al., 2023):

- a. **Disminución del volumen de escorrentía:** Parte de la escorrentía puede ser aprovechada, infiltrada o evapotranspirada en las zonas verdes, reduciendo el volumen descargado a los sistemas convencionales.
- b. **Laminación de los caudales pico:** Los SUDS contribuyen a reducir los caudales pico ya que pueden almacenar agua y descargarla en diferido a un caudal controlado.
- c. **Recuperación de la calidad del recurso hídrico:** El filtrado mediante materiales granulares y los procesos biológicos de biorremediación que proporciona la vegetación y el medio filtrante, contribuyen a mejorar la calidad del agua.

Así mismo en la Tabla 8 se muestra el pretratamiento del recurso hídrico, que se requeriría previa entrada al sistema, y la procedencia del agua para cada una de las tipologías comentadas en esta guía.

Tabla 9: Pretratamiento anterior a SUDS y procedencia del agua para cada tipología

Tipología	Pretratamiento anterior a SUDS	Procedencia del agua
Cubiertas vegetadas	No aplica	Ingreso directo
Parterres inundables	No aplica	Escorrentía superficial y/o conducto
Balsas de detención/infiltración	Recomendable depósito de sedimentación	Escorrentía superficial y/o conducto
Cunetas vegetadas	No aplica	Escorrentía superficial
Pavimentos permeables	No aplica	Escorrentía superficial
Drenes filtrantes/Zanjas dren	Recomendable pretratamiento en talud vegetado	Escorrentía superficial
Zanjas o Pozos de infiltración	Recomendable pretratamiento en talud vegetado	Escorrentía superficial
Depósitos reticulares	Tren de SUDS y/o separadores hidrodinámicos	Infiltración y/o conducto
Humedales artificiales	Tren de SUDS y/o separadores hidrodinámicos	Escorrentía superficial y/o conducto

Fuente: Adaptado por (Antonio et al., 2023)

a) Dispositivos de monitorización.

Los elementos de monitorización asociados a los sistemas permiten evaluar el desempeño de las técnicas SUDS aplicadas, proporcionando información cuantitativa sobre su efectividad en la disminución de volúmenes de escorrentía y la optimización de la calidad del agua. Estos dispositivos constituyen herramientas esenciales para la validación de los resultados. Finalmente, en la Tabla 9 se incluyen ejemplos de componentes auxiliares que pueden incorporarse a cada tipología de SUDS con el fin de optimizar su funcionamiento.

Tabla 10. Elementos auxiliares para cada tipología

TIPOLOGÍA	ELEMENTOS AUXILIARES (SI NECESARIO)
Cubiertas vegetadas	1. Rejillas en elementos de rebose.
Parterres inundables	1. Rejillas en elementos de rebose; 2. Bordillos discontinuos; 3. Entradas puntuales.

Balsas de detención/infiltración	1. Rejillas de detención de sólidos; 2. Disipadores de energía; 3. Bordillos discontinuos; 4. Entradas puntuales.
Cunetas vegetadas	1. Tubo dren si $k > 10^{-6}$ m/s; 2. Contenciones transversales; 3. Disipadores de energía.
Pavimentos permeables	1. Tubo dren si $k > 10^{-6}$ m/s; 2. Aterrazamientos para pendientes $> 3\%$
Drenes filtrantes/Zanjas dren	1. Bordillos discontinuos; 2. Entradas puntuales; 3. Disipadores de energía.
Zanjas o Pozos de infiltración	1. Bordillos discontinuos; 2. Entradas puntuales.
Depósitos reticulares	1. Rejillas de detención de sólidos; 2. Cámaras de detención y seguimiento.
Humedales artificiales	1. Rejillas en elementos de rebose; 2. Bordillos discontinuos; 3. Entradas puntuales.

Fuente: Adaptado por (Antonio et al., 2023)

2.9 Herramientas y Modelos para el Análisis (SWMM, SIG, etc.)

El diseño de sistemas de drenaje sostenible exige el uso de herramientas que permitan comprender y predecir cómo se comporta el agua dentro de la cuenca urbana. A través de la simulación hidrológica e hidráulica es posible analizar el funcionamiento de las propuestas y verificar su efectividad antes de su implementación. En este proceso, resulta especialmente útil combinar modelos computacionales, como los de tipo hidrológico-hidráulico, con plataformas de información geográfica, ya que esta integración ofrece una visión más completa del territorio y facilita la toma de decisiones ajustadas a las condiciones locales.

2.9.1 Storm Water Management Model EPA-SWMM

Es desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es uno de los programas más difundidos para la simulación de la escorrentía superficial y el comportamiento hidráulico de redes de drenaje urbano. Este software permite

representar procesos como infiltración, evaporación, almacenamiento en superficie, transporte en tuberías y estructuras de control hidráulico (Rossman, 2022a).

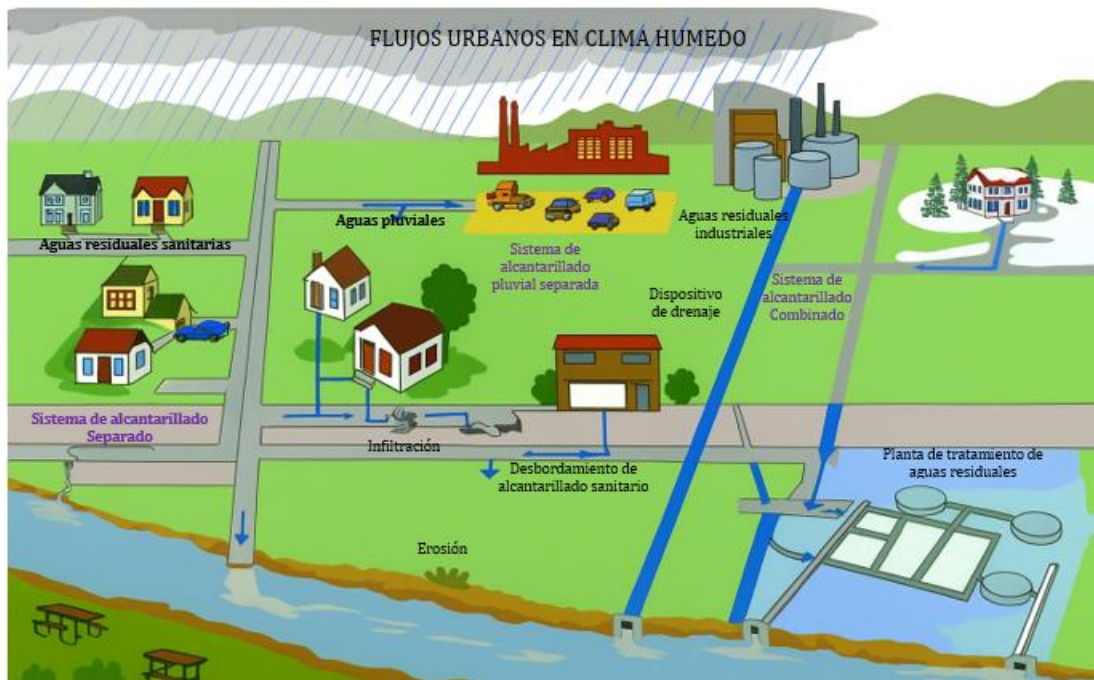


Figura 18: Sistema de drenaje

Fuente: Adaptado por (Rossman, 2022a)

2.9.1.1 Usos y aplicaciones del software

El programa se ha consolidado a nivel internacional por su manejo sencillo y la eficacia de sus procesos de cálculo. Estas cualidades lo convierten en una solución fiable y de amplia aplicabilidad para el análisis y diseño de sistemas hidráulicos. Su aplicación resulta idónea en diversos campos de la ingeniería urbana, donde se requiere precisión en la modelación de drenajes. A continuación, se conocerá los diferentes usos en lo que se emplea.

- 1. Manejo de inundaciones en zonas urbanas:** Este programa tiene la capacidad para diseñar y evaluar detalladamente sistemas de evacuación de aguas pluviales y residuales en áreas urbanas, ayudando a prevenir y reducir el riesgo de inundaciones. (Guevara & Jabó, 2025a)

2. **Desarrollo de infraestructura de drenaje pluvial:** Se posiciona como una herramienta esencial para la ingeniería de drenaje. Su capacidad abarca desde el diseño de componentes sencillos hasta la modelización de sistemas de drenaje urbanos de gran escala y alta complejidad. El uso de SWMM garantiza que el diseño de elementos clave como tuberías, canales y estructuras de control sea técnicamente correcto, asegurando que el sistema de drenaje cumpla con los estándares requeridos de capacidad hidráulica y eficiencia operativa. (Guevara & Jabó, 2025a)
3. **Planificación de proyectos con enfoque sostenible:** ofrece una funcionalidad avanzada para la evaluación de los impactos que los proyectos de drenaje tienen sobre la calidad del agua. En sus versiones más recientes, como la 5.2, incorpora herramientas específicas para el desarrollo de infraestructuras de bajo impacto (LID - Low Impact Development). Estas herramientas permiten a los diseñadores modelar y establecer soluciones de drenaje sostenible, cuyo objetivo principal es minimizar la huella ambiental y los efectos negativos sobre el medio ambiente. (Guevara & Jabó, 2025)

2.9.1.2. Modelo Conceptual Utilizada por el programa.

Evalúa los sistemas de drenaje de aguas de lluvia, es útil pensar en él como un cerebro dividido en varias áreas de especialización. El programa no solo simula lo que sucede en las tuberías, sino que también considera todos los factores que influyen en el ciclo del agua en un entorno urbano. (Rossman, 2022b)

Los elementos virtuales del SWMM son la columna vertebral de la simulación. Aunque no se visualizan como iconos en el mapa del programa, son los datos y las reglas que dictan el comportamiento del sistema. Su función es crítica para asegurar que el software corra de manera adecuada y que los resultados sean precisos (Rossman, 2022b):

- ✓ Objetos de modelación relacionados con la climatología y la temperatura.

- ✓ Objetos destinados a la simulación de eventos de nieve.
- ✓ Elementos para la modelación de acuíferos.
- ✓ Hidrogramas unitarios.
- ✓ Definición de las secciones transversales de los conductos.
- ✓ Establecimiento de reglas de control.
- ✓ Modelación de contaminantes presentes en el flujo.
- ✓ Asignación de usos del suelo.
- ✓ Procesos asociados al tratamiento del agua.
- ✓ Incorporación de curvas y series temporales.
- ✓ Configuración de patrones de tiempo.

Los elementos físicos o visuales corresponden a aquellos que el programa representa gráficamente en el panel principal o mapa del modelo (Figura 20). En este espacio se visualizan los distintos componentes que conforman el sistema de drenaje, los cuales se describen con mayor detalle en la tablas 10 y 11.

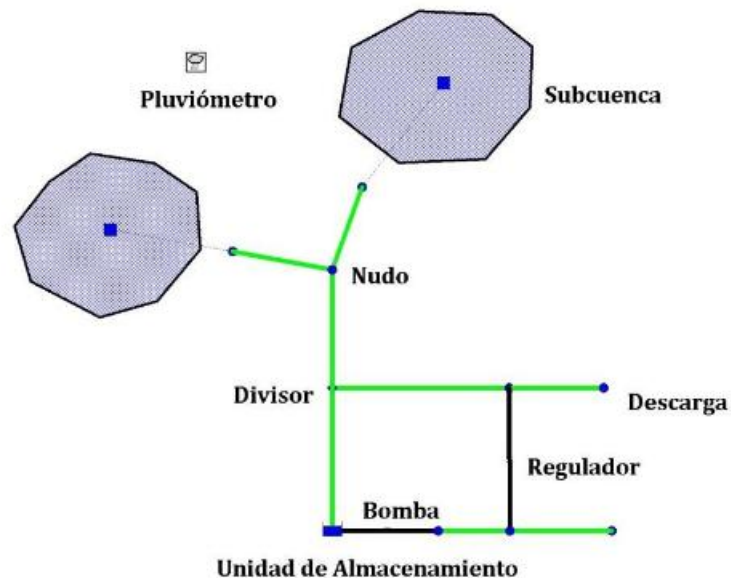


Figura 19: Componentes físicos representados en un sistema de drenaje modelado con SWMM.

Fuente: Elaborado a partir de (Rossman, 2022a)

Tabla 11: Componentes estructurales del sistema de drenaje en SWMM

Componentes del sistema de drenaje pluvial modelado con SWMM	
ELEMENTOS	DESCRIPCION
Pluviómetros (Rain Gages)	Proporcionan los datos iniciales de las precipitaciones para crear los hietogramas de diseño que afectan a una o múltiples cuencas, y estos pueden ser especificados mediante series temporales o mediante archivos externos al programa.
Cuencas (subcathments)	Corresponden a áreas del terreno que recogen y conducen el agua de lluvia hacia puntos de concentración. Se pueden dividir en zonas permeables e impermeables para representar mejor la escorrentía superficial.
Nudos de conexión	Representan los puntos donde confluyen tuberías o canales dentro del sistema de drenaje. Permiten la unión de diferentes tramos y la incorporación de caudales externos.
Nudos de vertido (Outfall nodes)	Funcionan como puntos terminales del sistema, donde el agua es descargada hacia un cuerpo receptor o estructura final. En algunos modelos también actúan como nudos de conexión.
Sistemas de Almacenamiento	Son estructuras que retienen temporalmente el agua dentro del sistema de drenaje. Su capacidad depende del volumen y tipo de almacenamiento definido en el modelo.
Conductos	Simbolizan las tuberías o canales que transportan el agua entre los distintos elementos del sistema. El caudal que circula se calcula aplicando la ecuación de Manning según su geometría.

Fuente: Elaborado a partir de (Rossman, 2022a)

2.9.2 Modelos de simulación computacional

El programa SWMM incorpora distintos módulos computacionales diseñados para representar tanto la cantidad como la calidad del agua de escorrentía producida por las precipitaciones. Estos módulos trabajan de manera integrada, permitiendo que los resultados de uno alimenten a los demás y garantizando así una simulación coherente del comportamiento hidrológico e hidráulico del sistema. (Rossman, 2022b)

- a) **Modelo hidrológico de generación de escorrentía (Run off):** El modelo de escorrentía superficial (Runoff) concibe a cada cuenca como un depósito no lineal encargado de transformar la precipitación, en sus distintas formas

(lluvia, nieve, entre otras), en escorrentía. Para ello, se consideran factores propios de cada área, como la permeabilidad, los procesos de infiltración, evaporación, pendiente del terreno y escorrentía superficial. La representación detallada de este modelo se expone en la figura 20 (Epa et al., 2015).

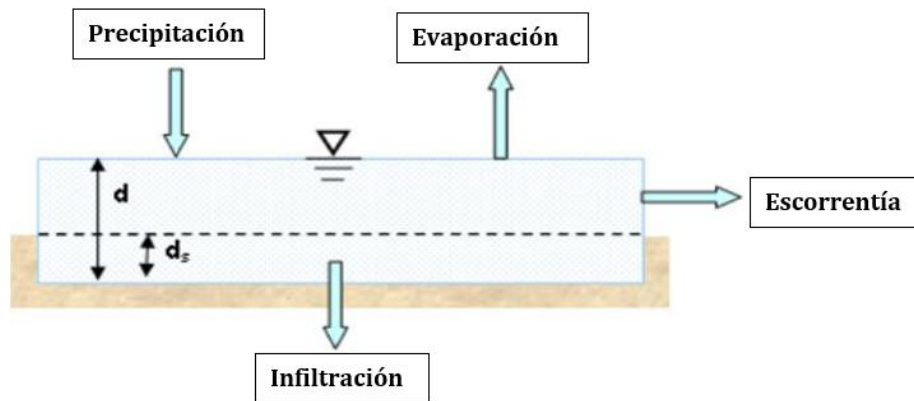


Figura 20: Visión conceptual del modelo de escorrentía superficial.

Fuente: Adaptado por (Rossman, 2022a)

b) **Modelo de infiltración:** El modelo de infiltración se refiere al proceso mediante el cual el agua de lluvia penetra en el suelo, dependiendo de las características del terreno y de la intensidad de la precipitación se filtra en las superficies no impermeables de cada cuenca. El software SWMM incorpora tres enfoques de modelación de la infiltración, que son los siguientes:(Epa et al., 2015)

- **Ecuación de Horton:** Indica que la capacidad del suelo para infiltrar agua se reduce de forma exponencial a medida que progresa la lluvia. (Epa et al., 2015)
- **Método de Green-Ampt:** Se basa en la hipótesis de que la tasa de infiltración del suelo decrece conforme aumenta el tiempo de exposición a la precipitación.(Epa et al., 2015)

- c) **Modelo hidráulico de flujo y transporte:** Este modelo permite analizar el movimiento del agua dentro de los conductos del sistema, considerando factores como la intensidad de la lluvia, la rugosidad de las superficies y las condiciones hidráulicas del flujo. Para su simulación, el programa emplea ecuaciones de conservación de masa y energía, ofreciendo distintos enfoques de cálculo según el nivel de detalle requerido en cada análisis (Epa et al., 2015)

2.9.3 Herramientas Low Impact Development (LID)

se diseñan como sistemas conformados por capas que permiten captar, infiltrar y regular la escorrentía superficial. Su funcionamiento se basa en procesos naturales como la retención, la infiltración y la evapotranspiración del agua. Este tipo de soluciones buscan mitigar los impactos del desarrollo urbano sobre el ciclo hidrológico, disminuyendo los volúmenes de escorrentía y mejorando la calidad del agua mediante tecnologías sostenibles de filtración y tratamiento. (Epa et al., 2015)

2.9.3.1 Tipos de herramientas LID

El programa SWMM incorpora diversos módulos y herramientas especializadas para la implementación de infraestructuras de bajo impacto (LID), permitiendo simular su comportamiento dentro del sistema de drenaje urbano. A continuación, se describen las principales herramientas LID disponibles en el software. (Rossman, 2022a):

- ✓ Celdas de biorretención (Bio-retention Cells)
- ✓ Jardines de lluvia (Rain Gardens)
- ✓ Techos verdes (Green Roofs)
- ✓ Sistemas de pavimento permeable continuo y de bloques de adoquines
- ✓ Cisternas y tanques de almacenamiento

Cabe destacar que, en el presente proyecto, la aplicación de las herramientas LID se ha realizado considerando las condiciones topográficas y estratigráficas del área de estudio, así como las particularidades del entorno urbano y de la población local.

2.10 Elementos físicos esenciales para la modelación en SWMM

El software SWMM permite representar los distintos elementos que conforman un sistema de drenaje pluvial mediante objetos gráficos dentro de su interfaz de mapeo. Estos componentes físicos son fundamentales para modelar de forma precisa el comportamiento del escurrimiento superficial y subterráneo dentro del área de estudio. Cada objeto representa una parte específica del sistema, como subcuencas, conductos, nodos, pozos de inspección, estructuras de control o salidas del sistema. La siguiente figura ilustra estos elementos, mostrando su disposición y función dentro del modelo hidráulico e hidrológico.(Epa et al., 2015)

Área de aporte: Las cuencas hidrográficas representan unidades naturales del territorio, donde la topografía y la red de drenaje determinan el recorrido del agua hasta un punto común de descarga. En el contexto del modelado hidrológico, el usuario del software es quien define la delimitación del área de estudio en cuencas o subcuencas, identificando en cada caso su punto de salida u outlet, el cual puede corresponder a un nodo del sistema de drenaje o a otra cuenca adyacente.

Cada cuenca puede segmentarse en zonas permeables e impermeables. En las superficies permeables, las lluvias pueden infiltrarse directamente en el suelo, mientras que en las impermeables este proceso no ocurre. Estas últimas pueden subdividirse, además, en áreas con almacenamiento en depresiones y áreas sin él, lo que influye en el comportamiento de la escorrentía.

Entre los parámetros fundamentales para definir una cuenca en el modelo se encuentran(Epa et al., 2015):

- **Área:** Superficie total de la subcuenca, la cual puede variar según el alcance del proyecto.
- **Ancho característico:** Corresponde a la proporción entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal, tomada perpendicularmente al flujo.
- **Pendiente:** Corresponde al promedio ponderado de las inclinaciones de las superficies dentro de cada subcuenca, parámetro que influye significativamente en el cálculo de escorrentías.
- **Área impermeable:** Se considera área impermeable a toda superficie dentro de una subcuenca que restringe la infiltración del agua proveniente de la lluvia, provocando que esta se convierta rápidamente en escorrentía superficial. Este parámetro resulta fundamental en los estudios hidrológicos, ya que tiene una influencia directa en el volumen y la velocidad del flujo generado durante los eventos de precipitación.
- **Coefficiente de rugosidad de Manning:** Este coeficiente representa la resistencia al flujo que ofrece la superficie sobre la que se desplaza el agua. Dependiendo de si el área es permeable o impermeable, el valor del coeficiente varía en función de la textura, el material y las condiciones del terreno. Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, mostrados en la Tabla 12, fueron obtenidos del manual hidráulico del Storm Water Management Model (SWMM) publicado por la (EPA,2005), el cual establece rangos de referencia ampliamente utilizados en la modelación hidrológica.

Tabla 12: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para escorrentía en superficies de subcuencas

Superficie	n
Asfalto liso	0.011
Hormigón liso	0.012

Revestimiento de hormigón basto	0.013
Madera pulida	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
Fundición de hierro	0.015
Tuberías de metal corrugada	0.024
Superficie de escombrera	0.024
Terreno improductivo (libre de residuos)	0.05
Terreno cultivado - Cubierta de residuos < 20%	0.06
Terreno cultivado - Cubierta de residuos > 20%	0.17
Pasto natural	0.13
Hierba corta, pradera densa	0.15
Hierba Bermuda	0.24
Bosque con cubierta ligera de arbustos	0.40
Bosque con cubierta densa de arbustos	0.80

Fuente: Tomado de Storm Water Management Model (SWMM) Hydraulic Reference Manual (Epa et al., 2015)

- Almacenamiento en depresiones:** Se refiere al volumen de agua que se acumula temporalmente en pequeñas depresiones del terreno dentro de una subcuenca durante un evento de precipitación. En la siguiente tabla se presentan valores referenciales de profundidad de almacenamiento superficial para distintos tipos de cobertura del terreno. Estos datos fueron adaptados del documento de la EPA (2015) y se utilizan como base para la estimación de la capacidad de retención inicial en superficies con diferentes grados de permeabilidad.

Tabla 13: Valores referenciales de almacenamiento superficial según el tipo de cobertura del terreno.

Valores referenciales de profundidad de almacenamiento superficial	
Superficie impermeable	1.25 - 2.5 mm
Césped y hierba	2.5 - 5 mm
Pastos y prados	≈ 5 mm
Lecho forestal	≈ 7.5 mm

Fuente: Elaboración propia con base en (Epa et al., 2015)

- **Área impermeable sin almacenamiento en depresión:** Se refiere al porcentaje de superficie impermeable dentro de la subcuenca que no presenta capacidad de retener agua en forma de charcos o pequeñas acumulaciones tras una lluvia.
- **Dirección del flujo entre subáreas:** En esta opción se define cómo se distribuye el flujo de agua entre las áreas de diferente permeabilidad del terreno. El usuario puede escoger entre tres alternativas(Epa et al., 2015):
 IMPERV: El agua fluye desde el área permeable hacia la impermeable.
 PERV: El flujo se dirige desde la impermeable hacia la permeable.
 OUTLET: Drenan directamente hacia el punto de salida sin interacción entre sí.

Nudos de conexión en el sistema de drenaje: Los nudos representan puntos clave dentro del sistema de drenaje donde convergen distintas conducciones hidráulicas, ya sean canales naturales, tuberías, o pozos de revisión (manholes). En términos funcionales, estos nudos actúan como puntos de encuentro entre diferentes líneas de flujo, permitiendo la integración del caudal proveniente de diversas fuentes.(Epa et al., 2015)

Los caudales externos ingresan al sistema precisamente a través de estos nudos. Cuando la capacidad de conducción se ve superada, el agua puede experimentar un comportamiento presurizado parcial, siempre que las tuberías conectadas se encuentren en régimen de carga.(Epa et al., 2015)

Parámetros principales de entrada en un nudo(Epa et al., 2015):

- **Profundidad máxima:** Este valor también es conocido como "profundidad de excavación" o "profundidad de corte", y es esencial para el diseño estructural del pozo o nodo de conexión.(Epa et al., 2015)
- **Aportes:** Esta sección permite incorporar caudales que ingresan directamente al sistema, ya sea por escorrentía superficial (aportes externos), por filtraciones durante tiempo seco o mediante procesos de infiltración o entrada retardada (RDII). Estos aportes se gestionan a través de tres apartados principales dentro del software de modelación.(Epa et al., 2015)
 1. **Componente:** Especifica el tipo de entrada o la naturaleza del flujo que se incorpora al nudo (por ejemplo, aportes de lluvia directa, escorrentía urbana, entre otros).
 2. **Valor medio:** Corresponde al caudal promedio del aporte considerado, el cual será distribuido hacia el nodo en cuestión.
 3. **Serie temporal:** Representa la variación del caudal de aporte a lo largo del tiempo, permitiendo ingresar una secuencia de datos para simular condiciones reales o fluctuantes durante el evento de simulación.

Vertidos (Outfalls): Representan las salidas principales del sistema de drenaje, en las cuales se establecen las condiciones finales de descarga del flujo (Epa et al., 2015).

- **Tipo de descarga:** Forma en la que el agua es conducida al momento de ser evacuada. El software SWMM permite seleccionar entre distintas opciones:
 - ◆ **FREE (Libre):** La descarga ocurre bajo condiciones controladas por el menor valor entre el calado crítico y el calado uniforme del conducto.
 - ◆ **NORMAL (Normal):** El nivel de descarga se calcula considerando únicamente el calado uniforme.
 - ◆ **FIXED (Fijo):** Se establece un nivel de descarga constante a lo largo del tiempo.

- ◆ **TIDAL (Mareal):** El nivel de descarga varía según una curva de marea definida por hora del día. **TIMESERIES (Serie temporal):** El nivel de vertido se determina en función de una serie temporal previamente establecida.
- Vertido variable en el tiempo:
 - ◆ **Nombre de la serie temporal:** Cuando se considera una descarga sujeta a variaciones temporales (por ejemplo, con datos pluviográficos), se debe especificar el nombre de la serie temporal que contiene dicha información (Epa et al., 2015).

Conductos: En EPA SWMM es posible elegir entre diferentes tipos de secciones transversales, ya sean cerradas (como tuberías circulares) o abiertas (como canales trapezoidales), e incluso se pueden definir geometrías irregulares, lo que permite modelar cauces naturales con mayor precisión. Para calcular el caudal que circula a través de estos conductos, el programa utiliza la ecuación de Manning que relaciona los siguientes parámetros.

$$Q = \frac{1}{n} * A R_h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S} \quad (12)$$

Donde:

A: area de la seccion

Q: caudal

n: Coeficiente de rugosidad de Manning

S: Pendiente de la conduccion

Rh: Radio hidraulico

Para cada conducto es necesario ingresar los siguientes datos:

- ✓ **Alturas de entrada y salida:** Corresponden a la elevación del conducto respecto al fondo de los nodos inicial y final, y determinan la pendiente hidráulica.
- ✓ **Coefficiente de Manning:** Define el tipo de material del conducto (por ejemplo, PVC, concreto, etc.).
- ✓ **Tipo de sección transversal:** El programa ofrece múltiples formas geométricas para representar la sección del conducto (circular, trapezoidal, rectangular, elíptica, entre otras). Estas geometrías permiten adaptar el modelo a las condiciones reales del sistema de drenaje.

En la figura 21 del manual se resumen las distintas secciones transversales disponibles en EPA SWMM, cada una con sus características hidráulicas específicas, permitiendo una representación detallada del sistema.






















Nombre	Parámetros	Forma	Nombre	Parámetros	Forma
Circular	Profundidad		Circular rellena	Profundidad, profundidad del relleno	
Rectangular Cerrado	Profundidad, ancho		Rectangular abierto	Profundidad, ancho	
Trapezoidal	Profundidad, ancho en la parte posterior, pendiente lateral.		Triangular	Profundidad, ancho en la parte superior	
Elipse Horizontal	Profundidad		Elipse Vertical	Profundidad	
Arco	Profundidad		Parabólica	Profundidad; ancho en la parte superior	
Potencial	Profundidad. Ancho en la parte superior, exponente		Rectangular - Triangular	Profundidad, ancho	
Rectangular Redondeado	Profundidad, ancho		Cesta de mano modificada	Profundidad, ancho	
Huevo	Profundidad		Huella de caballo	Profundidad	
Gótico	Profundidad		Catenaria	Profundidad	
Semi elíptica	Profundidad		Cesta de mano	Profundidad	
Semicircular	Profundidad				

Figura 21: Tipos de secciones transversales de conductos disponibles en el software EPA-SWMM.

Fuente: EPA, (2015)

- ✓ **Desnivel de líneas:** Este parámetro dispone de dos opciones: DEPTH, que representa la profundidad del elemento respecto a un punto de referencia, y ELEVATION, que indica la cota de elevación. Ambas se utilizan para definir el desnivel entre tramos de tubería, comúnmente conocidos como saltos hidráulicos dentro del sistema.(Epa et al., 2015)
- ✓ **Altura (Profundidad Máxima):** Corresponde al diámetro o altura máxima del conducto, es decir, la dimensión total que puede ocupar el flujo dentro de la tubería.(Epa et al., 2015)
- ✓ **Desnivel de entrada y salida:** Es la diferencia de altura entre la base de la tubería en el nodo inicial y en el nodo final, lo cual permite calcular la pendiente hidráulica a lo largo del tramo.(Epa et al., 2015)

2.10.1 Métodos computacionales para el cálculo de escorrentía

Este modelo permite representar de forma detallada tanto la generación como el transporte de la escorrentía, así como su impacto en la calidad del agua, a través de la modelación de los siguientes procesos físicos:(Epa et al., 2015):

- **Escorrentía superficial:** Simula el escurrimiento generado en la superficie como resultado de la precipitación.
- **Infiltración:** Calcula la porción de agua que penetra en el suelo desde la superficie.
- **Flujo subterráneo:** Modela el movimiento del agua que se infiltra a través de las capas del subsuelo.
- **Hidráulica del sistema:** Analiza el comportamiento de los flujos a través de los elementos del sistema de drenaje (conductos, canales, etc.).
- **Inundaciones superficiales del terreno:** Representa el desbordamiento del sistema cuando su capacidad es superada.

- **Comportamiento y evolución de calidad del agua:** Evalúa la evolución de contaminantes transportados por la escorrentía a lo largo del sistema

Escorrentía Superficial: En el modelo SWMM, la escorrentía superficial se representa de manera conceptual mediante un depósito no lineal para cada subcuenca. Este depósito recibe aportes hídricos de diferentes fuentes, como precipitación directa (lluvia o nieve) y también de otras subcuencas ubicadas aguas arriba. (Epa et al., 2015). El sistema considera varias vías de salida del agua, entre ellas:

- ✓ Infiltración hacia el suelo.
- ✓ Evaporación directa.
- ✓ Escorrentía superficial generada en superficie.

La capacidad máxima del depósito está definida por un parámetro conocido como almacenamiento en depresión (depression storage), el cual representa el volumen máximo de agua que puede acumularse en la superficie de la cuenca. La escorrentía superficial comienza a generarse solamente cuando la profundidad del agua (d) acumulada sobre el terreno excede el valor de almacenamiento en depresión (d_p). En ese momento, el caudal de escorrentía se calcula aplicando la ecuación de Manning. (Epa et al., 2015)

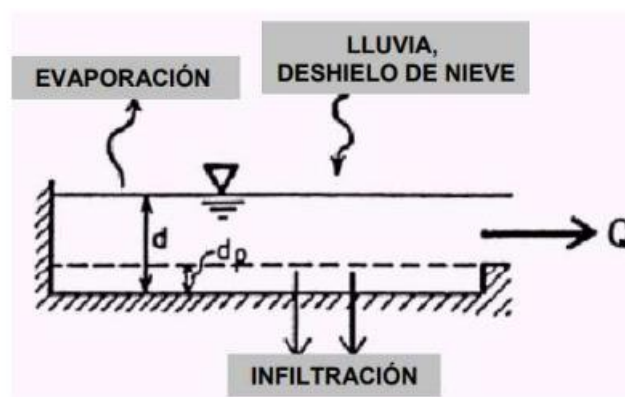


Figura 22. Representación conceptual del proceso de escorrentía

Fuente: (Epa et al., 2015)

Infiltración: Es cuando el agua de lluvia penetra en el suelo a través de su superficie, especialmente en aquellas áreas permeables de la cuenca que no se encuentran saturadas.

Para modelar el proceso de infiltración en las zonas permeables, existen tres enfoques comúnmente utilizados: el modelo de Horton, el de Green-Ampt y el método del Número de Curva (CN) propuesto por el SCS (Soil Conservation Service). (Epa et al., 2015). De las cuales se escogió el número de curva para nuestro análisis.

Método del Número de Curva (Curve Number – CN): Este método estima la escorrentía en función de un número de curva que representa a habilidad del suelo para permitir el paso del agua hacia sus capas internas. El CN se selecciona a partir de tablas que consideran los diferentes suelos, la presencia de vegetación y el nivel de humedad del suelo antes de la precipitación. Los parámetros requeridos son (Pacheco & Coraisaca, 2022).

- ✓ El número de curva (CN)
- ✓ La conductividad hidráulica (utilizada para estimar el tiempo de recuperación entre eventos)
- ✓ El tiempo necesario para saturar el suelo desde condiciones completamente secas.

En función de la clasificación del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), los suelos se agrupan según su capacidad de infiltración y su potencial de escorrentía. En la Tabla 14 se presentan los valores de conductividad hidráulica saturada para cada grupo hidrológico, conforme a los datos publicados por la (Epa et al., 2015).

Tabla 14: tipos de suelo según el NRCS

GRUPO	SIGNIFICADO	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (IN/HR)
		> 1.42

A	<p>Bajo potencial de escorrentía. El agua se transmite libremente a través del suelo. Los suelos del Grupo A generalmente tienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena o grava, y presentan texturas arenosas o arenosas-gravosas.</p>	
B	<p>Potencial moderadamente bajo de escorrentía. La transmisión del agua a través del suelo no presenta obstáculos. Los suelos del Grupo B suelen tener entre 10% y 20% de arcilla y entre 50% y 90% de arena, y presentan texturas de arena franca o franco arenosa.</p>	0.57 – 1.42
C	<p>Potencial moderadamente alto de escorrentía. La transmisión del agua a través del suelo es algo restringida. Los suelos del Grupo C generalmente tienen entre 20% y 40% de arcilla y menos del 50% de arena, y presentan texturas de franco, franco limoso, franco arenoso, arcilloso y arcilloso limoso.</p>	0.06 – 0.57
D	<p>Alto potencial de escorrentía. El movimiento del agua a través del suelo está restringido o muy restringido. Los suelos del Grupo D generalmente tienen más del 40% de arcilla, menos del 50% de arena, y presentan texturas fuertemente arcillosas.</p>	< 0.06

Fuente: Tomado de Storm Water Management Model (SWMM) Hydrology Reference Manual (Epa et al., 2015)

En este estudio se emplea la metodología del *Número de Curva (CN)* propuesta por el *Soil Conservation Service (SCS/NRCS)*, la cual permite establecer la relación entre las características del suelo, el tipo de cobertura y la humedad antecedente para estimar la escorrentía superficial. Los valores referenciales utilizados se presentan en la Tabla 15, conforme a los criterios técnicos definidos por la (Epa et al., 2015)

Tabla 15: Numero de curva para escorrentía (CN) según el SCS

Descripción del uso del suelo	A	B	C	D
Cultivos (sin tratamiento de conservación)	72	81	88	91
Cultivos (con tratamiento de conservación)	62	71	78	81
Pastizales en mal estado	68	79	86	89
Pastizales en buen estado	39	61	74	80
Pradera en buen estado	30	58	71	78
Bosque (pobre cobertura, sin mantillo)	45	66	77	83
Bosque (buena cobertura)	25	55	70	77
Áreas abiertas/parques/césped (buena cobertura)	39	61	74	80
Áreas abiertas/parques/césped (cobertura regular)	49	69	79	84
Áreas comerciales/negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Áreas industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
Residencial (1/8 ac o menos)	77	85	90	92
Residencial (1/4 ac)	61	75	83	87
Residencial (1/3 ac)	57	72	81	86
Residencial (1/2 ac)	54	70	80	85
Residencial (1 ac)	51	68	79	84
Estacionamientos/techos/pavimentos	98	98	98	98
Calles asfaltadas	98	98	98	98
Calles de grava	76	82	87	91
Calles de tierra	72	82	87	91

Fuente: Adaptado de Storm Water Management Model (SWMM) Hydrology Reference Manua

(Epa et al., 2015)

En el presente estudio se adopta el método del Número de Curva (CN) del SCS/NRCS, dado que permite relacionar de manera sencilla las características del suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente con la generación de escorrentía. A partir del valor de CN es posible estimar el almacenamiento máximo potencial del suelo, S (mm), entendido como la cantidad de lluvia que el terreno puede retener antes de que se produzca escorrentía superficial. Este parámetro se calcula mediante la expresión propuesta por el SCS(Sánchez, 2022):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

Donde:

S : Almacenamiento máximo potencial del suelo (mm)

CN : Numero de curva (adimensional)

Modelo hidráulico de transporte: En SWMM, el movimiento del agua a través de los conductos se calcula a partir de las ecuaciones de conservación de masa y energía, aplicables a flujos gradualmente variables o no permanentes. Estas corresponden a las ecuaciones de Saint Venant, que permiten representar de forma realista el comportamiento hidráulico. El usuario puede seleccionar el nivel de detalle con el que desea resolverlas, según los objetivos del análisis (Epa et al., 2015):

- **Modelo de Flujo Uniforme (Steady State Routing):** Este modelo representa la forma más simple de cálculo hidráulico, donde se asume que el flujo es constante y uniforme en el tiempo. El programa traslada el hidrograma desde el punto de entrada hasta la salida del conducto aplicando la ecuación de Manning para relacionar el caudal, el área y la pendiente. Aunque es eficiente, no considera efectos como almacenamiento, pérdidas por entrada o salida, ni flujo presurizado.(Epa et al., 2015)

- **Modelo de la Onda Cinemática (Kinematic Wave Routing):** Este modelo simplifica el flujo considerando solo la relación entre la pendiente y la fricción del conducto. No toma en cuenta los efectos de inercia ni de presión, por lo que es útil en sistemas con pendientes pronunciadas o sin presencia de zonas de retención. Su aplicación es rápida y eficiente cuando se busca un análisis básico del comportamiento del drenaje. (Epa et al., 2015)
- **Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing):** Este modelo se considera el más completo y preciso, ya que resuelve de manera integral las ecuaciones de Saint Venant. En su formulación incluye la continuidad del flujo, la dinámica del movimiento del agua y el equilibrio de volúmenes en los diferentes nudos del sistema. (Epa et al., 2015)

Estudios topográficos

Los estudios topográficos comprenden una serie de actividades orientadas a describir con precisión áreas específicas de la superficie terrestre, ya sean naturales o modificadas por el ser humano. Esta disciplina se encarga de observar y representar detalladamente el terreno, utilizando diversos métodos para medir, procesar y presentar información geoespacial (Altamirano, 2024).

Existen distintos tipos de levantamientos topográficos, entre ellos:

- **Planimétricos:** se enfocan en determinar la posición de puntos en un plano horizontal, utilizando coordenadas (X, Y) dentro de un sistema de referencia. (Altamirano, 2024)
- **Altimétricos:** se centran únicamente en identificar la altitud o elevación de los puntos, obteniendo las cotas correspondientes. (Altamirano, 2024)
- **Taquimétricos:** integran tanto el levantamiento planimétrico como altimétrico, es decir, registran simultáneamente la ubicación y la altura de los puntos, resultando en una representación tridimensional (X, Y, Z). (Altamirano, 2024)

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG constituyen plataformas digitales capaces de gestionar, analizar y representar información espacial y georreferenciada. Su utilidad en el estudio de drenaje urbano radica en la posibilidad de integrar datos topográficos, de las características del uso del suelo, la vegetación existente, pendientes y redes de infraestructura existentes (Sehrawat & Shekhar, 2025).

Herramientas como ArcGIS, QGIS y gvSIG se han consolidado en la práctica profesional e investigativa. En Ecuador, varios proyectos han empleado QGIS por su carácter libre y abierto, facilitando la generación de mapas de escorrentía, delimitación de microcuencas y análisis de vulnerabilidad hídrica. (Pacheco & Coraisaca, 2022) resaltan que la integración SIG-SWMM permite mejorar la precisión en la estimación de caudales de diseño y evaluar escenarios de mitigación con mayor realismo espacial.

Integración de Modelos y Herramientas: La tendencia actual en la planificación de drenajes urbanos es la integración entre SIG y SWMM, complementada con herramientas adicionales como AutoCAD Civil 3D para el diseño geométrico. Esta integración permite simular de manera precisa el comportamiento del agua en distintos escenarios, evaluar alternativas de diseño y comunicar los resultados de forma clara a los tomadores de decisiones (Pacheco & Coraisaca, 2022).

2.11 Revisión de Casos de Estudio en Contextos Urbanos Similares

El estudio de casos en contextos urbanos con características semejantes a Yacuambi permite comprender la aplicabilidad de los SUDS en escenarios de escala reducida, con limitaciones técnicas, presupuestarias y topográficas. A diferencia de las grandes metrópolis, donde las intervenciones suelen ser de gran magnitud, en ciudades pequeñas los proyectos deben adaptarse a entornos rurales-urbanos, con recursos más limitados y particularidades geográficas que condicionan el diseño y operación de la infraestructura pluvial.

Caso Joinville, Brasil

En la ciudad tropical de Joinville, Brasil, se llevó a cabo una investigación enfocada en la aplicación de técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID) o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), durante periodos de análisis de 2 y 10 años. El objetivo principal fue mitigar el riesgo de inundaciones urbanas generadas por lluvias intensas. De acuerdo con (Goncalves et al., 2018), mediante el uso de herramientas hidrodinámicas se comprobó que la implementación de estanques de detención, zanjas de infiltración y jardines de lluvia puede reducir el volumen de escorrentía entre un 30 % y 75 %. Estos resultados confirman que los SUDS representan una alternativa eficiente frente a los sistemas de drenaje tradicionales, al favorecer la retención, infiltración y evapotranspiración del agua, mejorando la resiliencia urbana frente a eventos extremos.

Tabla 16: Resultados de la reducción del flujo máximo al implementar LID después del análisis de sensibilidad.

Tipo LID	Flujo máximo en Evento de 10 años (lps)	% Diferencia a la línea base	Flujo máximo en Evento de 2 años (lps)	% Diferencia a la línea base
Jardín de lluvia (profundidad = 0,5 m)	34.54	-16,12%	19.27	-14,32%
Jardín de lluvia (profundidad = 1,0 m)	32.92	-20,06%	18.33	-18,50%
Zanja de infiltración (profundidad = 0,5 m)	33.11	-19,60%	18.47	-17,87%
Zanja de infiltración (profundidad = 1,0 m)	22.21	-46,07%	12.29	-45,35%

Fuente: (Goncalves et al., 2018)

Caso: Cheongju, Corea del Sur

En la ciudad de Cheongju, República de Corea, se desarrolló un modelo de planificación urbana basado en el Desarrollo de Bajo Impacto (LID-DP), con el propósito de integrar los principios de sostenibilidad y gestión pluvial en la organización territorial. El

modelo propuesto por los investigadores establece un conjunto de procesos de planificación distrital que incorporan estándares de diseño LID y métodos de evaluación para medir sus beneficios frente a las prácticas urbanas convencionales. Al aplicarse en un sitio piloto, los resultados demostraron una reducción significativa en la escorrentía superficial y en los contaminantes no puntuales, con mejoras del 102 % en la infiltración, escorrentía superficial, 101%. Además, se incrementó en un 132 % la conservación del entorno natural, lo que evidencia la efectividad del enfoque LID-DP como herramienta de planificación integral. Este caso resalta la relevancia de las técnicas no estructurales, orientadas a la prevención y a la sostenibilidad ecológica, como complemento de las infraestructuras urbanas tradicionales. (Son et al., 2017)

Caso: Aldea de Rattanakosin, Bangkok, Tailandia

En la región periurbana de Bangkok, Tailandia, se evaluó la aplicación de tecnologías de Desarrollo de Bajo Impacto (LID) como estrategia para reducir las inundaciones locales y mejorar la calidad del agua. Mediante el uso de PCSWMM, se modelaron diferentes escenarios que combinaban barriles de recolección de agua de lluvia y celdas de biorretención, los cuales fueron comparados con las condiciones de drenaje existentes. Los resultados mostraron que todos los escenarios LID lograron reducir el volumen de desbordamiento del alcantarillado combinado, disminuir la carga de contaminantes y reducir la duración de las inundaciones superficiales. No obstante, los beneficios variaron según la combinación de soluciones: la instalación aislada de barriles tuvo un efecto limitado (reducciones del 4 al 9 %), mientras que los escenarios combinados con biorretención alcanzaron reducciones mucho más significativas, llegando incluso a eliminar las inundaciones temporales en algunos sectores. Este estudio evidencia que la integración de múltiples soluciones LID puede ser más efectiva que la implementación de medidas aisladas, especialmente en contextos tropicales con lluvias intensas. (James, 2013)

Tabla 17: Resultados del escenario LID.

Ítem	Caso base	Escenario 1a		Escenario 1b		Escenario 2a		Escenario 2b		Escenario 2c	
		(Valor)	% Reducción	(Valor)	% Reducción	(Valor)	% Reducción	(Valor)	% Reducción	(Valor)	% Reducción
Flujo total (10 ³ m ³)	66.6	62.4	6.3	60.0	9.9	52.0	21.9	37.7	43.4	54.42	18.3
Volumen total hacia el vertedero (10 ³ m ³)	67.6	64.1	5.2	61.8	8.6	53.9	20.3	39.7	41.3	56.28	16.7
Duración media de inundación superficial (hrs)	0.7	0.43	38.6	0.4	43.8	0.3	60.3	0.0	100.0	0.33	52.9
Arrastre de contaminantes en subcuencas (kg)											
TSS	3601	3102	13.9	3037	15.7	2655	26.3	2086	42.1	2717	24.5
BOD	1927	1810	6.1	1748	9.3	1525	20.8	1120	41.7	1589	17.6
COD	4239	3983	6.0	3846	9.3	3356	20.8	2465	41.8	3495	17.6
Total, de contaminantes en vertedero (kg)											
TSS	3591	3265	9.1	3207	10.7	2878	19.9	2363	34.2	2937	18.2
BOD	1813	1735	4.3	1676	7.6	1467	19.1	1078	40.5	1530	15.8
COD	3988	3818	4.3	3686	7.6	3228	19.1	2371	40.5	3365	15.6

Fuente: (James, 2013)

Caso Guayaquil, Ecuador

El estudio se desarrolló en la parroquia urbana Febres Cordero, ubicada en la ciudad de Guayaquil, una de las zonas con mayor vulnerabilidad a inundaciones debido a su baja altitud (1–5 m s.n.m.), alta densidad poblacional y predominio de superficies impermeables. En esta área, aproximadamente el 97% del suelo es pavimentado, lo que favorece una

elevada generación de escorrentía superficial durante eventos de lluvia. El análisis consideró el sistema actual de drenaje pluvial y evaluó la incorporación de estrategias de Desarrollo de Bajo Impacto (LID), específicamente calles verdes y barriles de recolección de agua de lluvia, modeladas mediante SWMM. Estas soluciones se implementaron en solo el 1,4% del área total (19,5 ha), y aun así se observó una reducción significativa de la escorrentía, entre 19% y 20% para eventos de corta duración, además de una disminución notable en los puntos de inundación y en el caudal máximo del sistema, demostrando que incluso pequeñas áreas de infraestructura verde pueden mejorar la resiliencia urbana frente a inundaciones. (Quichimbo-Miguitama et al., 2022)

Tabla 18: Resultados de análisis de la escorrentía total de la zona analizada bajo el modo de desarrollo tradicional (TD) y el modo de desarrollo de bajo impacto (LID).

Eventos de lluvia	Duración de lluvia (HH:MM)	Precipitación (mm)	Aporte total (m ³)	Escorrentía total (TD) (m ³)	Escorrentía total (LID) (m ³)	Tasa de reducción TD (%)	Tasa de reducción LID (%)
2	3:20	70	930,481.80	921,858.60	751,766.00	1	20
5	3:20	85	1,142,908.13	1,130,111.38	949,918.38	2	17
10	3:20	99	1,338,533.25	1,317,601.38	1,130,598.50	2	16
25	24:00	188	2,515,853.00	2,436,473.50	2,033,450.25	3	19
50	24:00	218	2,938,373.50	2,845,306.00	2,412,753.00	3	18
100	24:00	253	3,442,607.25	3,320,914.00	2,844,423.00	4	17

Fuente: (Quichimbo-Miguitama et al., 2022)

Tabla 19: Resultados de rendimiento del sistema en modo TD y LID para diversos períodos de recurrencia.

Período de retorno (años)	Nodos con desborde TD	Nodos con desborde LID	Tasa de reducción (%)	Q. Máx. desborde (m ³ /s) TD	Q. Máx. desborde (m ³ /s) LID	Tasa de reducción (%)
2	428	311	27	8.8	8.1	7
5	581	448	23	9.4	9.2	2
10	656	568	13	9.7	9.5	3

25	773	741	4	9.8	9.8	0
50	849	826	3	10.2	10.1	1
100	924	912	1	10.3	10.3	0

Fuente: (Quichimbo-Miguitama et al., 2022)

Tabla 20: Resultados de rendimiento del sistema en modo TD y LID para diversos períodos de recurrencia.

Período de retorno (años)	Sistema de inundación máxima (m³/s) TD	Sistema de inundación máxima (m³/s) LID	Tasa de reducción (%)	Escorrentía Máxima (m³/s) TD	Escorrentía Máxima (m³/s) LID	Tasa de reducción (%)
2	206	160	27	279	221	21
5	293	231	23	350	286	18
10	362	293	13	414	345	17
25	434	383	4	518	442	15
50	549	468	3	612	524	14
100	653	566	1	723	621	14

Fuente: (Quichimbo-Miguitama et al., 2022)

Normativa internacional

EPA Stormwater Management Guidelines (Estados Unidos): Ha desarrollado un marco normativo robusto para el manejo de las aguas pluviales urbanas. Entre sus principales aportes se encuentran las Stormwater Management Guidelines y el Storm Water Management Model (SWMM), herramientas que establecen lineamientos técnicos para el control de la escorrentía superficial, el cumplimiento de la Clean Water Act y la protección de la calidad del agua en cuerpos receptores. Estas guías promueven prácticas de desarrollo de bajo impacto (Low Impact Development, LID), entre las que destacan los jardines de lluvia, bioswales, bioretenciones, sistemas de almacenamiento de aguas pluviales y pavimentos permeables. Además, la EPA ha impulsado la adopción de normativas estatales y municipales que obligan a considerar infraestructura verde en

proyectos de urbanización, como parte de los programas de permisos de descarga de aguas pluviales (NPDES). Así, las guías de la EPA se han convertido en un referente técnico internacional, no solo por su rigor metodológico, sino también porque han logrado influir directamente en la implementación de soluciones sostenibles en miles de ciudades estadounidenses (Epa et al., 2015)

Normativa ecuatoriana

La Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), que funcionó como autoridad rectora del recurso hídrico en Ecuador hasta su absorción parcial por el MAATE, elaboró lineamientos técnicos fundamentales para el manejo de cuencas, drenaje urbano y control de escorrentías. Sus regulaciones establecieron procedimientos para el cálculo de caudales de diseño, la delimitación de áreas de protección hídrica y la gestión de sistemas de alcantarillado pluvial en ciudades y poblaciones intermedias. Aunque en la actualidad la SENAGUA dejó de operar como entidad independiente, muchos de sus lineamientos continúan siendo utilizados como referencia obligatoria en proyectos de infraestructura hidráulica y urbana. En particular, sus aportes sobre manejo integral de cuencas y control de inundaciones constituyen un precedente normativo importante para vincular la gestión del agua con el ordenamiento territorial y la planificación urbana sostenible. (SENAGUA, 2010)

Ordenanzas municipales: El Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) del cantón Yacuambi constituye el principal instrumento de planificación territorial a nivel local. En este documento se establecen lineamientos para la organización del crecimiento urbano, la protección de áreas de valor ambiental y la provisión de equipamientos e infraestructuras básicas. Entre los aspectos ambientales considerados, el PUGS incorpora indicadores como el Índice Verde Urbano (IVU), que busca garantizar una adecuada dotación de áreas verdes por habitante como parte de la estrategia de sostenibilidad urbana.

No obstante, a pesar de reconocer la importancia de los espacios verdes, el PUGS no contempla de manera específica la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje

Sostenible (SUDS) ni de otras soluciones de drenaje pluvial con enfoque de sostenibilidad. En su contenido no se hace referencia al manejo integral de la escorrentía, a técnicas de infiltración ni a la incorporación de infraestructura verde orientada al control de aguas pluviales. Esta omisión representa un vacío relevante, considerando que la urbanización acelerada del cantón ha incrementado los niveles de impermeabilización del suelo y, con ello, la vulnerabilidad frente a inundaciones y deslizamientos.

Desde una perspectiva crítica, la ausencia de lineamientos normativos sobre drenaje sostenible en el PUGS limita la capacidad de este instrumento para enfrentar los retos derivados del cambio climático y la expansión urbana. En este sentido, la presente investigación busca aportar una propuesta técnica de SUDS que complemente al PUGS, ofreciendo un modelo de gestión pluvial alineado con los principios de sostenibilidad, resiliencia y adaptación climática. De esta manera, se busca no solo cubrir una deficiencia en la planificación actual, sino también generar un referente metodológico aplicable a otros cantones con características similares

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS (Metodología de la Investigación)

Como se explicó en el Planteamiento del Problema, la parroquia 28 de Mayo en el cantón Yacuambi enfrenta una urbanización creciente y poco planificada, lo cual ha incrementado la impermeabilización del suelo y, con ello, la escorrentía superficial. Esta situación agrava el riesgo de inundaciones en las zonas bajas del centro urbano, mientras que, en las zonas de pendiente, la escorrentía no controlada incrementa la saturación de los taludes y la probabilidad de deslizamientos. A pesar de esta problemática, no se cuenta con un sistema de drenaje urbano sostenible que mitigue adecuadamente ambos riesgos. Además, como se evidenció en el PUGS 2023, existe una proyección de crecimiento poblacional, lo cual podría intensificar los impactos si no se implementan soluciones alternativas integradas en el corto plazo.

En este contexto, se considera que la urbanización acelerada en la zona urbana del cantón Yacuambi generará, en el escenario de análisis futuro, un incremento significativo en la impermeabilización del suelo. Esta condición proyectada aumentará los coeficientes de escorrentía y ocasionará que los caudales máximos superen la capacidad del sistema de drenaje existente, produciendo anegamientos recurrentes en las zonas planas del casco urbano. Este comportamiento será evaluado mediante la modelación hidrológica desarrollada en la presente investigación.



Figura 23: Acumulación de agua en la zona céntrica de Yacuambi durante una lluvia intensa.

Fuentes: Fuente: Periódico "El Chaski" (2024)

A su vez, en los sectores con pendiente, el escurrimiento superficial sin control se infiltra de manera desordenada, saturando los taludes e incrementando la presión intersticial, lo que eleva el riesgo de deslizamientos, como lo evidencian los datos del mapa en el anexo 3 de susceptibilidad a movimientos en masa del PUGS.

Aspectos Relevantes

Para la implementación de soluciones sostenibles en el sistema de drenaje pluvial urbano de la cabecera cantonal de Yacuambi, es fundamental partir de un análisis detallado de la información técnica existente. Entre los elementos clave se incluyen los planos de redes de drenaje pluvial existente, esta información no solo permite identificar las condiciones actuales del sistema y evaluar su eficiencia hidráulica, sino también detectar limitaciones o deficiencias que requieran ser corregidas mediante soluciones sostenibles. Asimismo, resulta esencial considerar los planes de desarrollo urbano y de ordenamiento territorial vigentes, ya que permiten alinear la propuesta con la planificación municipal. Otro aspecto importante es la topografía de la zona, caracterizada por pendientes marcadas en ciertas áreas y sectores más planos en el centro urbano. Esta variabilidad en el relieve influye directamente en la generación y dirección de la escorrentía superficial, la evaluación técnica resulta determinante para seleccionar las ubicaciones estratégicas donde implementar unidades de drenaje urbano sostenible (SUDS), minimizando impactos y optimizando la captación y gestión del caudal pluvial.

Base legal

El artículo 37 de la Constitución del Ecuador (2008) reconoce el saneamiento ambiental del agua como un derecho y deber ciudadano, mientras que el artículo 79 enfatiza la necesidad de preservar todas las formas de vida en un ambiente sano, libre de contaminación y ecológicamente equilibrado. Estos principios se retoman en la normativa técnica de SENAGUA, la cual establece lineamientos para la planificación y gestión adecuada de las infraestructuras hidráulicas en el territorio (SENAGUA, 2010)

El desarrollo de la presente propuesta se sustenta en el marco legal ecuatoriano vinculado a la gestión sostenible del territorio. La Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (Asamblea Nacional del Ecuador, 2016) establece en su artículo 5 principios fundamentales como la sostenibilidad, la equidad territorial, la coherencia y el derecho a un hábitat seguro. Dichos principios orientan la planificación hacia soluciones que protejan el ambiente, garanticen la seguridad ciudadana y promuevan el uso racional de los recursos naturales. Además, el artículo 10 dispone que el ordenamiento territorial debe basarse en la utilización sostenible de los recursos del territorio, mientras que el artículo 11 asigna a los Gobiernos Autónomos Descentralizados la responsabilidad de delimitar ecosistemas, cuencas y zonas de protección destinadas a infraestructuras hídricas, viales y de saneamiento. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2016)

De manera complementaria, la Constitución del Ecuador respalda este enfoque al establecer, en sus artículos 395 y 411, el deber del Estado de precautelar los sistemas hídricos, conservar las cuencas y evitar los impactos negativos ocasionados por el uso inadecuado del suelo y la gestión deficiente del agua. Asimismo, el artículo 317 dispone que la gestión de los recursos hídricos debe orientarse hacia la sostenibilidad ambiental y la seguridad de la población (CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, 2008)

En este contexto, la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el área urbana de la parroquia 28 de Mayo se encuentra plenamente justificada, ya que aporta a la gestión sostenible del recurso hídrico urbano, mediante la reducción de la escorrentía superficial y el incremento de la infiltración del agua de lluvia, reduce los caudales pico e incrementa la resiliencia climática del territorio. La propuesta no solo atiende las limitaciones identificadas en la infraestructura de drenaje existente, sino que se ajusta a los lineamientos legales nacionales que exigen un manejo eficiente, precautorio y sostenible del suelo y del agua en zonas urbanas.

3.1 Información base para el análisis del drenaje pluvial

3.1.1 Estudios topográficos

La caracterización topográfica del área de estudio se fundamentó en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), las cuales fueron esenciales para analizar la compleja morfología del cantón Yacuambi. A través del procesamiento de cartografía base, como Modelos Digitales de Elevación (MDE), se determinaron las direcciones de flujo de la escorrentía y se delimitaron las cuencas y subcuencas hidrográficas que inciden en el área. Esta información se complementó con una exhaustiva revisión documental de estudios previos, informes técnicos y la cartografía oficial disponible del GAD Cantonal.

Para la recopilación de información fundamental, se recurrió principalmente al Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS) del cantón Yacuambi, documento técnico que constituyó la fuente primaria de datos para esta investigación. De este plan se extrajo cartografía temática esencial, incluyendo planos catastrales, mapas de pendientes, cobertura vegetal y uso actual del suelo. Esta información fue clave para comprender la dinámica territorial y sirvió como base para todos los análisis geospaciales posteriores, asegurando que el diagnóstico y la propuesta de soluciones sostenibles que se ajusten a la realidad y a la planificación oficial del cantón.

Adicionalmente, se utilizó información técnica del sistema de alcantarillado existente proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Yacuambi, incluyendo cotas, trazos y características hidráulicas de la red actual. Estos datos fueron empleados exclusivamente como insumo de referencia para el análisis de desempeño y la identificación de déficits en la capacidad de drenaje.

El aporte original de la presente investigación radica en la actualización de la modelación hidrológica mediante curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF) elaboradas para un período de retorno de 25 años, así como en la evaluación y propuesta

de medidas sostenibles (SUDS) orientadas a reducir caudales, escorrentía y optimizar el funcionamiento del sistema de drenaje urbano.

Como parte de la fase de diagnóstico, se realizó un reconocimiento visual del área de estudio para contextualizar y validar la información obtenida de las fuentes documentales. Estas visitas permitieron realizar observaciones directas sobre las características de la zona urbana de Yacuambi, identificando puntos críticos de anegamiento, el estado actual de la infraestructura de drenaje pluvial y las condiciones generales de cobertura del suelo. Este trabajo de campo fue fundamental para interpretar correctamente los datos cartográficos y asegurar que el análisis posterior reflejara fielmente las condiciones reales del territorio.

3.2 Sectorización del Área de Estudio

La delimitación del área de estudio corresponde a la zona urbana principal de la parroquia 28 de mayo, ubicada en el cantón Yacuambi. Esta zona fue seleccionada por concentrar la mayor densidad poblacional y actividad urbana dentro del territorio parroquial. El área urbana objeto de análisis comprende un total de 18.84 hectáreas, abarcando los sectores consolidados donde se evidencian mayores problemas relacionados con el manejo de aguas pluviales. La Figura 24 muestra la ubicación y los límites de esta zona prioritaria, la cual ha sido definida para el desarrollo de propuestas técnicas sostenibles en drenaje pluvial urbano.

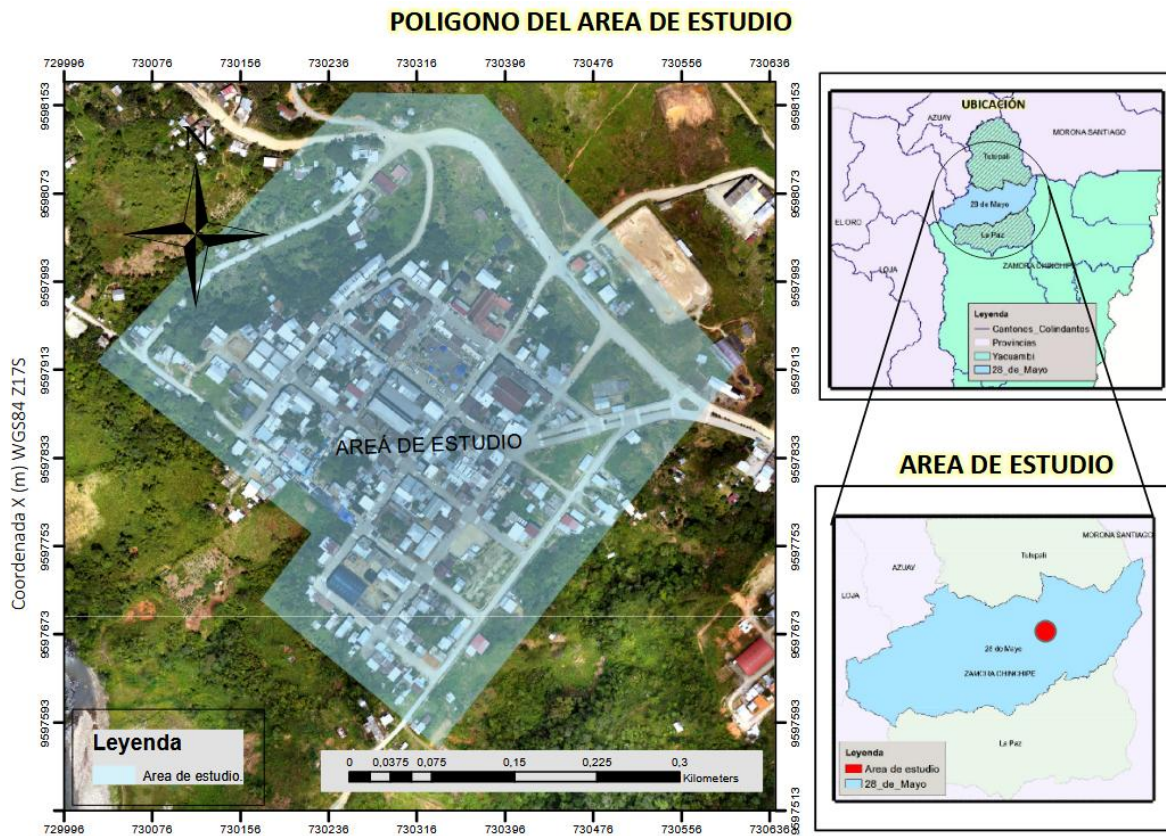


Figura 24: Polígono del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

También se analizó a las subcuencas hidrográficas más cercanas a la zona de estudio, que son la subcuenca 18 de Noviembre y la subcuenca Nueva Vida, son de gran importancia ya que cumplen un papel clave como colectores naturales de escorrentía, pues concentran y dirigen los flujos de agua desde el área urbana. Reconocer su presencia y delimitación es fundamental, ya que condicionan tanto la dinámica de acumulación de aguas lluvias como los posibles puntos de riesgo de inundación, convirtiéndose en un factor determinante para la planificación y el diseño de las soluciones de drenaje pluvial.

Subcuenca hidrográfica 18 de noviembre: A través del uso del software ArcGIS, se llevó a cabo la delimitación y análisis hidrológico de la subcuenca que aporta escorrentía al sector noreste del área urbana de la parroquia 28 de Mayo, figura 25. Esta delimitación se realizó con base en el modelo digital de elevación (DEM), el cual permitió identificar los divisores de aguas naturales y el flujo preferente del agua en condiciones topográficas reales.

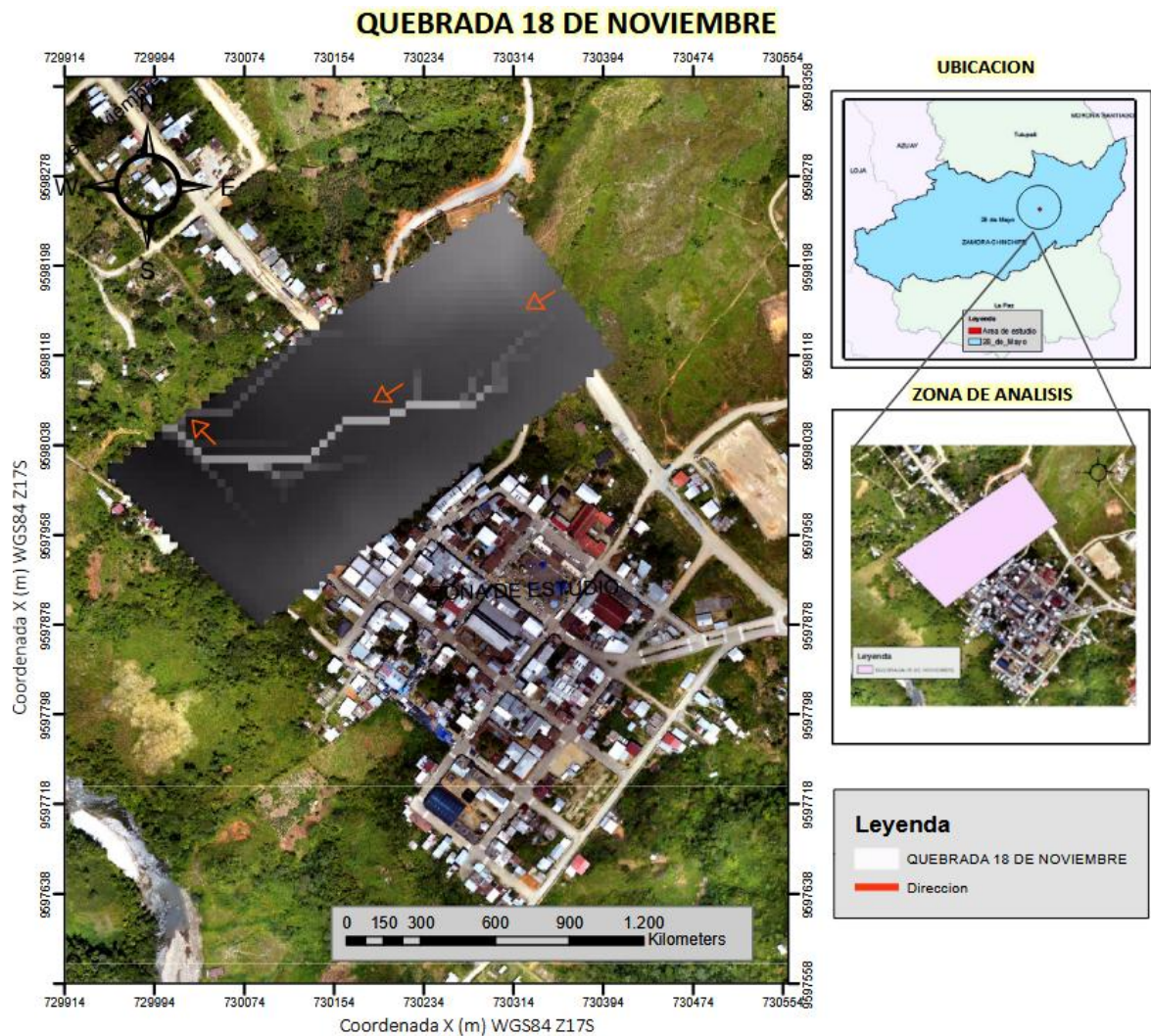


Figura 25: Subcuenca hidrográficas 18 de noviembre, dirección de flujo

Fuente: Elaboración propia

El análisis evidenció que esta subcuenca se encuentra íntegramente dentro del área de influencia del estudio, formando parte del entorno inmediato que drena una parte hacia el núcleo urbano principal. Su caracterización responde a las condiciones topográficas particulares del territorio, donde se presentan pendientes acusadas, algunas superiores al 10 %, y en ciertos sectores alcanzando hasta el 40 %, según lo establecido en el PUGS local. Esta configuración del terreno favorece el escurrimiento superficial un poco lento, lo cual justifica la importancia de considerar esta subcuenca como una unidad clave dentro del diseño del sistema de drenaje pluvial.

Subcuenca hidrográfica nueva vida: Corresponde a un área con alta pendiente, como se observa en la figura 26, identificada como zona de riesgo por deslizamientos anexo 2. Las subcuencas en este sector concentran el escurrimiento desde zonas rurales dispersas hacia la periferia del área urbana. La pendiente acentuada (con tramos que superan el 50%) incrementa la velocidad de escurrimiento y el potencial de arrastre de sedimentos. Esto implica que, en las propuestas SUDS, se deben considerar medidas de control de erosión y estructuras de retención temporal que disminuyan la energía del flujo.

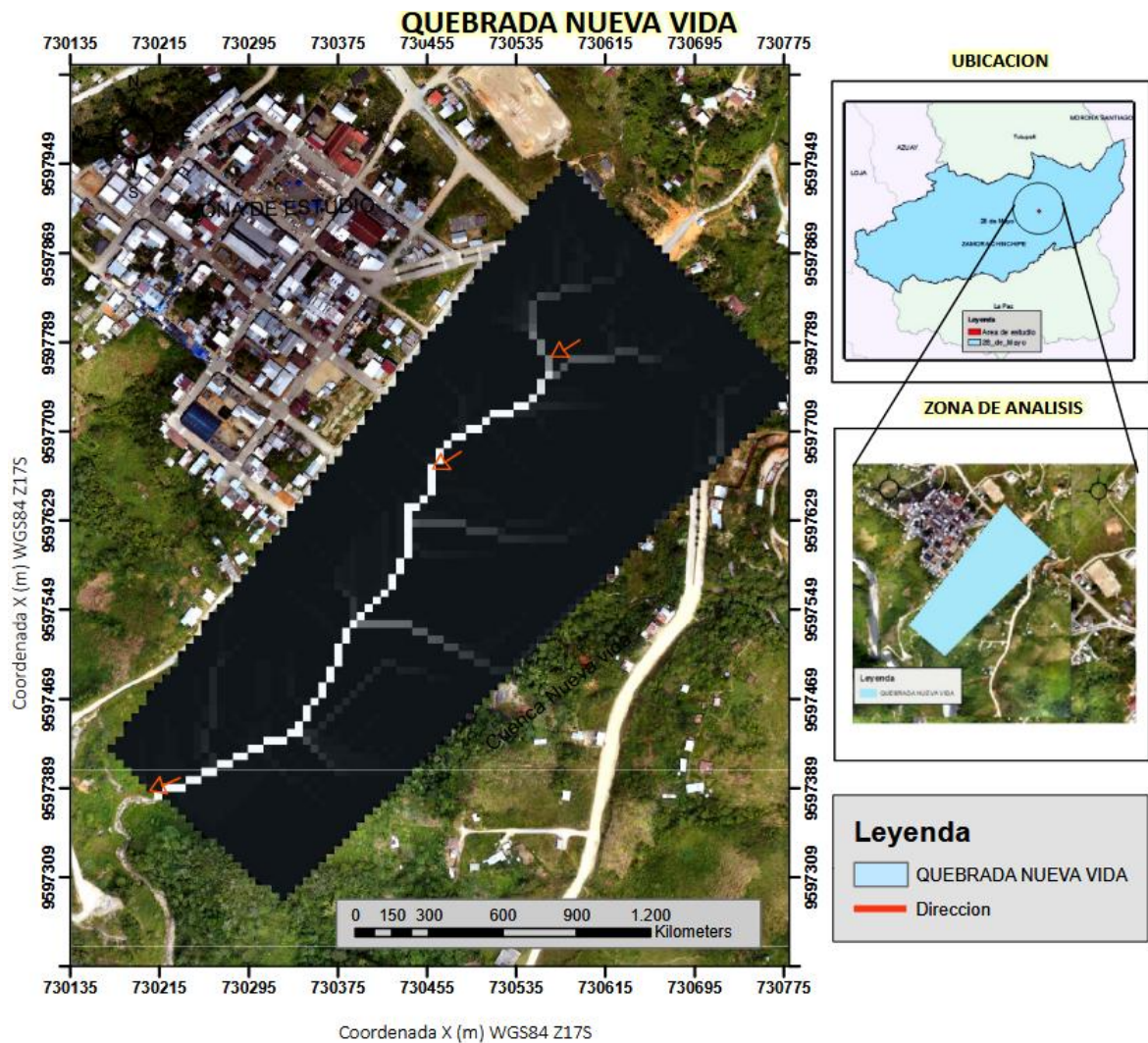


Figura 26. Subcuenca hidrográfica Nueva vida, dirección de flujo

Fuente: Elaboración propia

La subcuenca ubicada en el sector Nueva Vida, es el punto de convergencia de dos de los cuatro sistemas de drenaje pluvial existentes en el área urbana principal. Dada esta condición, se convierte en una zona crítica para el control del escurrimiento superficial y la prevención de riesgos asociados a la acumulación de caudales en eventos intensos de precipitación. Por tanto, el análisis detallado de esta subcuenca permite entender el comportamiento del drenaje en uno de los sectores más vulnerables de la parroquia, garantizando que las soluciones propuestas sean efectivas y seguras.

Subcuenca Oeste: En esta área se ubican sectores altos, donde actualmente se encuentran los tanques de agua potable y donde se proyecta el crecimiento urbano a futuro. El área delimitada presenta pendientes menos del 25% con sectores que alcanzan inclinaciones inferiores y según el plan de usos de suelo, es zona de media peligrosidad. Esta condición topográfica favorece el escurrimiento superficial rápido, por lo que el diseño del sistema de captación y conducción debe considerar estructuras que eviten erosión y acumulación de caudales en puntos críticos, figura 27. Esta zona constituye por estas zonas pasan las quebradas que forman la subcuenca hidrográficas Nueva Vida y 18 de Noviembre.

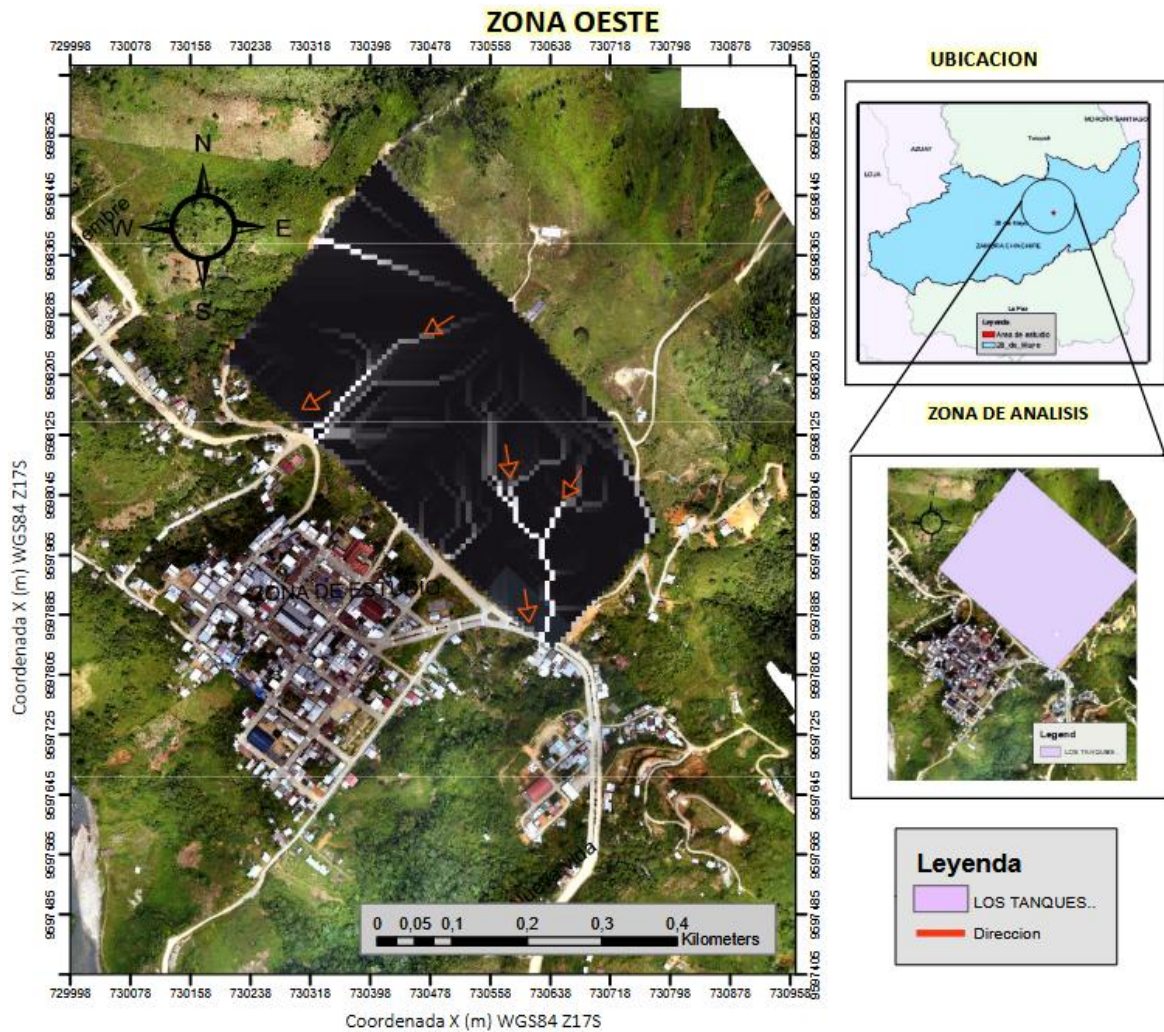


Figura 27: Subcuenca aportante de la zona oeste del área de estudio, dirección de flujo

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 34, el análisis realizado mediante herramientas SIG permitió identificar la conformación natural de la quebrada que drena desde la zona oeste y atraviesa directamente el área urbana de estudio. Este sector presenta pendientes muy bajas en su tramo final, lo que incrementa la probabilidad de acumulación de escorrentía y, en consecuencia, el riesgo de inundaciones. Esta condición coincide con la clasificación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa presentado en el Anexo 3, donde el área se reconoce como zona de riesgo.

Esta delimitación permitió identificar con precisión los sectores que generan escorrentía hacia las partes más bajas del territorio, siendo información fundamental para el análisis del comportamiento sistema de drenaje pluvial actual.

3.3. Redes de drenaje existentes

El centro urbano de la parroquia 28 de Mayo, cabecera cantonal de Yacuambi, cuenta con infraestructura básica compuesta por sistemas de alcantarillado pluvial, alcantarillado sanitario y red de agua potable, según lo establece el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS, 2023). Sin embargo, la cobertura y operatividad de estos sistemas presentan limitaciones importantes que afectan la gestión adecuada de las aguas superficiales únicamente el 40,50 % de los hogares dispone de conexión a un sistema de alcantarillado sanitario, mientras que el 59,50 % restante continúa utilizando soluciones inadecuadas como letrinas, pozos ciegos y descargas directas hacia los ríos y quebradas circundantes. También se tiene la red de agua potable y la red de alcantarillado pluvial como se observa en el anexo 1. (PUGS, 2023)

3.4 Superficie de rodadura

La red vial dentro del área urbana de Yacuambi presenta una heterogeneidad de superficies que influye directamente en la generación de escorrentía superficial. Según la información cartográfica del Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS 2023-2035), la infraestructura vial se clasifica en tres tipologías principales, tal como se ilustra en el mapa de la figura 28.

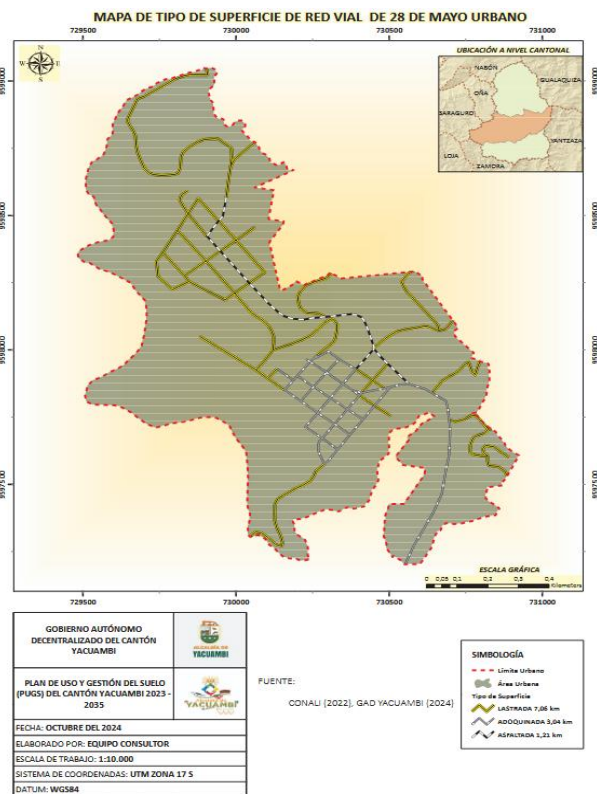


Figura 28. Tipo de superficie de red vial

Fuente: (PUGS, 2023)

Vías Lastradas: Constituyen la mayor parte de la red vial, con una longitud total de 7.06 km. Estas superficies no pavimentadas, compuestas por material granular compactado, presentan un coeficiente de escorrentía intermedio y son susceptibles a la erosión y al arrastre de sedimentos durante eventos de lluvia intensa.

Vías Adoquinadas: Representan una porción significativa de las vías consolidadas, sumando 3.04 km. El adoquín, junto con sus juntas de arena o mortero, crea una superficie semipermeable que, si bien reduce la infiltración en comparación con el lastre, aún puede permitir una pequeña fracción de percolación de agua.

Vías Asfaltadas: Componen una longitud de 1.21 km y corresponden a las vías con mayor grado de consolidación. Estas superficies son prácticamente impermeables, lo que resulta en coeficientes de escorrentía muy elevados, generando mayores volúmenes y velocidades de flujo superficial que deben ser gestionados por el sistema de drenaje.

3.5 Uso del área de cuencas hidrográficas aportantes

Para comprender la naturaleza de la escorrentía que llega a la zona urbana de la cabecera cantonal, es indispensable analizar los usos de suelo de las áreas circundantes que actúan como cuencas de aporte. A diferencia de entornos llanos donde las áreas de influencia pueden ser extensas y estar limitadas por grandes infraestructuras, en Yacuambi la topografía montañosa define cuencas de aporte más directas y con pendientes pronunciadas, cuya cobertura vegetal juega un rol fundamental en la respuesta hidrológica.

De acuerdo con el mapa de "Uso de Suelo del Cantón Yacuambi" (PUGS, 2023), las áreas que rodean inmediatamente el perímetro urbano se caracterizan por los siguientes usos:

Bosque Nativo y Vegetación Arbustiva: Gran parte de las laderas que flanquean el área urbana están cubiertas por vegetación nativa y bosques protectores. Estas zonas, que según el PUGS representan el 58.47% y 0.23% del suelo cantonal respectivamente, son cruciales para la regulación hídrica, ya que su cobertura vegetal y la capa orgánica del suelo favorecen la infiltración y reducen la velocidad de la escorrentía, mitigando la erosión. (PUGS, 2023)

Suelo de Uso Agropecuario: Se identifican también áreas destinadas a pastos y cultivos, que constituyen el 21.19% del territorio cantonal. Estas zonas, dependiendo de las prácticas de manejo, pueden tener coeficientes de escorrentía más elevados en comparación con el bosque nativo, aportando mayores volúmenes de agua y sedimentos a la red de drenaje urbana. (PUGS, 2023)

Zonas de Riesgo y Protección: Es importante destacar que el PUGS identifica áreas de protección en las márgenes de los ríos y quebradas, así como zonas con alta susceptibilidad a movimientos en masa. La escorrentía proveniente de estas áreas no solo representa un riesgo hidráulico (inundación), sino también un riesgo geotécnico, ya que

puede saturar taludes y provocar deslizamientos que afecten directamente al núcleo urbano. (PUGS, 2023)

Propiedades del suelo de la parroquia 28 de mayo

El suelo de la cabecera cantonal de Yacuambi, situado en un valle interandino de topografía compleja, está compuesto principalmente por depósitos de origen aluvial y coluvial. Las observaciones del área y la revisión de la cartografía geotécnica del Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS) del cantón confirman la predominancia de suelos granulares finos y limosos.

Según la información de Clasificación de suelos incluido en el PUGS, la composición del suelo en la zona de estudio es la siguiente:

- **Arenas Limosas (SM):** Corresponden al tipo de suelo dominante en la mayor parte del área urbana. Estos suelos presentan una permeabilidad moderada, lo que los hace aptos para la implementación de técnicas de infiltración, aunque su componente limoso los vuelve susceptibles a la erosión por escorrentía.
- **Limos de Baja Plasticidad (ML):** Se localizan de manera más puntual, generalmente en las zonas de menor pendiente y en las áreas de deposición cercanas a los ríos. Su baja permeabilidad es un factor clave a considerar, ya que puede contribuir a la saturación del terreno y a la generación de escorrentía superficial.

3.6 Determinación de subcuencas urbanas

Para llevar a cabo la delimitación de las áreas para cada subcuenca que analizara del área urbana del cantón Yacuambi, se utilizaron las curvas de nivel que fueron gentilmente proporcionadas por el Municipio. A partir de esta información, se generó un modelo digital de elevación (DEM), el cual sirvió como base para aplicar las herramientas del módulo Hydrology del software ArcGIS. Este procedimiento permitió identificar las

divisoria natural del terreno y definir las cuencas aportantes dentro del polígono urbano seleccionado como zona de estudio como se observa en la figura 29. Asimismo, se lograron determinar los puntos donde se concentra y descarga el escurrimiento superficial.

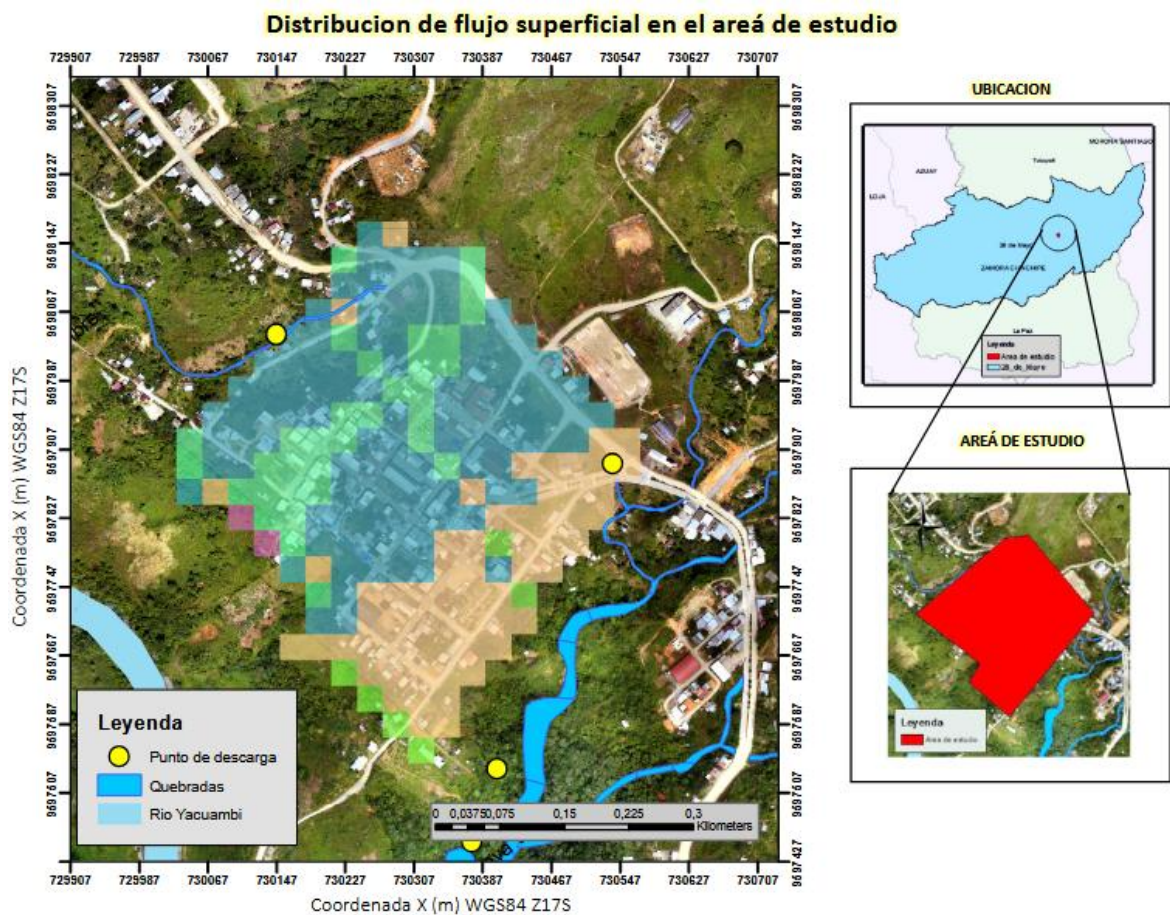


Figura 29: Mapa de dirección del flujo superficial y áreas de contribución hídrica.

Fuente: Elaboración propia a partir de (PUGS, 2023)

Estos resultados fueron validados mediante visitas a campo, en las que se corroboró la ubicación de dichos puntos con base en las observaciones directas y en los testimonios de los habitantes del sector. La figura 30 que se presentan a continuación muestra los resultados obtenidos durante este proceso.

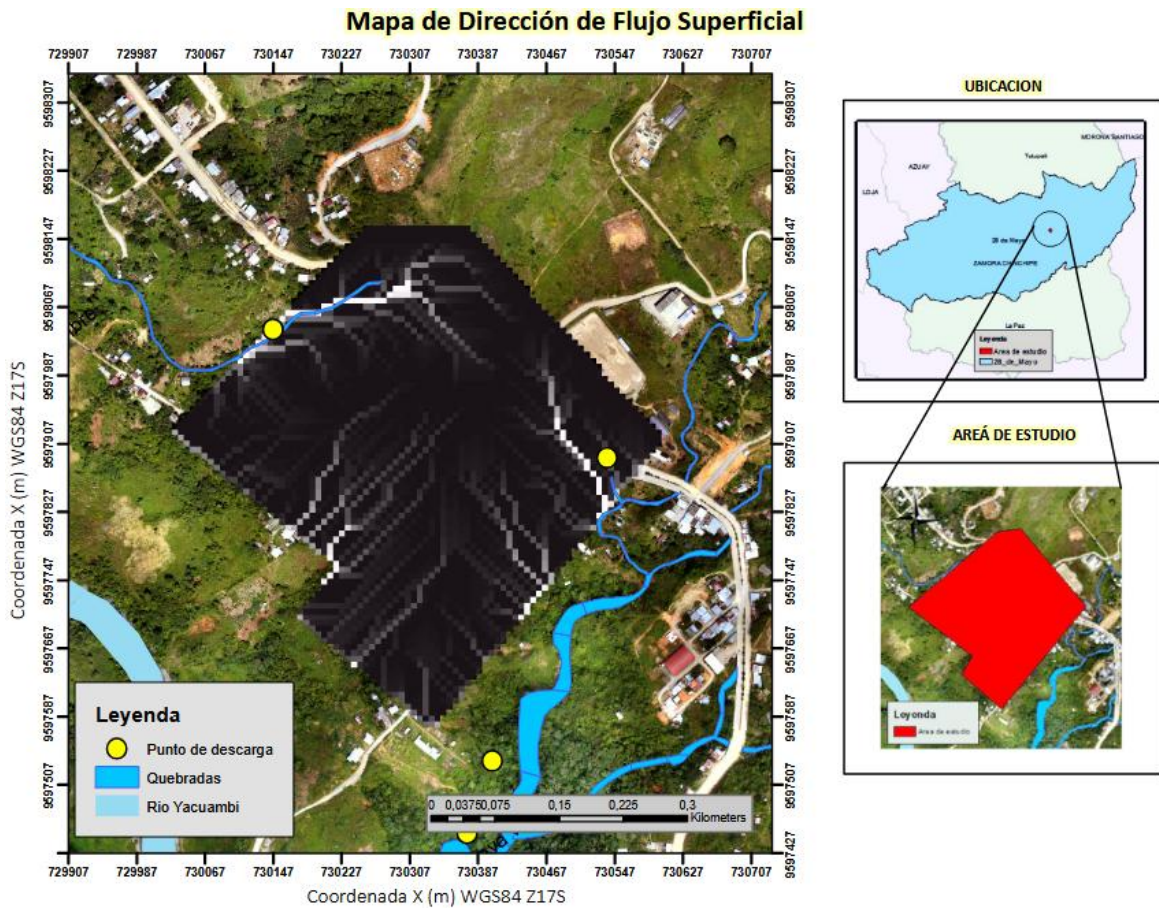


Figura 30: Dirección de flujo superficial y puntos de descarga identificados en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de (PUGS, 2023)

De acuerdo con los resultados obtenidos en ArcGIS (figura 30), la delimitación de las subcuencas urbanas permitió identificar varios puntos principales de descarga dentro del área de influencia de la zona de estudio.

Este análisis adicional consistió en subdividir las manzanas urbanas mediante líneas auxiliares (diagonales), con el fin de distribuir de forma más precisa el área de aporte de escorrentía que incide sobre cada calle. Posteriormente, se determinaron la dirección del flujo y los puntos de acumulación y descarga más representativos, lo que permitió comprender con mayor detalle el comportamiento hidrológico dentro de la zona urbana. Así mismo se analizó como está funcionando la red actual, como observa en la figura 39, los diferentes puntos donde desembocan la red actual.

El procedimiento se desarrolló tomando como referencia tanto el plano catastral figura 31 de la cabecera urbana del cantón Yacuambi como las curvas de nivel procesadas en el módulo Hydrology de ArcGIS. De esta manera, se garantizó una delimitación más ajustada a la realidad física del terreno y a las condiciones de la infraestructura existente.

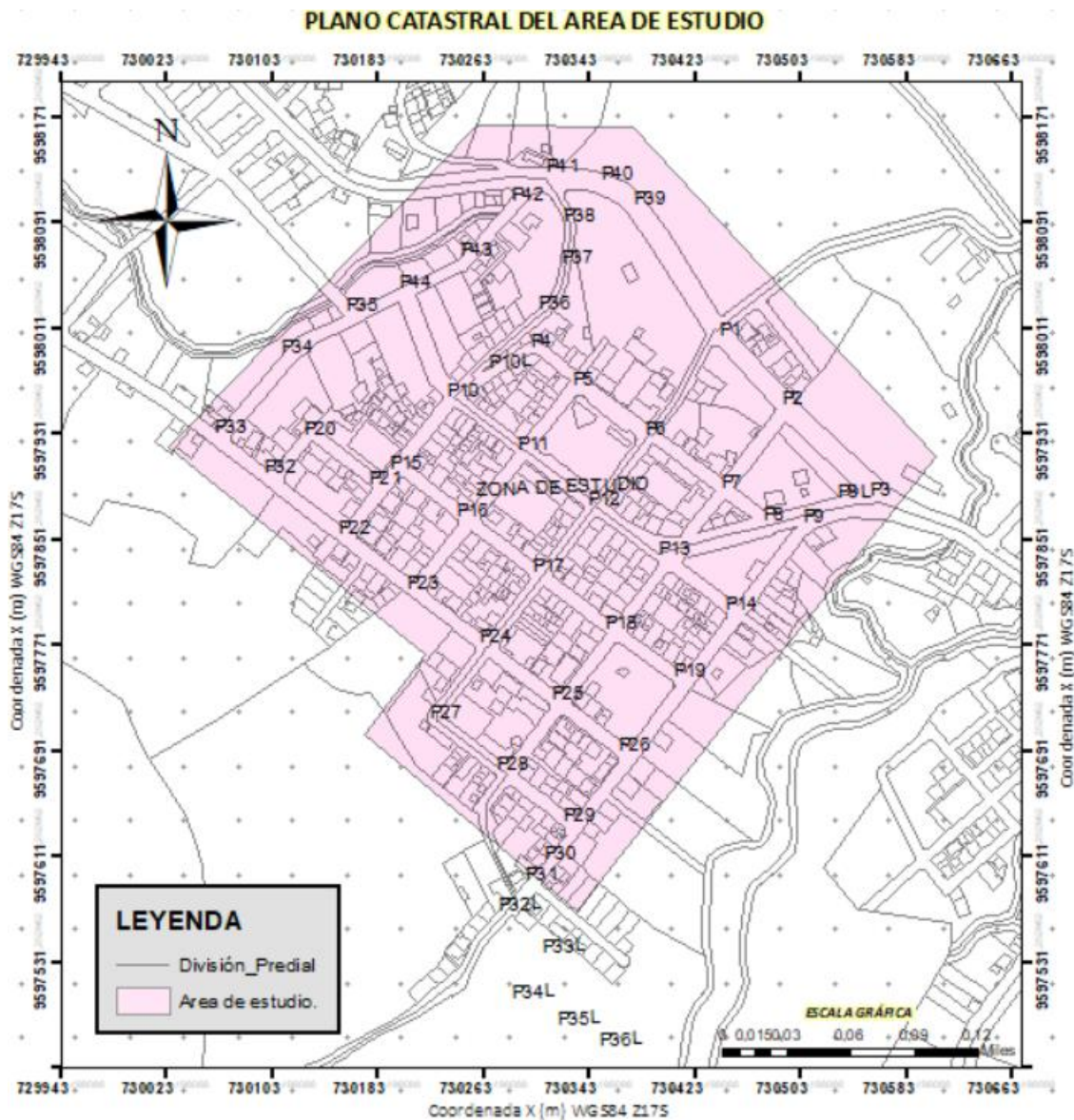


Figura 31. Plano catastral del centro urbano 28 de mayo

Fuente: Elaboración propia

Tramo	Cota de terreno	Tramo	Cota de terreno
P1	1145.57	P24	1124.96
P2	1137.07	P25	1124.23
P3	1127.93	P27	1116.62
P4	1145.08	P28	1115.55

P7	1139.34	P29	1112.42
P8L	1128.12	P30	1108.93
P8	1131.06	P32	1118.883
P9	1128.23	P32L	1102.43
Pl10	1143.34	P33L	1102.26
P10	1141.97	P33	1114.05
P11	1142.49	P34	1105.53
P12	1140.86	P35	1105.72
P14	1121.78	P36	1135.19
P15	1136.1	P37	1132.62
P16	1133.6	P38	1130.07
P17	1133.01	P39	1138.94
P18	1130.53	P40	1134.67
P20	1130.8	P41	1127.31
P21	1128.507	P42	1121.53
P22	1125.9	P43	1116.68
P23	1124.17	P44	1111.85
Psalida 2	1078	PSalida 1	1100
Psalida 4	1024	PSalida 3	1124

Figura 32. Cotas de puntos utilizados para determinar las subcuencas.

Fuente: Elaboración propia

3.8 Estudios hidrológicos

La información expuesta en el presente apartado corresponde a los resultados que se han obtenido durante el desarrollo, los cuales se generaron a partir del análisis de datos oficiales proporcionados por el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) del cantón Yacuambi y del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). A ello se suma la valiosa información obtenida mediante visitas de campo realizadas en el área urbana de la parroquia 28 de Mayo, que permitieron comprender de manera directa las condiciones físicas, hidrológicas y sociales del entorno, identificando así los principales problemas de escorrentía y zonas críticas. Este enfoque combinado de fuentes institucionales y observación directa fue fundamental para formular propuestas técnicas contextualizadas a la realidad del territorio.

Caudal de análisis hidrológico: Se empleó el método racional, cuya expresión se presenta en la ecuación (4). Este método requiere conocer tres parámetros fundamentales: el coeficiente de escorrentía, el área de drenaje y la intensidad de precipitación.

Coefficiente de escorrentía: Se determinó un valor promedio a partir de los dos coeficientes presentados en la Tabla 22, considerando las condiciones físicas y urbanas propias de la zona de estudio. Este procedimiento busca obtener un valor representativo y realista del comportamiento de la escorrentía, de modo que el diseño del sistema pluvial sea eficiente y conserve un enfoque preventivo frente a posibles eventos de lluvia intensa.

Tabla 21. Coeficientes de escorrentía que se analizó según la ocupación del suelo del área de estudio

Tipo de superficie	Coefficiente
Zonas comerciales	0.9
Desarrollos residenciales multifamiliares con bloques contiguos y predominio de jardines.	0.75
Desarrollo residencial unifamiliar con casas contiguas y predominio de jardines	0.55
Áreas residenciales con predominio de zonas verdes y cementerios tipo jardines.	0.3
Laderas protegidas con vegetación	0.3

Fuente: Elaborado partir de (López, 1995)

El coeficiente de escorrentía utilizado en este estudio fue de 0.56, calculado como promedio de los distintos tipos de superficie previamente identificados en la zona de análisis. Este valor, al ser adimensional, representa una estimación razonable del comportamiento del terreno frente a la lluvia, y permite reflejar de manera más realista la proporción del agua que se transforma en escorrentía. Esta elección contribuye a diseñar un sistema más eficiente y ajustado a las condiciones reales del entorno urbano.

$$Coeficiente = \frac{0.9 + 0.75 + 0.55 + 0.3 + 0.3}{5} = 0.56$$

El cálculo se realizó ponderando el producto entre cada coeficiente y su área respectiva, y dividiendo entre el área total del sector analizado (18.84 ha). Como resultado, se obtuvo un coeficiente de escorrentía promedio de 0.56, lo cual indica que aproximadamente el 56 % del agua precipitada sobre esta zona se convierte en escorrentía superficial. Este valor refleja un comportamiento típico de zonas con urbanización

intermedia, presencia de infraestructura vial pavimentada y cierta cobertura vegetal, y será empleado como insumo clave en la modelación hidráulica del sistema de drenaje urbano proyectado.

Área de drenaje (A): Aunque el área total de aporte para el sistema de alcantarillado pluvial en la zona de estudio es de 18.84 hectáreas, el diseño se desarrolla considerando de manera individual las áreas correspondientes a cada tramo o subcuenca, como se observa en el anexo 5.

Periodo de retorno: Se ha considerado un periodo de retorno de 25 años, en concordancia con la NEC-SE-HM, que recomienda este valor mínimo para zonas urbanas. Esta elección busca garantizar un adecuado desempeño hidráulico frente a lluvias de moderada a alta intensidad, considerando las condiciones del centro urbano de la parroquia 28 de Mayo (cantón Yacuambi), y contribuir así a la protección de la infraestructura y la población ante posibles inundaciones.

La intensidad (I): Se calculo utilizando las ecuaciones proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), específicamente las presentadas en la página 277 del estudio de intensidades máximas. Dichas ecuaciones fueron desarrolladas a partir del análisis de registros históricos de la estación M0502 – El Pangui, seleccionada por contar con una serie de datos continua y representativa para la zona de estudio.

Las intensidades obtenidas para distintos periodos de retorno y tiempos de duración se resumen en la Tabla 23, y constituyen un insumo determinante para calcular los caudales de diseño de escorrentía en el análisis hidrológico.

Tabla 22. Tabla de intensidades - Tiempo de duración

Intensidades para diferente periodo de duración y retorno								
		2.33	2.95	3.37	3.89	4.18	4.67	IdTR
Minutos	Tr	2	5	10	25	50	100	Años
		5	84.19	106.59	121.76	140.55	151.03	168.73

10	66.33	83.98	95.93	110.73	118.99	132.94
15	57.69	73.04	83.44	96.32	103.50	115.63
20	52.26	66.16	75.58	87.24	93.75	104.74
25	48.39	61.27	70.00	80.80	86.82	97.00
30	45.45	57.55	65.74	75.88	81.54	91.10
35	43.11	54.58	62.35	71.97	77.33	86.40
40	41.17	52.13	59.55	68.73	73.86	82.52
45	39.54	50.06	57.18	66.01	70.93	79.24
50	37.13	47.01	53.71	61.99	66.62	74.42
55	34.36	43.50	49.69	57.36	61.64	68.86
60	32.01	40.52	46.29	53.43	57.42	64.15
120	18.19	23.03	26.31	30.37	32.64	36.46
360	7.43	9.41	10.75	12.41	13.33	14.89
1440	2.40	3.04	3.47	4.01	4.31	4.81

Fuente: Elaboración propia

Curvas IDF: Las intensidades de precipitación se obtuvieron aplicando las ecuaciones proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), específicamente las incluidas en la página 277 del estudio de intensidades máximas. Estas ecuaciones se aplicaron a la estación pluviométrica M0502 – El Panguí, seleccionada por contar con una serie continua de datos y representar adecuadamente las condiciones climáticas de la zona de estudio.

A partir de las intensidades registradas se construyeron las curvas IDF mostradas en la Figura 42, que explican cómo varía la intensidad de la lluvia según su duración y su frecuencia de ocurrencia.

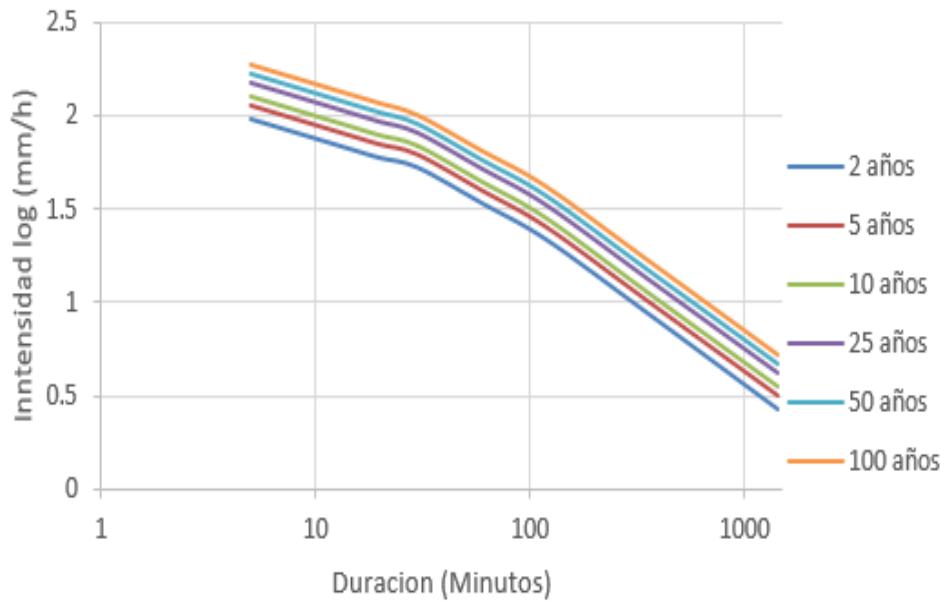


Figura 33. Curvas IDF obtenidas a partir del ajuste estadístico de precipitaciones máximas mediante el método de Gumbel, aplicado a datos registrados por el INAMHI.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la tabla que sintetiza las intensidades máximas correspondientes a un período de retorno de 25 años, junto con el gráfico de las curvas IDF obtenidas a partir del análisis de los registros históricos de precipitación de la estación evaluada.

Tabla 23. Valores de intensidad máxima de lluvia asociados a un período de retorno de 25 años.

Tiempo de duración (min)	Intensidad (mm/h) 25 años
5	140.55
10	110.73
15	96.32
20	87.24
25	80.80
30	75.88
35	71.97
40	68.73
45	66.01

50	61.99
55	57.36
60	53.43

Fuente: elaboración propia

Cálculo del caudal de análisis hidrológico: Se utilizó el método racional, utilizando la ecuación correspondiente que relaciona el coeficiente de escorrentía, el área de aporte y la intensidad de lluvia. Las estimaciones de cada variable se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 24. Valores para la obtención de caudal de diseño, mediante el método racional

DESCRIPCION	VALOR	UNIDAD
Coeficiente de escorrentía	0.56	adimensional
Área de estudio	18.84	Ha
Intensidad de lluvia	Varios	mm/h

Fuente: Elaboración propia

$$Q = 2.778 * 0.56 * I * 18.84$$

Aplicación del método racional para el análisis hidrológico: Los cálculos correspondientes al periodo de retorno adoptado (25 años) se desarrollaron aplicando el método racional, cuyo detalle se presenta en el Anexo 5. Este análisis permitió estimar los caudales máximos generados en la zona de estudio y constituyó un insumo fundamental para la evaluación del sistema de drenaje existente y la posterior propuesta de soluciones sostenibles mediante SUDS.

- **Análisis hidrológico del drenaje pluvial existente.**

Periodo de diseño: De acuerdo con lo establecido en la normativa ecuatoriana, se adoptó un periodo de diseño de 25 años, considerando la proyección adecuada para infraestructuras de saneamiento en zonas urbanas.

Población: Para la proyección poblacional futura, se empleó un modelo de análisis matemático que permite estimar el crecimiento sin requerir necesariamente datos

históricos, siempre que se disponga de información actual. En este sentido, se tomó como base el dato más reciente de la parroquia 28 de mayo centro, perteneciente al cantón Yacuambi, cuya población actual es de 1348 habitantes, según los registros disponibles.

Para la estimación de la población futura, se utilizó el modelo de crecimiento geométrico, el cual requiere variables como la población inicial, el coeficiente de incremento anual y el periodo de diseño. Estos parámetros son aplicados en la ecuación correspondiente al crecimiento poblacional (Ecuación 11).

En este caso, la zona de estudio se encuentra ubicada en la región Amazónica del Ecuador, específicamente en el cantón Yacuambi, parroquia 28 de Mayo. De acuerdo con lo establecido en la Tabla 7, el coeficiente de incremento geométrico recomendado para esta región es del 1.5 anual. como población inicial se considera el valor actual de 1.742 habitantes, y se proyecta a un periodo de diseño de 25 años, con el objetivo de dimensionar adecuadamente el sistema de alcantarillado frente a las demandas futuras.

$$r = 1.5\% = 0.015$$

$$\Delta t = 25 \text{ años}$$

$$Pt = 1348 * e^{0.015*25}$$

$$Pt = 1348 * e^{0.015*25}$$

$$Pt = 1961 \text{ habitantes}$$

3.9 Revisión técnica del diseño de drenaje pluvial urbano existente en base a escenarios de mayor exigencia hidráulica

Se analizó el sistema de drenaje pluvial urbano existente (ver Anexo 10) en la cabecera cantonal de Yacuambi mediante su modelación en el software SWMM, aplicando el método de áreas y considerando un período de retorno de 25 años. Esta revisión técnica permite contrastar la capacidad hidráulica actual diseñada originalmente para un período de retorno de 5 años frente a un escenario de mayor exigencia, acorde con el crecimiento urbano proyectado y el incremento de la impermeabilización del suelo.

El análisis tiene como finalidad identificar deficiencias funcionales, tales como tramos con saturación hidráulica, insuficiencia de diámetros, limitaciones de captación o puntos críticos donde se generan acumulaciones de escorrentía. A partir de esta evaluación, se establece una línea base técnica que justifica la necesidad de rediseñar, complementar o implementar alternativas sostenibles en aquellos sectores donde la infraestructura existente se ha vuelto vulnerable frente a eventos de lluvia más intensos.

Asimismo, los resultados servirán como insumo para la propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), orientados a mejorar la capacidad de gestión pluvial, reducir los caudales pico y mitigar los riesgos de inundación en la zona urbana de la parroquia 28 de Mayo.

3.10 Modelamiento del drenaje pluvial existente con el programa EPA SWMM con y sin los SUDS

En el siguiente apartado se detallan los criterios considerados para construir el modelo hidrológico-hidráulico, el cual demanda una recopilación minuciosa de datos técnicos y parámetros específicos para cada uno de los sistemas que forman parte del proyecto. Este proceso es fundamental para garantizar la representatividad y precisión del comportamiento del drenaje urbano propuesto. En donde se realizará el diseño en el programa mediante la siguiente ortofoto.

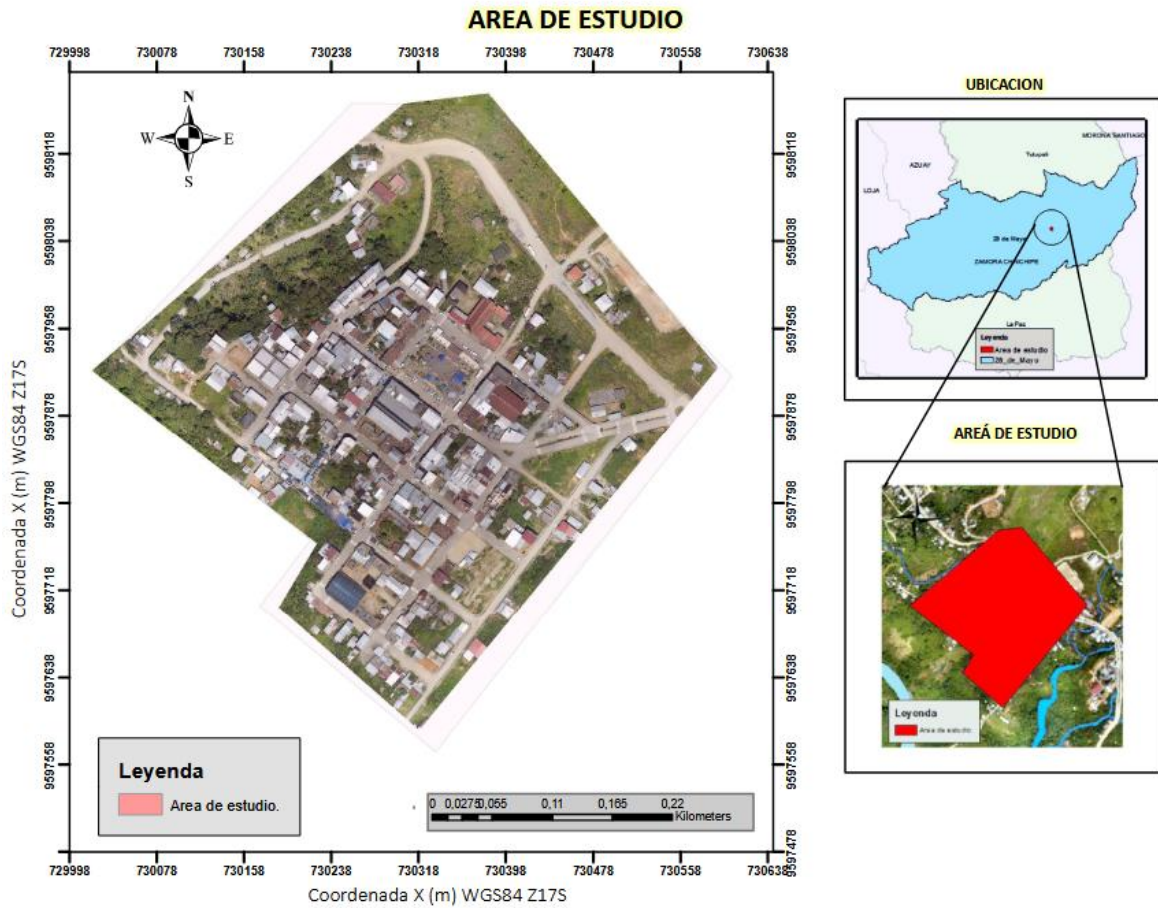


Figura 34: Mapa de proyecto con el que se diseñara en el programa SWMM

Nota: Ortofoto del área de estudio

3.10.1 Criterios para el modelo del drenaje pluvial existente

Cuencas (áreas de aporte de la zona): A continuación, se describen los criterios considerados para definir las subcuencas del modelo, basados en las condiciones físicas del área de estudio:

Ancho característico: Este parámetro se estimó conforme a lo expuesto en el capítulo 2.3 representando la distancia promedio que recorre el agua dentro de cada subcuenca. En el proyecto se definieron varios valores representativos, en donde la mayoría es de 60 m, y ciertas subcuencas son de 70 así como de 100.

Área de aporte: Corresponde a la superficie que contribuye con escorrentía dentro de cada subcuenca. Este valor varía según la delimitación de cada sector del proyecto, se puede observar en el anexo 5.

Pendiente: De acuerdo de que la topografía de la zona es muy variable el proyecto tiene varias pendientes, según las características del área de aporte que se puede observar en el anexo 5.

Área impermeable: Para el presente estudio, se consideró que el área impermeable proyectada guarda relación con el nivel de urbanización previsto para la zona de análisis en un horizonte de 25 años. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el promedio nacional de ocupación es de aproximadamente 3.78 habitantes por vivienda (Unidad de Procesamiento de la Dirección de Estudios Analíticos Estadísticos – DESEAE, Vladimir Almeida Morillo, 2010). Tomando como base una población actual de 1348 habitantes en la parroquia 28 de Mayo del cantón Yacuambi y aplicando un modelo de crecimiento poblacional, se estima que para el año 2050 la población alcanzará alrededor de 1961 habitantes.

Utilizando el promedio de ocupación por vivienda, se proyecta que se requerirán alrededor de 518 viviendas para alojar a la población futura. Este dato es fundamental para el diseño de las áreas impermeables, ya que un aumento en el número de viviendas se traduce en mayor superficie construida y, por tanto, menor capacidad de infiltración en el suelo urbano

Así mismo mediante la regla de tres en donde el área de estudio es un total de 18.84 y en la actualidad en la zona de estudio cuenta con 226 viviendas que ocupas 12.91 hectáreas, entonces con 518 viviendas se tendrás 29.59 hectáreas, por lo tanto, representan más del 100% de área impermeable, entonces este dato se utilizara para el programa EPA SWMM, es necesario aclarar que las áreas en donde están parques y lugares abiertos de uso deportivo actuales su impermeabilidad es del 75%.

Coefficiente de rugosidad de Manning: Se ha adoptado un valor de $n = 0.011$ para calles de asfalto y un 0.013 para, considerando que el material seleccionado para las tuberías es policloruro de vinilo (PVC). Este coeficiente representa adecuadamente las condiciones de rugosidad interna de este tipo de material.

Almacenamiento en depresión: En el marco del proyecto, se establecieron valores de referencia para la profundidad de almacenamiento de las superficies. Para las áreas impermeables, se adoptó un valor de 2.5 mm, mientras que, en las zonas con cobertura vegetal, como césped y hierba, se consideró una capacidad de retención de 5 mm. Esta diferenciación permite representar con mayor precisión el comportamiento del escurrimiento superficial, considerando la capacidad de infiltración y retención de cada tipo de superficie.

Flujo entre subcuencas: En el desarrollo del proyecto se optó por utilizar un nodo de tipo Outlet, ya que ambas zonas del área de estudio descargan directamente hacia un mismo punto de salida. Esta condición hidráulica permite representar de forma precisa el comportamiento del flujo superficial hacia el vertido final en el modelo implementado.

Modelo de infiltración: En el presente estudio se seleccionó el método del Número de Curva (CN) implementado en el software SWMM, ya que se ajusta adecuadamente a las condiciones físicas y de ocupación de la zona urbana de la parroquia 28 de Mayo, en el cantón Yacuambi. Este modelo permite estimar la esorrentía superficial considerando el tipo de suelo y el grado de impermeabilización existente en el área. De acuerdo con la información del Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS), la zona de estudio presenta suelos con predominio de pastos y matorrales dispersos, combinados con áreas edificadas que conforman un entorno urbano en consolidación. Bajo estas condiciones, y considerando una infiltración moderada, el suelo se clasifica dentro del grupo hidrológico B, caracterizado por una permeabilidad intermedia, correspondiente a suelos franco arenosos con limos, adoptando un valor de $CN = 83$ para el escenario actual sin la

implementación de sistemas SUDS. Este valor refleja el comportamiento típico de zonas urbanas con cobertura impermeable significativa y áreas verdes reducidas tabla 25.

Tabla 25. Resumen del cálculo de CN de la zona urbana de 28 de mayo

Cálculo del CN mediante el método de área media ponderada						
Uso suelo	Área total	Área	Porcentaje	CN	Producto	
	ha	ha	%			
Área residencial que es impermeable un 65%		12.9196	68.58	88	60.35	
Espacios abiertos (parques, similares)		0.61	3.24	61	1.98	
Calles y carreteras pavimentadas	18.84	0.68	3.61	98	3.54	
Caminos de grava		0.88	4.67	85	3.97	
Espacios abiertos (césped, campos, etc.)		3.46	18.37	69	12.67	
	TOTAL				82.50	

Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio se realiza por primera vez un análisis hidrológico detallado del sector urbano de la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi, enfocado en la estimación del Número de Curva (CN) como parámetro fundamental para el modelado del escurrimiento superficial. Ante la inexistencia de estudios anteriores en la zona que permitan realizar una comparación directa, se ha optado por aplicar el método del promedio ponderado por área, el cual permite calcular un valor representativo de CN a partir de la proporción de cada tipo de uso del suelo dentro del área de estudio figura 35. Para ello, se elaboró un plano de clasificación de usos del suelo mediante el software ArcGIS, identificando coberturas como zonas residenciales, áreas verdes, vías pavimentadas, caminos de grava, entre otros. A cada clase se le asignó un valor de CN conforme a las tablas propuestas por el USDA-NRCS (1986), comúnmente empleadas en estudios hidrológicos. Esta metodología proporciona un enfoque técnico adecuado para la caracterización del comportamiento hidrológico local, ajustado a las condiciones reales del territorio.

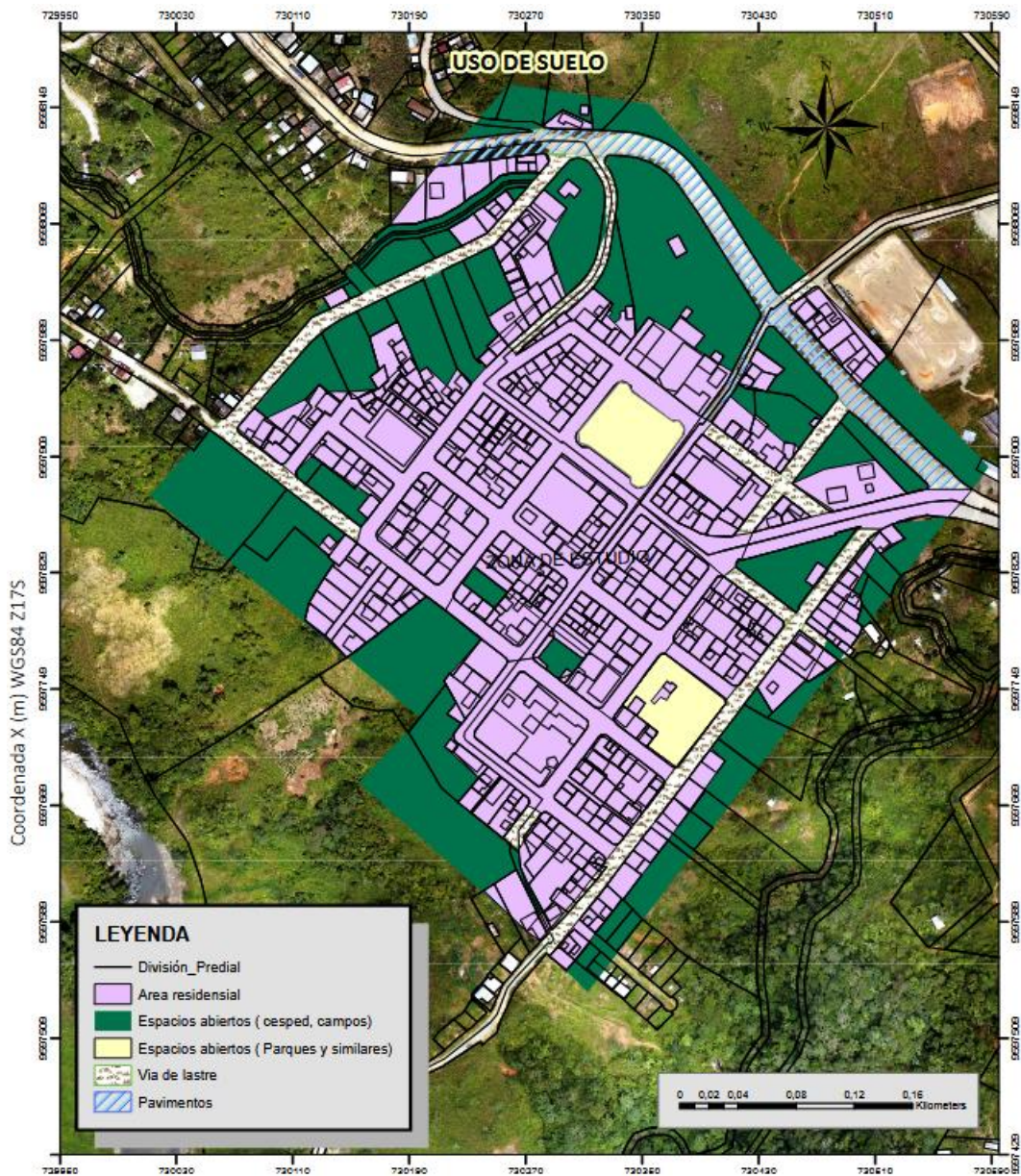


Figura 35. Uso de suelo del área de estudio de la parroquia 28 de Mayo.

Fuente: Elaboración propia

Infiltración (S): Es un parámetro fundamental en el método del Número de Curva (CN) desarrollado por el USDA-SCS (actual NRCS) ecuación 13. Este valor expresa la capacidad máxima del suelo para retener agua antes de que comience la escorrentía superficial. Se calcula en función del número de curva (CN), que depende del tipo de suelo, uso del terreno y condiciones de humedad. En este caso, con un CN de 83, el valor de infiltración potencial máxima calculado es 52.024 mm, lo que indica que el suelo puede retener hasta ese valor de lluvia antes de generar escurrimiento. Esta estimación es clave

para el diseño de sistemas de drenaje sostenibles y la simulación hidrológica en modelos como SWMM.

$$S = \frac{25400}{83 \text{ mm}} - 254$$

$$S = 52.024 \text{ mm}$$

Líneas o conductos: Para el diseño de las tuberías del sistema de drenaje pluvial se tomaron en cuenta varios criterios técnicos fundamentales:

- ✓ **Geometría de los conductos:** Se optó por tuberías de sección circular que operan parcialmente llenas, lo cual es común en sistemas de drenaje urbano por su eficiencia hidráulica.
- ✓ **Coefficiente de Manning:** Se utilizó un valor de $n = 0.009$, apropiado para tuberías fabricadas en policloruro de vinilo (PVC), material seleccionado por sus buenas propiedades hidráulicas y resistencia.
- ✓ **Desnivel entre líneas:** Inicialmente se aplicó la opción predeterminada del software (DEPTH), la cual asume que las tuberías están conectadas al nivel de la base de cada nudo. Este valor podrá ajustarse más adelante según lo exija el diseño.
- ✓ **Desnivel de entrada y salida:** Este parámetro, útil en la representación de saltos hidráulicos o diferencias de nivel entre elementos, se incluirá únicamente cuando el diseño lo requiera.

Nudos o pozos de revisión: En cuanto a los nudos del sistema, comúnmente conocidos como pozos de revisión, se definieron con base en criterios que permiten garantizar un funcionamiento adecuado del sistema. Estos elementos se ubican estratégicamente para facilitar el acceso al sistema, realizar inspecciones, mantenimiento o resolver obstrucciones en las redes de conducción.

Modelo de cálculo hidráulico: Para el desarrollo del modelo hidráulico se empleó la onda cinemática, dado que es apropiada para redes con ramificaciones y ofrece una buena estabilidad numérica durante las simulaciones.

Vertido (Descargas)

- ✓ **Tipo:** Se tomo la opción de TIMESERIES

Pluviómetro (Información con la que se configuro)

- ✓ **Formato de lluvia:** Debido a las características específicas del caso de estudio, se optó por emplear el formato de lluvia tipo volumen, ya que permite representar de manera adecuada la variabilidad de la precipitación a lo largo del tiempo.
- ✓ **Intervalo de lluvia:** Se tomo el tiempo cada 5 minutos
- ✓ **Origen de datos:** Para el análisis del proyecto se puse la opción de series temporales o TIMESERIES.
- ✓ **Serie temporal (TIME SERIES):** Se realizó un análisis estadístico de tormentas con base en los datos históricos registrados entre 1981 y 2011. A partir de ese estudio se identificó la duración crítica de 60 minutos, lo que permitió definir el marco de análisis. Luego, se aplicaron directamente las ecuaciones desarrolladas por el INAMHI (ecuaciones 10 y 11), que permiten calcular intensidades acumuladas según el tiempo y el periodo de retorno. Con esta información, se descompusieron los valores en intervalos de 5 minutos para obtener la precipitación parcial en cada tramo. Como se trabajó en formato de lluvia tipo “volumen”, fue necesario obtener los valores alternados de precipitación por intervalo. Los resultados se presentan en la Tabla 26, y la columna de precipitación alternada fue la utilizada para la simulación en el software SWMM

Tabla 26. Precipitaciones de series temporales

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad Parcial (mm/hr)	Precipitación alterada (mm)	Intensidad Parcial Alterada
5	140.55	11.71	11.71	140.55	0.92	11.03
10	110.73	18.46	6.74	80.92	3.68	44.17
15	96.32	24.08	5.62	67.49	4.04	48.45
20	87.24	29.08	5.00	60.02	4.58	55.01
25	80.80	33.67	4.58	55.01	5.62	67.49
30	75.88	37.94	4.28	51.33	11.71	140.55
35	71.97	41.98	4.04	48.45	6.74	80.92
40	68.73	45.82	3.84	46.12	5.00	60.02
45	66.01	49.50	3.68	44.17	4.28	51.33
50	61.99	51.66	2.16	25.89	3.84	46.12
55	57.36	52.58	0.92	11.03	2.16	25.89
60	53.43	53.43	0.85	10.24	0.85	10.24

Fuente: elaboración propia

Y finalmente se construyó el hietograma figura 36, el cual tiene datos que serán usamos para el modelamiento en SWMM, como se observar la precipitación alterada máxima es de 11.71 mm

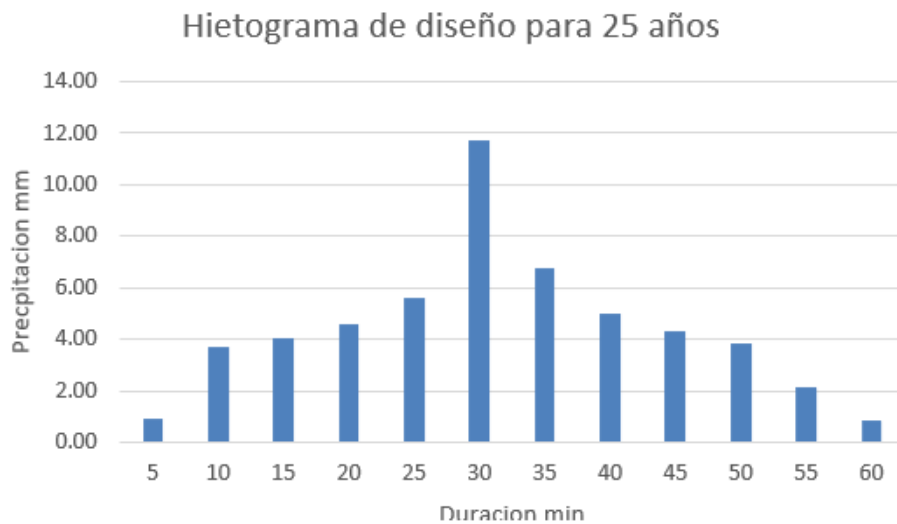


Figura 36. Distribución temporal de lluvia correspondiente a un período de retorno de 25 años.

Fuente: elaboración propia

3.10.2 Propuesta de implementación SUDS

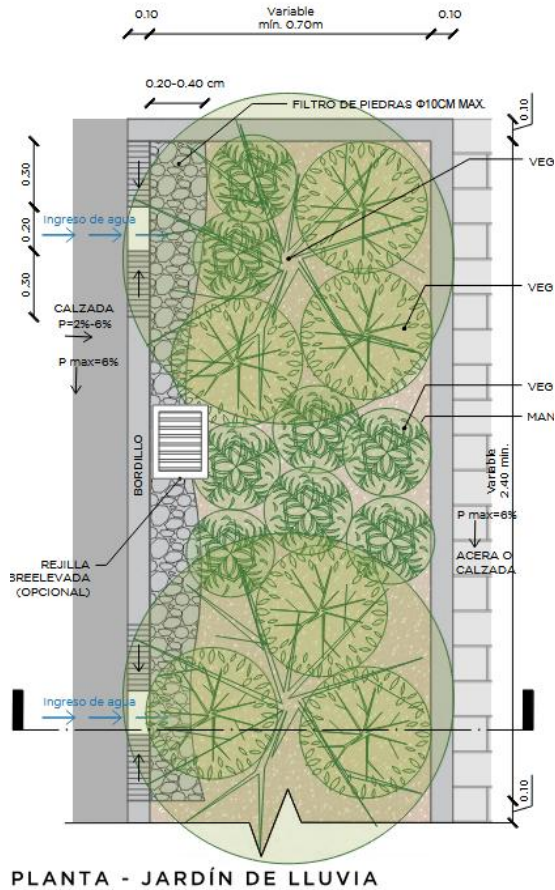
Dentro del diseño del sistema de drenaje con enfoque de sostenibilidad, se incorporaron jardines de lluvia, macetas de retención y pavimentos permeables como unidades de biorretención para la gestión del escurrimiento superficial en la zona urbana del cantón Yacuambi.

Es importante destacar que la implementación de estas soluciones se realizó considerando espacios disponibles, tales como áreas verdes, zonas de recreación y franjas de acera, evitando así la remoción o afectación de estructuras existentes.

De esta manera, los SUDS propuestos se integran al tejido urbano sin generar impacto físico negativo, ya que aprovechan áreas sin uso hidráulico previo y, al mismo tiempo, contribuyen a mejorar la infiltración, retener volúmenes iniciales de escorrentía y reducir los picos de caudal que llegan al alcantarillado pluvial.

Es importante saber que en las siguientes tablas se puede observar el porcentaje de áreas que se han obtenido de cada subcuenca en la que se va implementas SUDS, es importante analizar también el porcentaje de permeabilidad, ya que se va implementar sistemas en donde no serán al 100% permeables por lo tanto se debe ir ubicando el porcentaje de cada subcuenca en el programa.

Los jardines de lluvia. Constituyen depresiones superficiales vegetadas que reciben, almacenan y permiten la infiltración del agua de lluvia proveniente de superficies impermeables, tales como calles, veredas y áreas pavimentadas. Esta solución está basada en el principio de capturar el agua en el punto de generación, evitando que toda la escorrentía llegue de forma inmediata a la red de alcantarillado pluvial.(Salmon et al., 2023). Como se observa en la figura 37.



DI

Figura 37: Jardín de lluvias

Fuente: (Salmon et al., 2023)

Además, las dimensiones propuestas para la implementación del jardín de lluvias se definieron a partir de las subcuencas previamente delimitadas en el área de estudio. Para cada subcuenca se evaluó la disponibilidad de espacio, su nivel de impermeabilización, la morfología del terreno y la proximidad a los puntos de acumulación identificados en la modelación hidrológica. Con base en estos criterios, se seleccionaron áreas representativas que permitan interceptar adecuadamente la escorrentía superficial y mejorar su infiltración. La Tabla 27 sintetiza esta selección, mostrando la superficie destinada a la infraestructura LID en cada subcuenca, así como el porcentaje de impermeabilidad asociado, información esencial para dimensionar la eficiencia del sistema propuesto.

Tabla 27: Porcentaje de área de cada subcuenca y su impermeabilidad

LID: JARDIN DE LLUVIAS							
Subcuencas	Longitud (m)	Ancho (m)	Área escogida (m2)	Área (ha)	Área total Subcuenca (ha)	% Impermea bilidad	% impermea bilidad - 100%
1	18.00	5.00	90.00	0.009	0.04	20.45	79.55
2	37.00	5.00	185.00	0.019	0.26	7.12	92.88
3	36.26	10.00	362.60	0.036	0.25	14.50	85.50
4	65.25	10.00	652.50	0.065	0.50	13.18	86.82
5	58.00	10.00	580.00	0.058	0.33	17.63	82.37
6	65.00	10.00	650.00	0.065	0.15	43.05	56.95
7	148.00	10.00	1480.00	0.148	0.40	37.00	63.00
8	45.00	10.00	450.00	0.045	0.33	13.68	86.32

Fuente: Elaboración propia

Pavimentos permeables: El pavimento permeable se incorporó como parte de la propuesta de mejora del sistema de drenaje urbano en la zona de estudio, en donde se ubica la red 1 del sistema de alcantarillado pluvial. Este tipo de infraestructura figura 39 permite que el agua de lluvia ingrese a través de la superficie de rodadura y se almacene temporalmente en horizontes subyacentes de grava, desde donde puede infiltrarse en el suelo o descargarse lentamente hacia la red pluvial. La selección de este SUDS se basó en la Guía para implementar Soluciones basadas en la Naturaleza en Quito (Salmon et al., 2023), donde se establece el pavimento permeable como medida efectiva para reducir la escorrentía superficial, controlar los picos de caudal y mejorar la infiltración urbana, especialmente en zonas con superficies impermeabilizadas como calles y veredas.

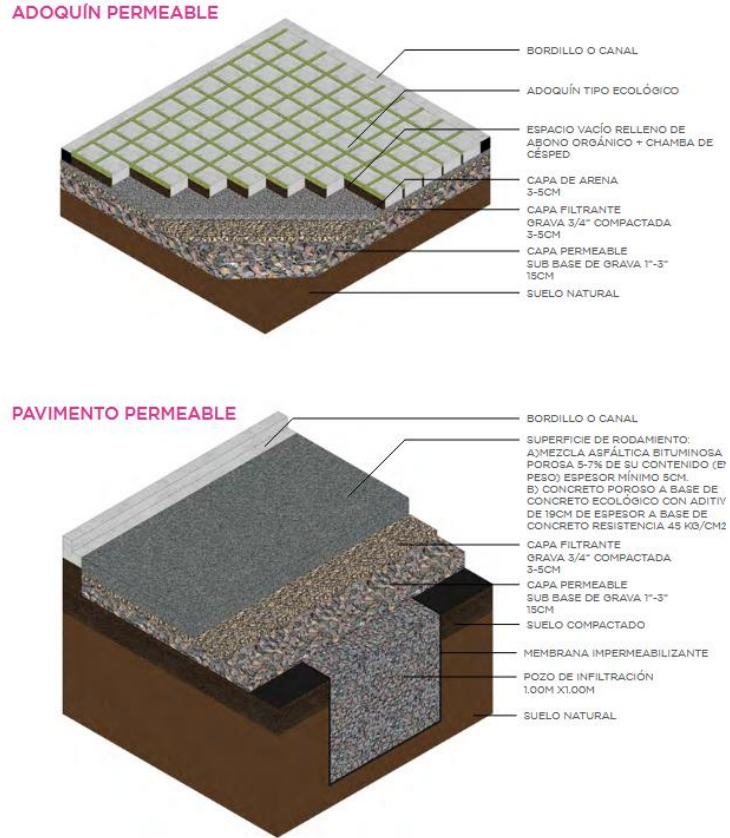


Figura 38: Pavimentos permeables

Fuente: (Salmon et al., 2023)

La selección de cada área se realizó según la disponibilidad de espacios dentro de las subcuencas, priorizando zonas donde la escorrentía superficial tiende a acumularse y donde la intervención contribuye a reducir el volumen escurrido hacia la red de drenaje pluvial. En la Tabla 28 se presentan las longitudes, anchos y superficies escogidas para cada subcuenca, así como la proporción que representan respecto al área total de aporte y su relación con el nivel de impermeabilización existente.

Tabla 28: Porcentaje de áreas que se usó para implementación de pavimentos permeables en el programa SWMM

LID: PAVIMENTO PERMEABLE							
Subcuencas	Longitud (m)	Ancho (m)	Área escogida (m2)	Área (ha)	Área total Subcuenca (ha)	% Impermeabilidad	% impermeabilidad -100%
1	18.00	1.50	27.00	0.00270	0.04	6.14	93.86
2	37.00	1.50	55.50	0.00555	0.26	2.13	97.87

3	36.26	1.50	54.39	0.00544	0.25	2.18	97.82
4	65.25	1.50	97.88	0.00979	0.50	1.98	98.02
5	58.00	1.50	87.00	0.00870	0.33	2.64	97.36
6	65.00	1.50	97.50	0.00975	0.15	6.46	93.54
7	148.00	1.50	222.00	0.02220	0.40	5.55	94.45
8	45.00	1.50	67.50	0.00675	0.33	2.05	97.95

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño del drenaje pluvial y análisis de resultado

4.1.1 Anisáis de la red actual para un Tr:25 años

Antes de proceder con el diseño del sistema de drenaje pluvial propuesto, se realizó una simulación del sistema existente en la cabecera parroquial 28 de Mayo como se Dicho diagnóstico se llevó a cabo mediante un modelo computacional desarrollado en el software SWMM. La construcción de este modelo se basó en la recopilación y digitalización de los planos de la red existente. A partir de estos, se caracterizaron las condiciones geométricas y funcionales del sistema, el cual fue originalmente diseñado, las cuales consideraban un intervalo de recurrencia de 20 años.



Figura 40: Plano de red de alcantarillado pluvial

Fuente: Elaboración propia

La validación de la simulación se llevó a cabo mediante la verificación del error de continuidad, asegurando que la diferencia entre los flujos de entrada y salida no superara el 10%. Los resultados obtenidos, mostrados en la figura 41, fueron un error de -3.24% para la escorrentía superficial y de -0.04% para el cálculo hidráulico. Estos valores, al ser significativamente inferiores al límite aceptable, confirman la alta confiabilidad del modelo.

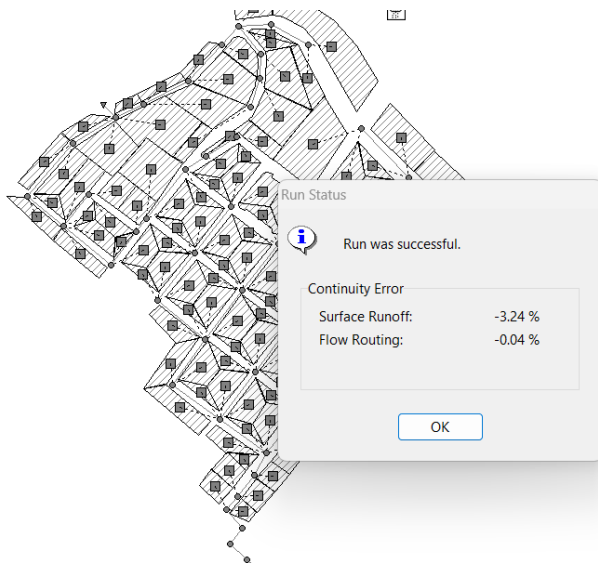


Figura 41. Plano de red de alcantarillado

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico del modelo, cuyos resultados se resumen en la figura 42, parte de una precipitación total de 52.563 mm. De esta, se determinó que 46.191 mm se convierten en escorrentía superficial, representando el volumen de agua que ingresa a la red de alcantarillado. Adicionalmente, se cuantificó una infiltración en el terreno de 0.296 mm y un almacenamiento final en superficies de 7.777 mm.

***** Runoff Quantity Continuity *****	Volume hectare-m -----	Depth mm -----
Total Precipitation	0.821	52.563
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.005	0.296
Surface Runoff	0.721	46.191
Final Storage	0.121	7.777
Continuity Error (%)	-3.236	

Figura 42: Resultados de análisis de escorrentía en el programa SWMM

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los cálculos hidráulicos indica que, para un volumen de entrada por escorrentía superficial de 6985 m³, la red de alcantarillado tiene la capacidad de transportar un total de 6661 m³ a través de sus conductos. La diferencia, que corresponde a 252 m³, se manifiesta como reboses en diversos nudos del sistema tabla 43.

***** Flow Routing Continuity *****	Volume hectare-m -----	Volume 10^6 ltr -----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.699	6.985
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.666	6.661
Flooding Loss	0.025	0.252
Evaporation Loss	0.000	0.000
Exfiltration Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume	0.000	0.000
Final Stored Volume	0.008	0.075
Continuity Error (%)	-0.045	

Figura 43: Análisis hidráulico

Fuente: Elaboración propia

Análisis de las escorrentías de cada subcuenca. Se observa que la mayoría de las zonas presentan valores elevados de escorrentía (entre 40 y 45 mm), representadas en color rojo, lo que evidencia una alta impermeabilidad superficial. En contraste, algunas

áreas verdes o menos urbanizadas reflejan menores niveles de escorrentía, con valores entre 30 y 35 mm.

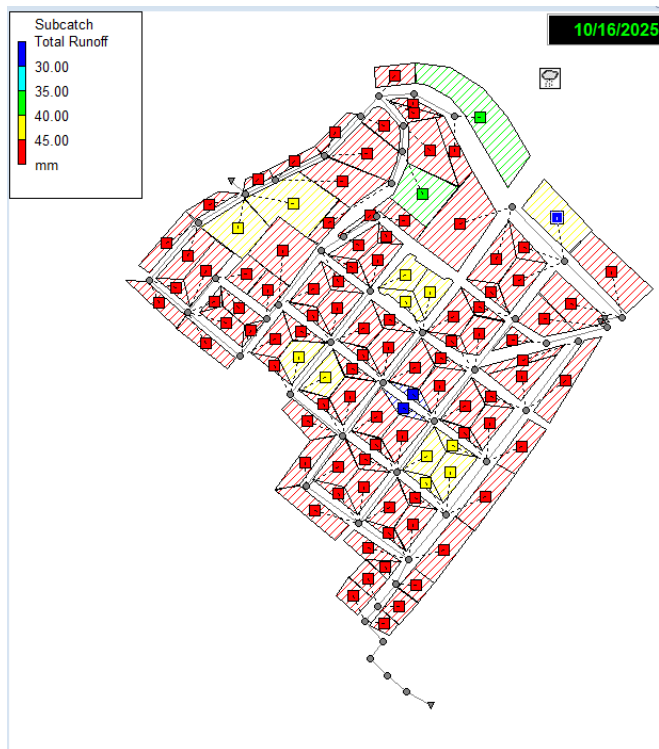


Figura 44: Escorrentía de cada subcuenca

Fuente: Elaboración propia

Análisis de las velocidades. Se determinó que 27 conductos supera la velocidad máxima de 5 m/s.

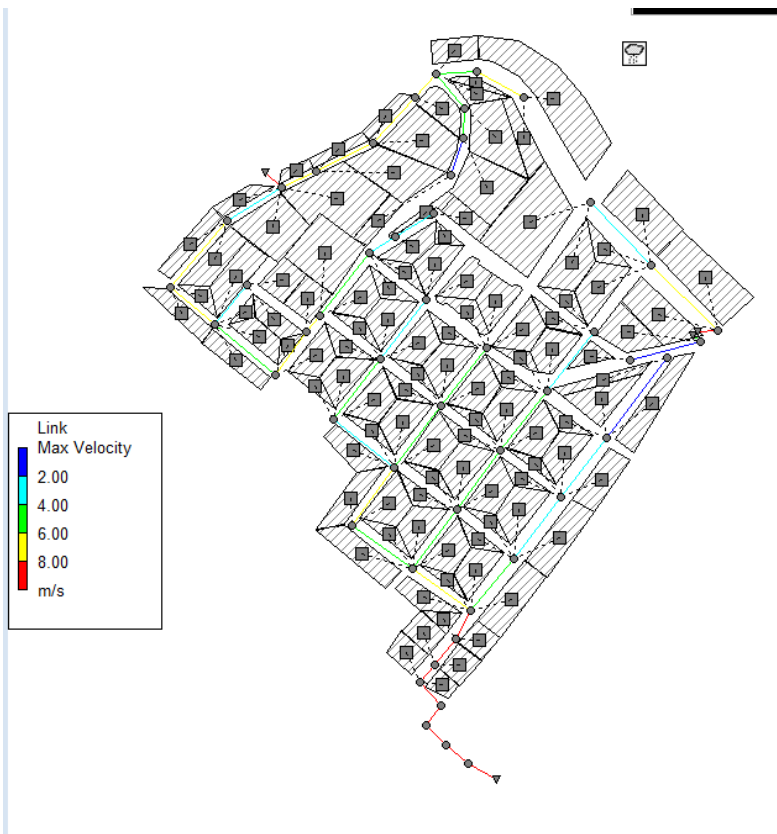


Figura 45: Velocidades en las tuberías en el tiempo más crítico de 35 min.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de capacidad: Se obtuvo 24 conductos que superan la máxima capacidad que es del 90%, figura 46.

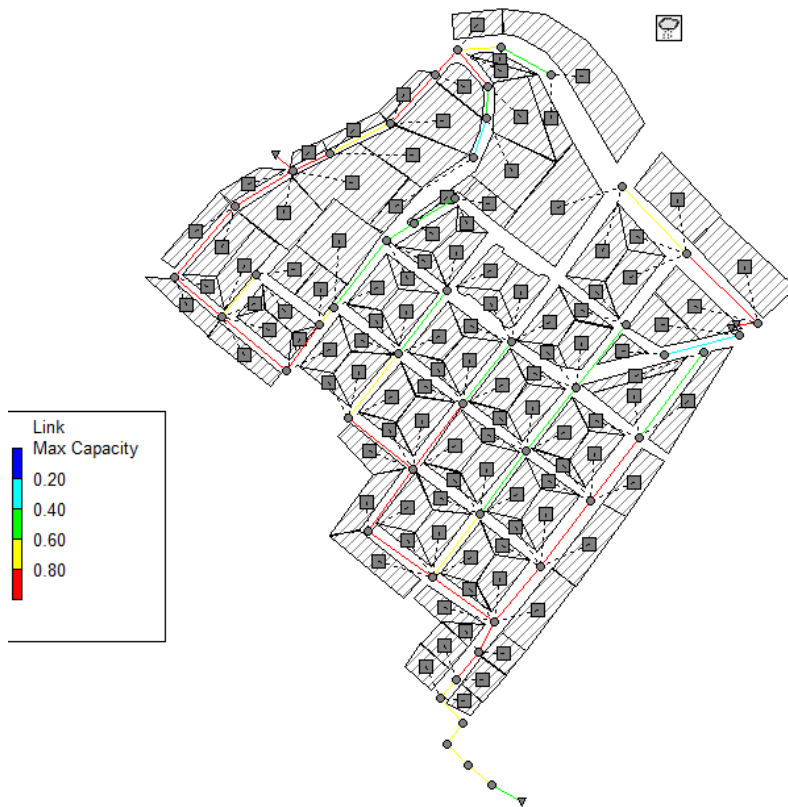


Figura 46: Resultados de la capacidad máxima de cada tubería

Fuente: Elaboración propia

La figura 47 detalla los caudales máximos correspondientes a cada uno de los nodos del sistema que experimentaron inundaciones.

Topic: Node Flooding						
Click a column header to sort the column.						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Depth Meters
22	0.11	87.81	0	00:35	0.017	0.000
32	0.21	202.26	0	00:35	0.088	0.000
33	0.11	30.56	0	00:35	0.007	0.000
34	0.06	52.84	0	00:35	0.006	0.000
42	0.01	23.17	0	00:34	0.000	0.000
27	0.11	328.87	0	00:35	0.076	0.000
19	0.01	14.85	0	00:35	0.000	0.000
26	0.01	25.80	0	00:35	0.000	0.000
30	0.12	223.88	0	00:35	0.057	0.000
2	0.01	55.96	0	00:35	0.001	0.000
28	0.01	132.37	0	00:32	0.000	0.000
29	0.01	55.98	0	00:32	0.000	0.000

Figura 47: Aporte de nodos en el programa SWMM

Fuente: Elaboración propia

Análisis de puntos de salida. Como se mencionó anteriormente, el sistema de drenaje cuenta con cuatro puntos de descarga, los cuales representan las salidas principales del caudal pluvial generado en la zona urbana. En la figura 51 se detallan los caudales medios y máximos correspondientes a cada vertido, los cuales permiten evaluar el comportamiento hidráulico del sistema ante diferentes escenarios de lluvia. Esta información es fundamental para determinar la capacidad de evacuación y el rendimiento general de la red pluvial existente.

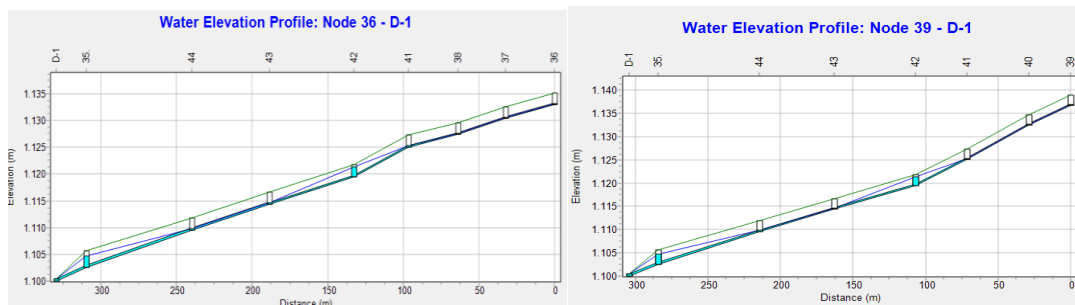
Summary Results			
Topic: Outfall Loading			
Click a column header to sort the column.			
Outfall Node	Flow Frequency %	Average Flow LPS	Maximum Flow LPS
D-1	99.28	866.64	1397.01
D-2	98.89	903.10	1473.24
D-3	99.20	46.59	98.63
D-4	99.28	598.05	1123.19

Figura 48: Caudales medios y máximos en los diferentes puntos de salida.

Fuente: Elaboración propia

Los perfiles de la lámina de agua para la red del proyecto indican que, según los resultados, varios conductos superan el 90 % de su capacidad. También se observa la ocurrencia de reboses en determinados nudos del sistema. Las ilustraciones adjuntas capturan el momento de mayor aporte de caudal en la red de alcantarillado.

Red 1



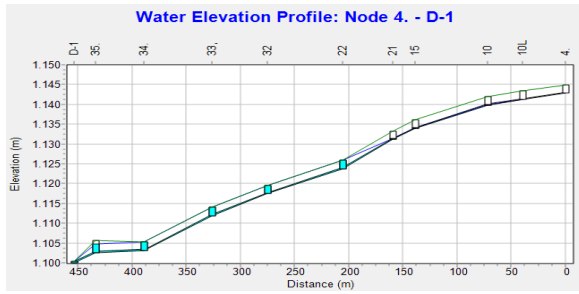


Figura 49: Resultados de la red actual (red 1)

Fuente: Elaboración propia

Red 2

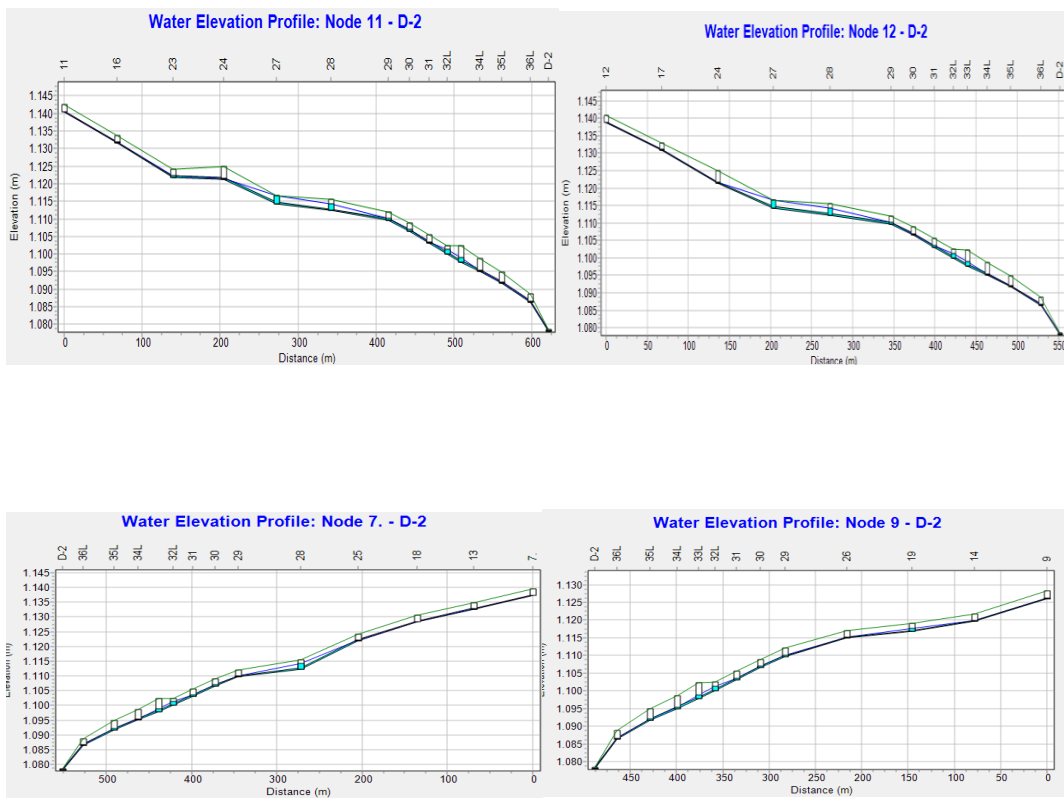


Figura 50: Resultados de la red actual (red 2)

Fuente: Elaboración propia

Red 3 y 4

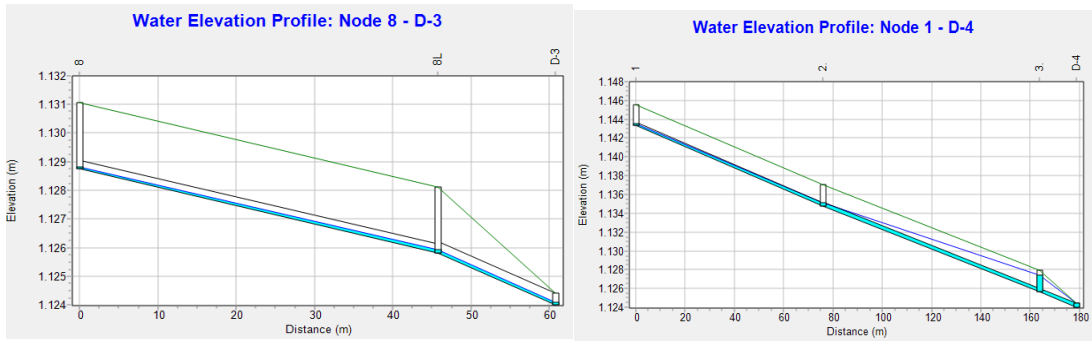


Figura 51: Resultados de la red actual. (red 3 y 4)

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Resultados de análisis de la red implementando SUDS

Dado que para el sector donde está el cauce 18 de noviembre se determinó que es una zona altamente saturada anexo 3, y de la misma forma la modelación actual se observa que ciertos pozos de ese sector se llenaron completamente figura 52.

Resultado y discusión 1

Jardines verdes.

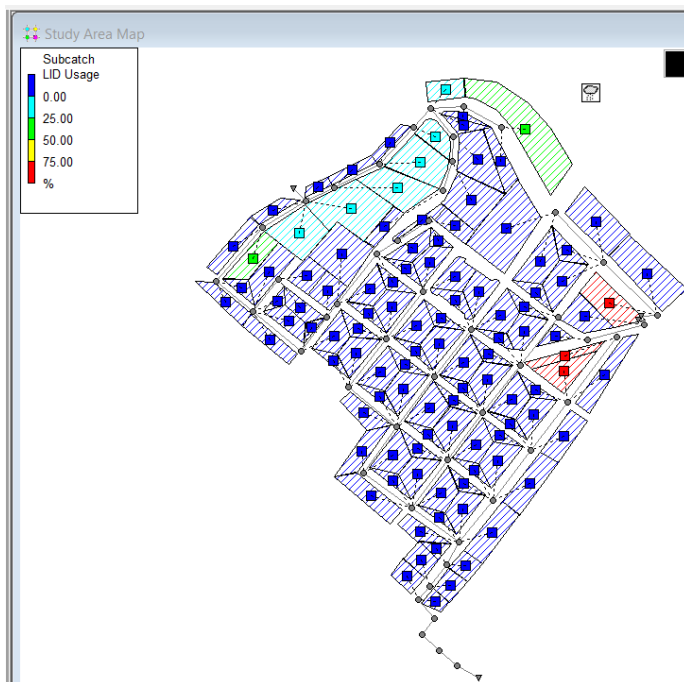


Figura 52: Resultados obtenidos con la implementación de SUDS.

Fuente: Elaboración propia

El valor de Inicial LID 2.862 representa la parte de la lluvia que el sistema sostenible retiene inmediatamente. Antes de que el agua corra hacia las calles, los SUDS la guardan, y por eso el caudal hacia el alcantarillado disminuye.

Los resultados del balance hídrico, detallados en la figura 53, indican que, para una precipitación total de 52.563 mm sobre el área de estudio, se distribuye de la siguiente manera:

- Un volumen de 1.049 mm se infiltra directamente en el terreno.
- Un total de 41.556 mm se transforma en escorrentía superficial, representando el caudal que ingresa a la red de alcantarillado.
- Finalmente, 14.332 mm quedan retenidos como almacenamiento final en las superficies permeables e impermeables del sistema.

***** Runoff Quantity Continuity *****	Volume hectare-m -----	Depth mm -----
Initial LID Storage	0.043	2.862
Total Precipitation	0.794	52.563
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.016	1.049
Surface Runoff	0.628	41.566
Final Storage	0.217	14.332
Continuity Error (%)	-2.747	

Figura 53: Resultados mediante jardines verdes

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al análisis hidráulico (ver figura 54), se determinó que de un aporte total por escorrentía superficial de 6077 m³, la red de alcantarillado es capaz de evacuar un volumen de 5803 m³ a través de sus conductos. La diferencia, correspondiente a 206 m³, se atribuye a reboses que se presentan en los nudos del sistema debido a que se excede su capacidad.

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10^6 ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.608	6.077
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.580	5.803
Flooding Loss	0.021	0.206

Figura 54: resultados mediante la implementación de jardines verdes.

Fuente: Elaboración propia

Resultado y discusión 2

Pavimento permeable

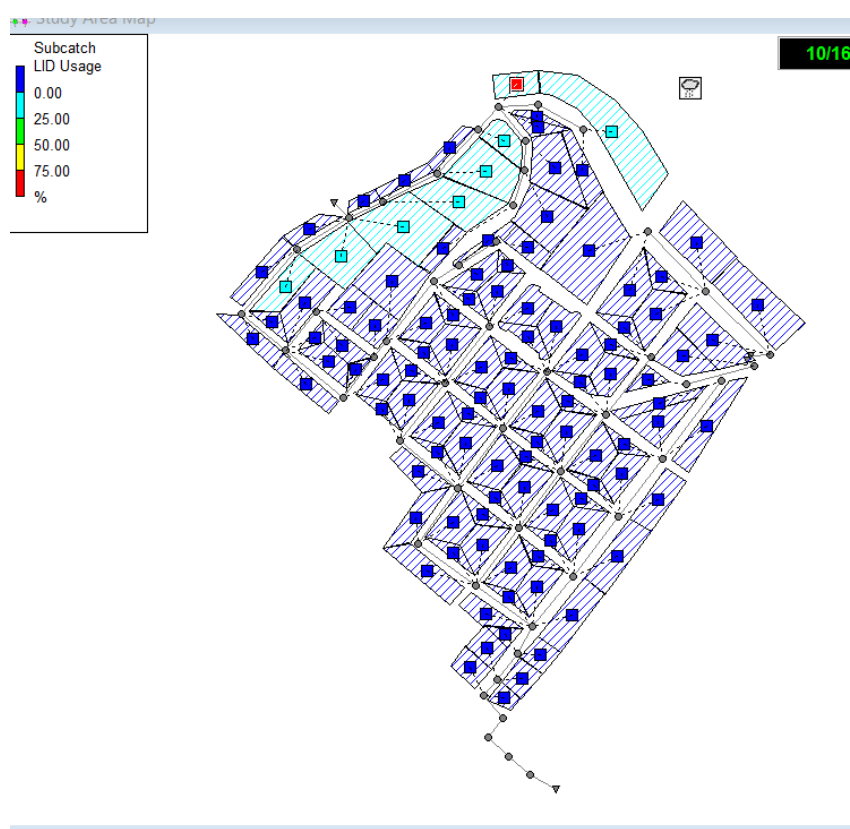


Figura 55: Salida del modelo hidrológico SWMM correspondiente al caso con pavimento permeable.

Fuente: Elaboración propia

El valor inicial LID 0.172 mm representa la parte de la lluvia que el sistema sostenible retiene inmediatamente. Antes de que el agua corra hacia las calles, los SUDS la guardan, y por eso el caudal hacia el alcantarillado disminuye

La precipitación registrada en el área de estudio alcanza los 52.563 mm. De este total, solo 0.403 mm logran infiltrarse en el terreno. Esto significa que 45.331 mm se convierten en escorrentía superficial, un valor especialmente importante porque corresponde al volumen que finalmente ingresa a los conductos del sistema de alcantarillado. Por su parte, los 8.704 mm restantes quedan retenidos como almacenamiento final sobre superficies permeables e impermeables.

***** Runoff Quantity Continuity *****	Volume hectare-m -----	Depth mm -----
Initial LID Storage	0.003	0.172
Total Precipitation	0.821	52.563
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.006	0.403
Surface Runoff	0.708	45.331
Final Storage	0.136	8.704
Continuity Error (%)	-3.228	

Figura 56: Análisis con implementación de pavimento permeable

Fuente: Elaboración propia

Los resultados hidráulicos, detallados en la figura 57, muestran el comportamiento del sistema frente a una escorrentía superficial de 6851 m³. Se observa que la descarga principal a través de los conductos de alcantarillado alcanza los 6538 m³, mientras que los 75 m³ restantes corresponden a volúmenes de agua que exceden la capacidad de los nudos, generando reboses.

***** Flow Routing Continuity *****	Volume hectare-m -----	Volume 10 ⁶ ltr -----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.685	6.851
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.654	6.538
Flooding Loss	0.024	0.241
Evaporation Loss	0.000	0.000
Exfiltration Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume ...	0.000	0.000
Final Stored Volume	0.008	0.075
Continuity Error (%)	-0.044	

Figura 57: Resultados con implementación de pavimentos permeables

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Comparación de caudales de los diferentes SUDS implementados y el sistema sin SUDS

Tabla 29: Comparación de caudales finales de la salida de la red 1.

Caudal de salida	LPS
SIN SUDS	1397.03
Jardines verdes	984.10
Pavimentos permeables	1210.31

Fuente: Elaboración propia

El sistema sin implementación de SUDS registra un caudal pico de 1397.03 L/s, el cual representa la condición actual de la red pluvial en la zona urbana de Yacuambi, evidenciándose una alta descarga instantánea hacia los colectores, lo que incrementa el riesgo de saturación e inundación.

Por otro lado, al incorporar jardines de lluvia como unidades de biorretención, el caudal de salida se reduce a 984.10 L/s, lo que equivale a una disminución del 29.55% respecto al escenario base. Esto demuestra que los jardines verdes captan, almacenan e infiltran una parte importante del escurrimiento superficial, retrasando su llegada al sistema de alcantarillado.

En el caso del pavimento permeable, el caudal disminuye a 1210.31 L/s, representando una reducción del 13.35% respecto al sistema sin SUDS. Este comportamiento responde a la percolación e infiltración gradual del agua a través de las subcapas filtrantes que conforman el pavimento.

- **Discusión**

La comparación entre los tres escenarios permite comprender el efecto de las soluciones de drenaje sostenible sobre el comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

En el sistema actual, la alta impermeabilidad del territorio ocasiona que una proporción significativa de la precipitación pase directamente a convertirse en escorrentía superficial (46.191 mm), generando un volumen significativo que ingresa a la red de alcantarillado (6661 m³). Esta condición excede parcialmente la capacidad hidráulica de los nudos, originando 252 m³ de rebose, lo cual representa un riesgo potencial de inundaciones.

Con la implementación de jardines verdes, la escorrentía disminuye a 41.556 mm, debido al incremento en la retención e infiltración (1.049 mm) y al aumento del almacenamiento temporal (14.332 mm). Como resultado, el volumen descargado al alcantarillado se reduce a 5803 m³, y el rebose disminuye a 206 m³, reflejando una mejora en la estabilidad hidráulica del sistema. Esto demuestra que los jardines de lluvia son efectivos en capturar y retardar el flujo, reduciendo el caudal pico y la presión sobre los conductos.

Por otro lado, el pavimento permeable también mejora el comportamiento del sistema, aunque en menor magnitud. La escorrentía superficial se reduce a 45.331 mm y el almacenamiento aumenta a 8.704 mm, permitiendo que el volumen descargado se reduzca a 6538 m³, con reboses de solo 75 m³. En este caso, la reducción significativa del rebose indica que el pavimento permeable es especialmente eficiente en distribuir el flujo en el tiempo, mitigando episodios de sobrecarga puntual en la red.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La implementación de SUDS en la zona urbana del cantón Yacuambi mejoró significativamente el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje, al reducir el caudal pico que llega a la red y disminuir el volumen de escorrentía superficial. Los jardines verdes presentaron la mayor eficiencia en términos de retención y almacenamiento del agua de lluvia, mientras que el pavimento permeable favoreció la infiltración gradual y el control de reboses en nudos críticos, contribuyendo de manera directa a reducir el riesgo de inundaciones urbanas.

Los SUDS propuestos demostraron ser viables técnica y espacialmente, ya que su implementación se realizó sin modificar ni reemplazar la infraestructura existente, aprovechando áreas verdes, franjas laterales y superficies pavimentadas disponibles. Esto confirma que las soluciones basadas en la naturaleza representan una alternativa sostenible, adaptable y de bajo impacto para mejorar la capacidad del sistema de drenaje urbano, promoviendo una gestión responsable del recurso hídrico y fortaleciendo la resiliencia ambiental del territorio.

La comparación de caudales demuestra que la incorporación de SUDS permite reducir de manera efectiva el volumen de agua que ingresa al alcantarillado, disminuyendo el caudal pico desde 1397.03 l/s en el sistema actual hasta 984.10 l/s con jardines verdes y 1210.31 l/s con pavimento permeable. Esta reducción corresponde a una disminución del caudal máximo de 29.55% y 13.35%, respectivamente, lo que evidencia que los SUDS laminan el hidrograma, distribuyen el flujo en el tiempo y evitan la saturación inmediata del sistema pluvial, contribuyendo a un funcionamiento más estable y seguro de la red urbana.

5.2 Recomendaciones

Ampliar la implementación de SUDS en zonas críticas: Se recomienda extender el uso de jardines verdes y pavimentos permeables hacia sectores que presenten altos niveles de escorrentía y recurrencia de reboses, con el fin de incrementar la capacidad de regulación hídrica del sistema urbano.

Incorporar los SUDS dentro de la planificación municipal: Se considera necesario que el Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón considere la integración de SUDS en futuros proyectos viales y espacios públicos, de manera que la gestión de aguas pluviales se realice desde la superficie sin depender únicamente del alcantarillado convencional.

Promover participación y educación comunitaria: Se recomienda desarrollar programas de sensibilización para que la población conozca el funcionamiento y beneficios de los SUDS, fortaleciendo la corresponsabilidad en el cuidado y sostenibilidad del sistema urbano

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

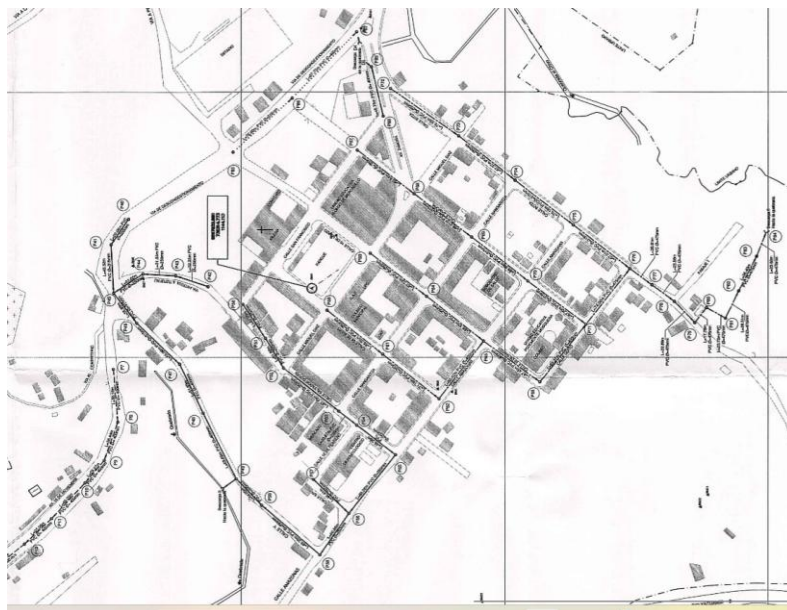
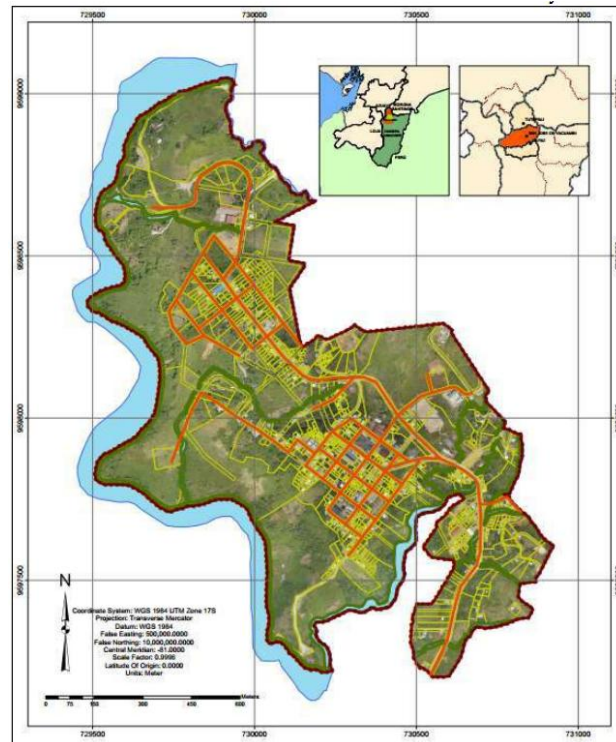
- Altamirano, B. (2024). *PROPUESTA DE DISEÑO VIAL PARA LA PAVIMENTACIÓN DE LA RUTA QUE UNE LOS SECTORES DE "PUEMBO – SAN PEDRO", EN EL CANTÓN LA MANÁ, PROVINCIA DE COTOPAXI*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28401/1/TTS1923.pdf>
- Antonio, J., Barquero, B., Noriega, P. M., Huelves, E., Alberto, L.-A., Robles -Ingeniero, M., De, T., Públicas, O., Juan, J., & García, F. (2023). *Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Término Municipal de Murcia*.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2016). *LEY ORGÁNICA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, USO Y GESTIÓN DE SUELO*.
- Calle, G., & Chuico, P. (2019). *Diseño de los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial de la urbanización privada Las Piñas ubicada en el cantón Milagro, sector Las Piñas*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/51433/1/T-70540.pdf>
- Calle, J. (2019). *Diseño de un sistema de drenaje pluvial eco-sostenible para la zona de Piura Urbana* [Trabajo de tesis, Universidad Nacional de Piura].
<https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2989>
- Campos, A. (1992). *Procesos del ciclo Hidrológico*.
- Cerrado, L. (2020). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJES SOSTENIBLES SUSTAINABLE DRAINAGE SYSTEMS*.
- Chen, J., Theller, L., Gitau, M. W., Engel, B. A., & Harbor, J. M. (2017). Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Journal of Environmental Management*, 187, 470-481. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.11.017>
- Chiarito, E., Zimmermann, E., & Zacarías, S. M. (2018). *Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección* (Vol. 24).
<https://doi.org/10.35305/curiham.v24i0.126>
- Chow, V. te., Maidment, D. R. ., & Mays, L. (1998). *Applied hydrology* (B. J. Clark and John Morriss;, Ed.). McGraw-Hill.
- CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR. (2008). CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR. En *Registro Oficial* (Vol. 449, Número 20). www.lexis.com.ec
- De la cruz, I., & Fernández, K. (2024). *Pronóstico de precipitaciones en Baños, Ecuador mediante técnicas de machine learning: análisis del período 2014 – 2023*. [Trabajo de tesis, Universidad Central del Ecuador]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/34505>
- de la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., & Bautista Marco Segura, J. (s. f.). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.
- De la Fuente García, L., Perales, S., Rico, M., Andrés, I., & Bautista, J. (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.
- Edwards, P. J., Williard, K. W. J., & Schoonover, J. E. (2015). Fundamentals of Watershed Hydrology. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154(1), 3-20.
<https://doi.org/10.1111/J.1936-704X.2015.03185.X>

- Epa, U., of Research, O., Supply, W., & Resources Division, W. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division*.
- Goncalves, M. L. R., Zischg, J., Rau, S., Sitzmann, M., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2018). Modeling the effects of introducing low impact development in a tropical city: A case study from Joinville, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030728>
- Guevara, M. J., & Jabo, K. J. (2025a). *Propuesta de diseño para un sistema de drenaje pluvial urbano sostenible en el centro poblado de Simbilá, Catacaos, Piura usando el software de gestión de aguas pluviales SWMM*. <https://hdl.handle.net/11042/7254>
- Guevara, M. J., & Jabo, K. J. (2025b). *Propuesta de diseño para un sistema de drenaje pluvial urbano sostenible en el centro poblado de Simbilá, Catacaos, Piura usando el software de gestión de aguas pluviales SWMM*.
- INAMHI. (2015). *DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN*.
- James, William. (2013). *Pragmatic modeling of urban water systems*. CHI Press.
- Londoño, C. (2001). *Cuencas Hidrográficas: Bases Conceptuales - Caracterización-Planificación - Administración*. https://sinia.minam.gob.pe/documentos/cuencas-hidrograficas?utm_source=
- Lopez, V., & Gualan, J. (2021). *ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLANTA DE TRATAMIENTO, EN LA CABECERA PARROQUIAL DE CACHA DEL CANTÓN RIOBAMBA PROVINCIA DE CHIMBORAZO*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20308/1/UPS%20-%20TTS366.pdf>
- Los Huertos, M. (2020). Archeology of Inland Waters. *Ecology and Management of Inland Waters*, 27-63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814266-0.00014-3>
- Ministerio de transporte y comuninaciones (MTC). (2012). *Manual de hidrologia, hidraulica y drenaje*. <https://drive.google.com/file/d/1mq5QvV4WzjmcWpUtGC1J3dE8q6Li1j4D/view>
- Nardi, F. (2013). Hydrograph, Flood. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 497-497. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_178
- Pacheco, K., & Coraisaca, J. R. (2022). *Aplicación del software Epa Swmm para el análisis del diseño de un sistema de alcantarillado sanitario y pluvial, caso de estudio de la zona de Bullcay perteneciente al Cantón Gualaceo Provincia del Azuay* [Tesis de grado, Universidad Carolica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/12800>
- Pizarro-Tapia, R., Balocchi-Contreras, F., Andrade-Vilaró, F., Sangüesa-Pool, C., Vargas, J. A., Morales-Calderón, C., Vera-Camiroaga, M., Valdés-Pineda, R., Vallejos-Carrera, C., Mendoza-Mendoza, R., Olivares-Santelices, C., Abarza-Martínez, A., & Fuentes-Lagos, R. (2014). Análisis comparativo de tres hidrogramas unitarios sintéticos en dos cuencas mediterráneas de Chile, Región Del Maule. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 5-20. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.09.054>
- PUGS. (2023). *PLAN DE USO Y GESTIÓN DEL SUELO DEL CANTÓN YACUAMBI 2023-2035*.
- Quichimbo-Miguitama, F., Matamoros, D., Jiménez, L., & Quichimbo-Miguitama, P. (2022). Influence of Low-Impact Development in Flood Control: A Case Study of the Febres Cordero Stormwater System of Guayaquil (Ecuador). *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127109>

- Rosales, M., & Quiroga, D. (2025). *Diseño de la red de alcantarillado pluvial para la parroquia La Unión, cantón Valencia, provincia Los Ríos* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30287>
- Rossmann, L. (2022). *Storm Water Management Model User's Manual Version*. www.epa.gov/water-research
- Salmon, N., Yapez, G., & Bonilla, D. (2023). *Guía para implementar Soluciones basadas en la Naturaleza en Quito*.
- Sanchez, F. (2022). *Calculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S.1*.
- Sehrawat, S., & Shekhar, S. (2025). Integrating low impact development practices with GIS and SWMM for enhanced urban drainage and flood mitigation: A case study of Gurugram, India. *Urban Governance*, 5(2), 240-255. <https://doi.org/10.1016/J.UGJ.2025.05.004>
- SENAGUA. (2010). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES*. <https://doi.org/10.07>
- Son, C. H., Hyun, K. H., Kim, D., Baek, J. I., & Ban, Y. U. (2017). Development and application of a low impact development (LID)-based district unit planning model. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/su9010145>
- Suárez-Aguilar, Z. E., Sepúlveda-Delgado, O., Patarroyo-Mesa, M., & Canaria-Camargo, L. C. (2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja, Colombia. *Información tecnológica*, 31(1), 193-206. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100193>
- Tang, M., Xu, Z., & Wang, J. (2019). *OBSERVATIONAL CONSTRAINTS ON THE RASTALL GRAVITY FROM ROTATION CURVES OF LOW SURFACE BRIGHTNESS GALAXIES*.
- United Nations. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*.
- United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*.
- Volpi, E., Fiori, A., Grimaldi, S., Lombardo, F., & Koutsoyiannis, D. (2015). *One hundred years of return period: Strengths and limitations*. <https://doi.org/10.1002/2015WR017820>

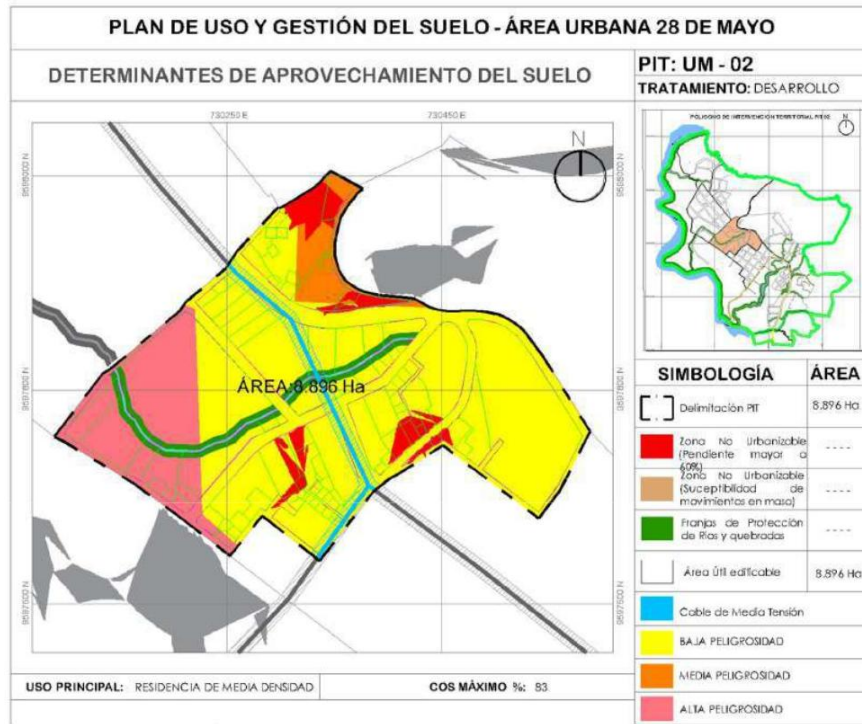
ANEXOS

Anexo 1: Sistemas de drenaje que tiene la parroquia 28 de mayo.

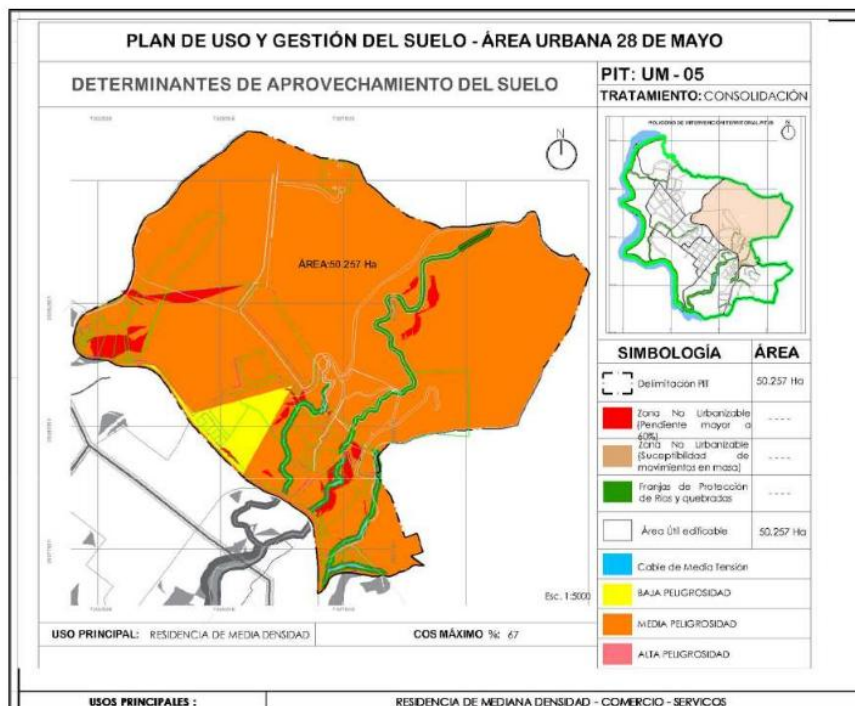


Anexo 2: Mapas de susceptibilidad, de diferentes zonas del área de estudio.

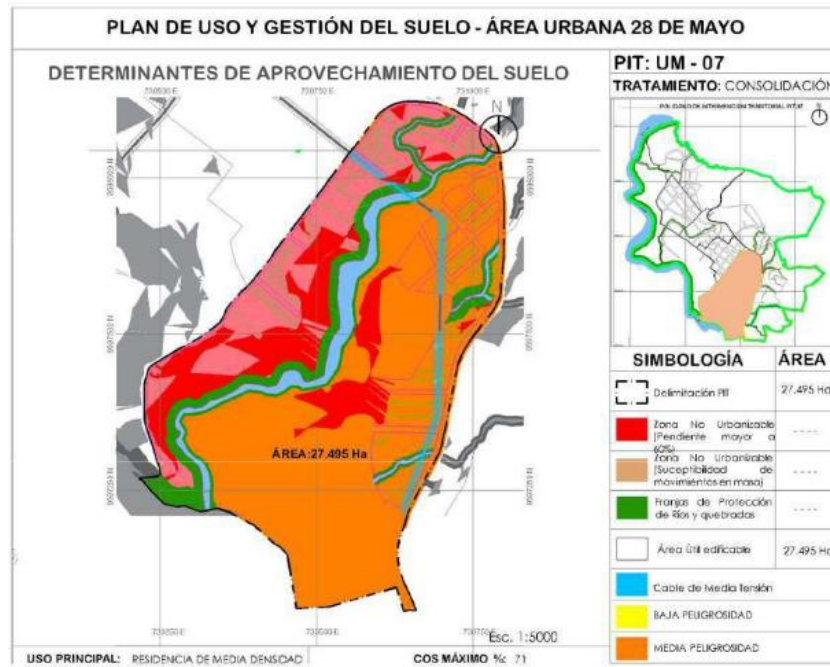
- **Mapa del Polígono de Intervención Territorial UM-02**, correspondiente al área urbana de la parroquia 28 de mayo.



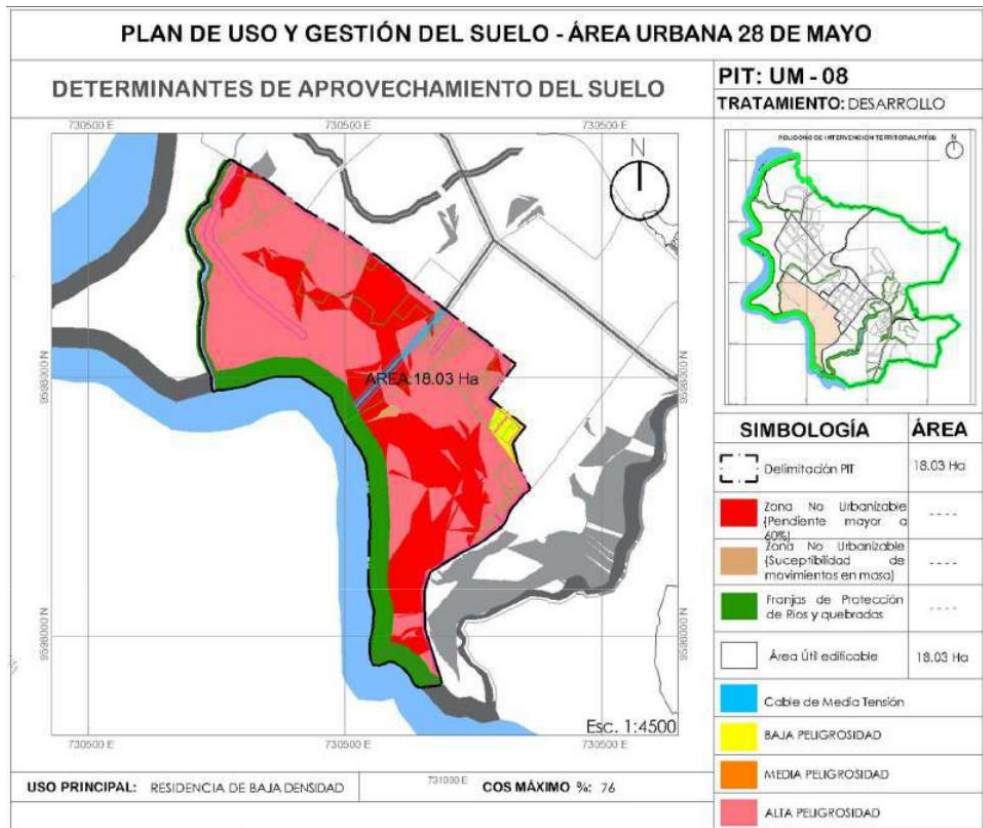
- **Mapa del Polígono de Intervención Territorial UM-05**, correspondiente al área urbana de la parroquia 28 de mayo.



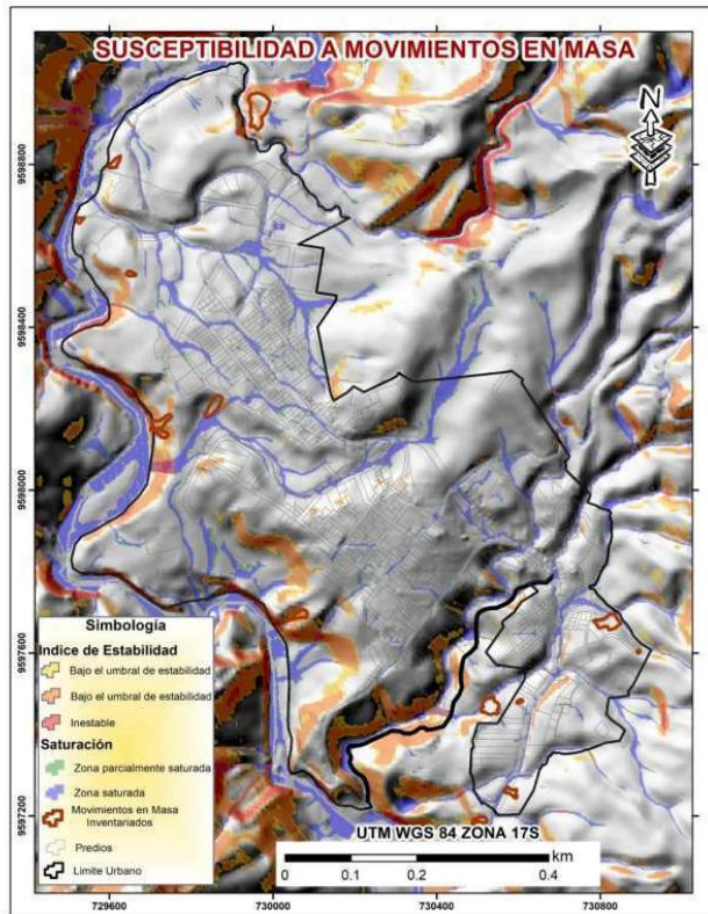
- **Mapa del Polígono de Intervención Territorial UM-07.** En el área urbana de la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi. Se muestran zonas de riesgo por pendiente y deslizamientos, franjas de protección ribereña y áreas aptas para edificación.



- **Mapa del Polígono de Intervención Territorial UM-08.** En la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi. Se identifica la zonificación del uso del suelo urbano, destacando áreas no urbanizables por pendiente >60 %, franjas de protección ribereña, zonas con riesgo de deslizamientos y áreas edificables.

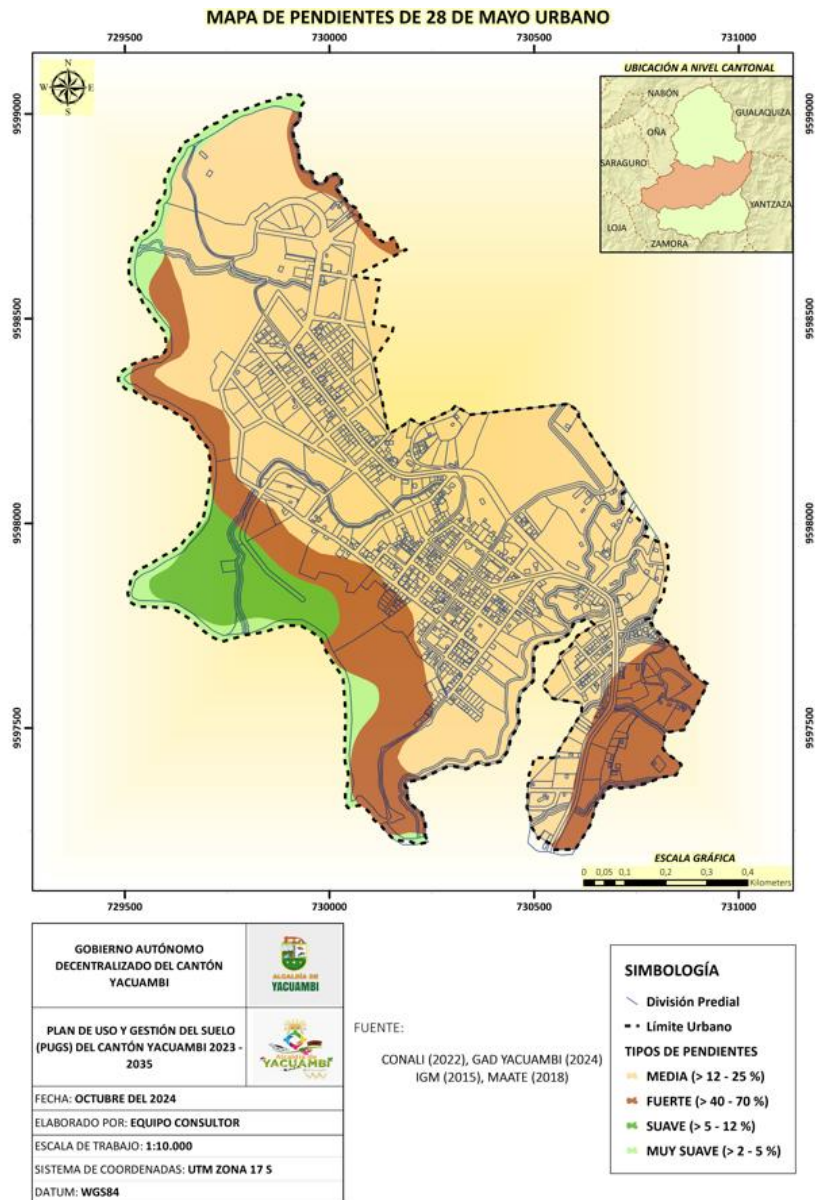


Anexo 3: Susceptibilidad de movimiento de masa (PUGS, 2023) del cantón Yacuambi, parroquia 28 de Mayo.



Fuente y Elaboración: PUGS 2022.

Anexo 4: Mapa de pendientes del área urbana del cantón Yacuambi, parroquia 28 de mayo.



Anexo 5: Sistema de alcantarillado pluvial actual

Red 1

Tramo	Incremento de área 1		Área Parcial 2		A.Total	Longitud	Cota de terreno	Cota de Proyecto	C.Pro	Tiempo de concentración (min)	Intensidad (mm/h)	Q pluvial (l/s)	Pendiente	Diámetro Inicial	Tubo Lleno			Relaciones Hidráulicas			Valores Reales		Chequeo		
	m2	ha	m2	ha	ha										Velocidad (m/s)	Caudal (m3/s)	Rh	Q/Qo	y/D	V/Vo	Vr	y	Veloc	y/D=0,85	
P4 P10	1120	0.112	0	0	0.112	40.800	1145.08 1143.34	1142.93 1141.19	0.56	1.116	10	140.55	24.48893333	0.044	0.250	4.692	0.230	0.063	0.11	0.253	0.553	2.585	0.063	OK	OK
P10 P10	1100	0.11	1120	0.112	0.222	31.820	1143.34 1141.97	1141.19 1139.82	0.56	0.94	10	140.55	48.5366	0.043	0.250	4.668	0.229	0.063	0.21	0.432	0.740	3.455	0.108	OK	OK
P10 P15	1140	0.114	2220	0.222	0.336	67.190	1141.97 1136.10	1139.82 1133.95	0.56	1.272	10	140.55	73.4608	0.087	0.250	6.650	0.326	0.063	0.23	0.842	1.029	6.843	0.211	OK	OK
P15 P21	3100	0.31	3360	0.336	0.646	20.670	1136.10 1133.27	1133.95 1131.12	0.56	0.432	10	140.55	141.2371333	0.137	0.250	8.325	0.409	0.063	0.35	0.361	0.664	5.528	0.090	OK	OK
P21 P22	1128	0.113	6460	0.646	0.759	46.380	1133.27 1125.90	1131.12 1123.75	0.56	0.76	10	140.55	165.8899733	0.159	0.250	8.969	0.440	0.063	0.38	0.568	0.866	7.767	0.142	NO	OK
P22 P32	1500	0.15	7588	0.759	0.909	69.280	1125.90 1117.45	1123.75 1116.25	0.56	1.2	10	140.55	198.6399733	0.108	0.250	7.403	0.363	0.063	0.55	0.417	0.724	5.359	0.104	OK	OK
P20 P32	1928	0.193	0	0	0.193	46.410	1130.88 1119.60	1128.65 1117.45	0.56	0.647	10	140.55	42.15250867	0.241	0.250	11.052	0.543	0.063	0.08	0.148	0.398	4.399	0.037	OK	OK
P32 P33	4010	0.401	1928	0.193	0.594	50.860	1119.60 1114.05	1117.45 1111.90	0.56	0.943	10	140.55	129.8244733	0.109	0.250	7.432	0.385	0.063	0.36	0.334	0.636	4.727	0.084	OK	OK
P33 P34	1710	0.171	7438	0.744	0.915	63.230	1114.05 1105.53	1111.90 1103.38	0.56	1.028	10	140.55	200.0057733	0.135	0.250	8.259	0.405	0.063	0.49	0.495	0.806	6.657	0.124	OK	OK
P34 P35	2760	0.276	9148	0.915	1.191	44.630	1105.53 1105.72	1103.23 1102.92	0.56	1.761	10	140.55	260.3485733	0.016	0.400	3.908	0.491	0.100	0.53	0.482	0.792	3.095	0.193	OK	OK

P36 P37	1220	0.122	0	0	0.122	32.250	1135.19 1132.62	1133.84 1130.47	0.56	0.749	10	140.55	26.67326667	0.080	0.250	6.351	0.312	0.063	0.09	0.475	0.785	4.986	0.119	OK	OK
P37 P38	3969	0.397	1220	0.122	0.519	31.310	1132.62 1130.07	1130.47 1127.92	0.56	0.726	10	140.55	113.4489367	0.081	0.250	6.421	0.315	0.063	0.36	0.495	0.806	5.175	0.124	OK	OK
P38 P41	1960	0.196	5189	0.519	0.715	33.050	1130.07 1127.31	1127.92 1125.16	0.56	0.75	10	140.55	156.30097	0.084	0.250	6.502	0.319	0.063	0.49	0.393	0.699	4.545	0.098	OK	OK
P39 P40	16700	1.67	0	0	1.67	29.060	1130.94 1134.67	1126.79 1132.52	0.56	0.546	10	140.55	365.1176667	0.147	0.250	8.624	0.423	0.063	0.86	0.377	0.681	5.873	0.094	OK	OK
P40 P41	690	0.069	16700	1.67	1.739	45.320	1134.67 1127.31	1133.57 1125.09	0.56	0.701	10	140.55	380.2033667	0.187	0.315	11.353	0.895	0.079	0.43	0.755	0.993	11.274	0.238	NO	OK
P41 P42	3790	0.379	19350	1.935	2.314	35.830	1127.31 1121.53	1125.09 1119.31	0.56	0.619	10	140.55	505.9175333	0.161	0.315	10.542	0.822	0.079	0.62	0.811	1.019	10.742	0.255	NO	OK
P42 P43	440	0.044	23140	2.314	2.358	82.200	1121.53 1116.68	1119.31 1114.46	0.56	1.729	10	140.55	515.5374	0.059	0.315	6.375	0.497	0.079	1.04	0.253	0.553	3.526	0.080	OK	OK
P43 P44	3360	0.336	23580	2.358	2.694	55.960	1116.68 1111.85	1114.38 1109.55	0.56	1.11	10	140.55	588.9982	0.086	0.400	9.042	1.136	0.100	0.52	0.316	0.616	5.570	0.126	OK	OK
P44 P45	3250	0.325	26940	2.694	3.019	69.690	1111.85 1105.72	1109.55 1103.42	0.56	1.305	10	140.55	660.0540333	0.088	0.400	9.128	1.147	0.100	0.58	0.502	0.813	7.421	0.201	NO	OK
P45 PS	9580	0.958	32950	3.295	4.253	20.000	1105.72 1100.00	1103.42 #####	0.56	0.317	10	140.55	929.8475667	0.286	0.400	16.460	2.068	0.100	0.45	0.715	0.971	15.982	0.286	NO	OK

Red 2

Tramo	Incremento de área 1		Área Parcial 2		A.Total	Longitud	Cota de terreno	Cota de Proyecto	C.Pro	Tiempo de concentración (min)	Intensidad (mm/h)	Q pluvial (l/s)	Pendiente	Diámetro Inicial	Tubo Lleno			Relaciones Hidráulicas			Valores Reales		Chequeo		
	m2	ha	m2	ha	ha										Velocidad (m/s)	Caudal (m3/s)	Rh	Q/Qo	y/D	V/Vo	Vr	y	Veloc	y/D=0,85	
P11 P16	2100	0.21	0	0	0.21	68.200	1142.49 1133.60	1140.34 1131.45	0.56	1.1034	10	140.55	45.913	0.130	0.250	8.123	0.399	0.063	0.12	0.253	0.553	4.492	0.063	OK	OK
P16 P23	3430	0.34	2100	0.21	0.553	71.190	1133.60 1124.17	1131.45 1122.02	0.56	1.1334	10	140.55	120.9	0.132	0.250	8.188	0.402	0.063	0.30	0.432	0.740	6.059	0.108	OK	OK
P23 P24	3020	0.3	5530	0.553	0.855	65.420	1124.17 1124.96	1121.87 1121.36	0.56	3.1606	10	140.55	186.33	0.008	0.400	2.717	0.341	0.100	0.55	0.842	1.029	2.796	0.337	OK	OK
P12 P17	3600	0.36	0	0	0.36	67.220	1140.86 1133.01	1138.71 1130.86	0.56	1.1383	10	140.55	78.708	0.117	0.250	7.688	0.377	0.063	0.21	0.361	0.664	5.105	0.090	OK	OK
P17 P24	3850	0.37	3600	0.36	0.725	68.330	1133.01 1124.96	1130.86 1122.61	0.56	1.1489	10	140.55	158.51	0.118	0.250	7.722	0.379	0.063	0.42	0.568	0.866	6.688	0.142	OK	OK
P24 P27	4312	0.43	7250	0.725	1.1582	67.450	1124.96 1116.62	1121.36 1114.32	0.56	1.1918	10	140.55	252.78	0.104	0.400	9.943	1.250	0.100	0.20	0.417	0.724	7.199	0.167	NO	OK
P27 P28	2520	0.25	11562	1.156	1.4082	69.370	1116.62 1115.55	1114.32 1112.35	0.56	2.0101	10	140.55	307.88	0.028	0.250	3.791	0.186	0.063	1.65	0.446	0.755	2.863	0.112	OK	OK
P28 P29	4516	0.45	14082	1.408	1.8598	74.000	1115.55 1115.55	1112.35 1112.35	0.56	2.9283	10	140.55	406.61	0.012	0.250	2.481	0.122	0.063	3.34	0.475	0.785	1.948	0.119	OK	OK
P7 P13	1260	0.13	0	0	0.126	69.640	1133.34 1134.92	1137.19 1137.77	0.56	1.4793	10	140.55	27.548	0.063	0.250	5.668	0.278	0.063	0.10	0.148	0.398	2.256	0.037	OK	OK
P13 P18	2710	0.27	1260	0.126	0.397	66.010	1134.92 1130.53	1137.77 1128.31	0.56	1.3858	10	140.55	86.797	0.068	0.315	6.822	0.532	0.079	0.16	0.334	0.636	4.339	0.105	OK	OK

P18 P25	3620	0.36	3970	0.397	0.753	68.980	1130.53 1124.23	1126.31 1122.01	0.56	1.2765	10	140.55	165.94	0.091	0.315	7.932	0.618	0.079	0.27	0.495	0.806	6.393	0.156	OK	OK
P25 P28	2976	0.3	7590	0.759	1.0566	67.200	1124.23 1115.55	1122.01 1113.33	0.56	1.0946	10	140.55	231.01	0.129	0.315	9.433	0.735	0.079	0.31	0.482	0.792	7.471	0.152	NO	OK
P28 P29	4516	0.45	10566	1.057	1.5082	67.200	1124.23 1115.55	1122.01 1113.33	0.56	1.0946	10	140.55	329.74	0.129	0.250	8.086	0.397	0.063	0.83	0.509	0.820	6.630	0.127	OK	OK
P9 P14	837	0.08	0	0	0.0837	78.550	1128.23 1121.78	1126.08 1119.63	0.56	1.4698	10	140.55	18.3	0.082	0.250	6.447	0.316	0.063	0.06	0.264	0.564	3.636	0.066	OK	OK
P14 P19	3611	0.36	837	0.084	0.4448	67.370	1121.78 1118.98	1119.63 1116.83	0.56	1.6973	10	140.55	97.248	0.042	0.250	4.587	0.225	0.063	0.43	0.475	0.785	3.601	0.119	OK	OK
P19 P26	3690	0.37	4448	0.445	0.8138	70.130	1118.98 1117.13	1116.76 1114.91	0.56	2.0854	10	140.55	177.32	0.026	0.315	4.263	0.332	0.079	0.54	0.495	0.806	3.436	0.156	OK	OK
P26 P29	3800	0.38	8138	0.814	1.1938	67.010	1117.12 1112.04	1114.90 1109.66	0.56	1.3252	10	140.55	261	0.078	0.315	7.339	0.572	0.079	0.46	0.393	0.699	5.190	0.124	OK	OK
P29 P30	4177	0.42	11938	1.194	1.6115	26.910	1112.04 1108.93	1109.66 1106.55	0.56	0.5648	10	140.55	352.33	0.116	0.475	11.733	2.079	0.119	0.17	0.377	0.681	7.990	0.179	NO	OK
P30 P31	2358	0.24	16115	1.612	1.8473	25.560	1108.93 1105.49	1106.55 1103.11	0.56	0.5119	10	140.55	403.89	0.135	0.475	12.662	2.244	0.119	0.18	0.755	0.993	12.573	0.359	NO	OK
P31 P32L	1801	0.18	29039	2.904	3.084	22.980	1105.49 1102.43	1103.11 1100.05	0.56	0.4736	10	140.55	674.27	0.133	0.475	12.594	2.232	0.119	0.30	0.811	1.019	12.834	0.385	NO	OK
P32L P33L	1801	0.18	45922	4.592	4.7723	17.730	1102.43 1102.26	1100.05 1098.58	0.56	0.4855	10	140.55	1043.4	0.083	0.475	9.938	1.761	0.119	0.59	0.842	1.029	10.226	0.400	NO	OK

Red 3 y 4

Tramo	Incremento de Área 1		Área Parcial 2		A.Total	Longitud	Cota de terreno	Cota de Proyecto	C.Prom	Temperatura concentración		Intensidad (mm/h)	Q pluviál (l/s)	Pendiente	Diámetro Inicial	Tubo Lleno			Relaciones Hidráulicas			Valores Reales		Chequeo	
	m2	ha	m2	ha	ha					Calculado	Asumido					Velocidad (m/s)	Costal (m3/s)	Rh	Q/Do	y/D	V/Vo	Vr	v	Veloc	y/D=0.85
P1 P2	6700	0.67	0	0	0.67	70.000	1145.57 1137.07	1143.35 1134.85	0.56	1.15690197	10	140.55	146.4843333	0.121	0.315	9.146	0.713	0.079	0.21	0.253	0.553	5.058	0.080	OK	OK
P2 P3	22160	2.216	6700	0.67	2.886	87.730	1137.07 1127.93	1134.77 1125.63	0.56	1.46018007	10	140.55	630.9758	0.104	0.400	9.934	1.248	0.100	0.51	0.492	0.740	7.351	0.173	NO	OK
P3 P33	9097	0.9097	28860	2.886	3.7957	15.000	1127.93 1124.00	1125.63 1121.70	0.56	0.26277188	10	140.55	829.8665433	0.262	0.400	15.754	1.980	0.100	0.42	0.842	1.029	16.211	0.337	NO	OK
P8 P8L	539	0.0539	0	0	0.0539	45.780	1131.06 1128.12	1128.76 1125.82	0.56	1.06610855	10	140.55	11.78433667	0.064	0.300	6.438	0.455	0.075	0.03	0.361	0.664	4.275	0.108	OK	OK
P8L P53	2160	0.216	9636	0.964	1.1796	15.000	1128.12 1124.00	1125.82 1121.70	0.56	0.25803855	10	140.55	257.89988	0.275	0.400	16.190	2.027	0.100	0.13	0.568	0.866	13.969	0.227	NO	OK

Anexo 6: Información sobre los parámetros de creación de subcuencas obtenida mediante el uso del software ArcGIS.

ArcGIS es un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permite realizar análisis espaciales y modelaciones hidrológicas de alta precisión. Una de sus funciones más utilizadas dentro del análisis hidrológico es la generación de subcuencas a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), que representa la topografía del terreno mediante una malla de celdas con valores de elevación.

El procedimiento de delimitación de cuencas en ArcGIS se llevó a cabo empleando las herramientas del módulo Spatial Analyst Tools Hydrology, las cuales permiten analizar el flujo superficial y la dirección natural del escurrimiento del agua sobre el terreno. El proceso se desarrolló de la siguiente manera:

Relleno de depresiones (Fill): Se aplicó la herramienta Fill para eliminar las irregularidades o “sumideros” presentes en el modelo digital de elevación. Estas depresiones suelen ser producto

de errores en los datos topográficos y pueden interrumpir la continuidad del flujo de agua. El algoritmo de relleno ajusta las elevaciones de las celdas deprimidas para garantizar una superficie hidrológicamente correcta.

Dirección del flujo (Flow Direction): Con la herramienta Flow Direction, se determinó la dirección del flujo de agua desde cada celda hacia sus vecinas, utilizando el algoritmo D8 (Eight Direction Pour Point Model). Este método define que el flujo puede moverse hacia una de las ocho celdas adyacentes, escogiendo siempre la dirección de pendiente máxima descendente. De esta forma, se simula cómo el agua se desplaza naturalmente sobre la superficie terrestre.

Acumulación del flujo (Flow Accumulation): Posteriormente, se generó un mapa de acumulación de flujo mediante la herramienta Flow Accumulation. Este paso permite identificar las zonas donde convergen los escurrimientos, lo cual es fundamental para determinar el trazado de cauces principales y secundarios. Las celdas con valores más altos representan puntos donde se concentra un mayor volumen de agua superficial.

Puntos de salida o vertederos (Pour Point): Se definieron los puntos de salida o de concentración del flujo (outlets) dentro del área de estudio. Estos puntos representan las ubicaciones donde el agua abandona una cuenca o subcuenca específica, y son esenciales para iniciar la delimitación automática.

Delimitación de subcuencas (Basin o Watershed): Finalmente, se utilizó la herramienta Basin (o Watershed) para delimitar las áreas de drenaje que vierten hacia cada punto de salida previamente definido. ArcGIS analiza la superficie corregida y el flujo acumulado para generar polígonos que representan las subcuencas hidrográficas, mostrando de forma precisa los límites naturales del escurrimiento dentro de la zona urbana de estudio.

Este procedimiento permitió obtener una división detallada de las subcuencas que componen la parroquia 28 de Mayo, cantón Yacuambi, lo que sirvió como base para el análisis hidrológico posterior y la modelación pluvial en el software EPA SWMM. Los resultados obtenidos aseguran una adecuada representación del comportamiento del escurrimiento superficial en el área urbana, considerando las condiciones topográficas reales del terreno.

Anexo 7: Aporte caudal de escorrentía en nodos del sistema actual.

Summary Results								
Topic: Node Inflow <input type="text"/> Click a column header to sort the column.								
Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Total Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Flow Balance Error %
1	JUNCTION	237.53	237.53	0	00:35	0.315	0.315	0.188
10	JUNCTION	43.66	137.91	0	00:35	0.0558	0.18	0.251
10L	JUNCTION	53.42	94.87	0	00:35	0.0702	0.124	0.261
11	JUNCTION	78.13	78.13	0	00:35	0.0985	0.0985	0.183
12	JUNCTION	126.63	126.63	0	00:35	0.162	0.162	0.154
13	JUNCTION	98.27	145.37	0	00:35	0.129	0.19	0.355
14	JUNCTION	126.30	158.00	0	00:35	0.169	0.21	0.479
15	JUNCTION	113.24	249.31	0	00:35	0.148	0.327	0.158
16	JUNCTION	129.33	206.78	0	00:35	0.166	0.265	0.262
17	JUNCTION	136.35	262.07	0	00:35	0.176	0.338	0.238
18	JUNCTION	101.40	245.00	0	00:35	0.144	0.334	0.326
19	JUNCTION	138.36	292.52	0	00:35	0.176	0.385	0.419
2.	JUNCTION	595.56	831.45	0	00:35	0.913	1.23	0.315
20	JUNCTION	74.55	74.55	0	00:35	0.0952	0.0952	0.090
21	JUNCTION	43.45	291.85	0	00:35	0.0555	0.382	0.112
22	JUNCTION	55.79	346.85	0	00:35	0.0722	0.454	0.223
23	JUNCTION	91.19	296.38	0	00:35	0.132	0.396	0.651
24	JUNCTION	158.71	703.94	0	00:35	0.206	0.937	0.301
25	JUNCTION	130.69	372.90	0	00:35	0.166	0.498	0.246
26	JUNCTION	132.12	417.77	0	00:35	0.168	0.551	0.270
27	JUNCTION	84.17	786.93	0	00:35	0.115	1.05	0.344

Summary Results								
Topic: Node Inflow <input type="text"/> Click a column header to sort the column.								
Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Total Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Flow Balance Error %
27	JUNCTION	84.17	786.93	0	00:35	0.115	1.05	0.344
28	JUNCTION	168.57	1024.31	0	00:32	0.218	1.68	0.415
29	JUNCTION	155.36	1554.34	0	00:35	0.201	2.43	0.185
3.	JUNCTION	318.17	1123.20	0	00:35	0.424	1.65	0.192
30	JUNCTION	29.78	1584.32	0	00:35	0.0381	2.46	0.065
31	JUNCTION	42.88	1402.93	0	00:35	0.0548	2.46	0.060
32	JUNCTION	152.81	486.08	0	00:35	0.196	0.726	0.258
32L	JUNCTION	33.36	1436.21	0	00:35	0.0427	2.5	0.048
33.	JUNCTION	65.80	366.71	0	00:31	0.084	0.721	0.170
33L	JUNCTION	0.00	1436.18	0	00:35	0	2.5	0.054
34.	JUNCTION	94.33	414.61	0	00:32	0.127	0.84	0.350
34L	JUNCTION	0.00	1444.12	0	00:33	0	2.5	0.067
35.	JUNCTION	264.27	1397.01	0	00:35	0.4	2.4	0.185
35L	JUNCTION	0.00	1454.61	0	00:33	0	2.49	0.081
36	JUNCTION	29.48	29.48	0	00:35	0.0393	0.0393	0.140
36L	JUNCTION	0.00	1461.50	0	00:33	0	2.49	0.053
37	JUNCTION	89.83	119.22	0	00:35	0.15	0.19	0.219
38	JUNCTION	58.74	177.56	0	00:35	0.0852	0.274	0.214
39	JUNCTION	214.26	214.26	0	00:40	0.371	0.371	0.082
4.	JUNCTION	41.80	41.80	0	00:35	0.054	0.054	0.187
40	JUNCTION	26.46	240.47	0	00:35	0.0338	0.405	0.172

Summary Results								
Topic: Node Inflow <input type="text"/> Click a column header to sort the column.								
Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10^6 ltr	Total Inflow Volume 10^6 ltr	Flow Balance Error %
35.	JUNCTION	264.27	1397.01	0	00:35	0.4	2.4	0.185
35L	JUNCTION	0.00	1454.61	0	00:33	0	2.49	0.081
36	JUNCTION	29.48	29.48	0	00:35	0.0393	0.0393	0.140
36L	JUNCTION	0.00	1461.50	0	00:33	0	2.49	0.053
37	JUNCTION	89.83	119.22	0	00:35	0.15	0.19	0.219
38	JUNCTION	58.74	177.56	0	00:35	0.0852	0.274	0.214
39	JUNCTION	214.26	214.26	0	00:40	0.371	0.371	0.082
4.	JUNCTION	41.80	41.80	0	00:35	0.054	0.054	0.187
40	JUNCTION	26.46	240.47	0	00:35	0.0338	0.405	0.172
41	JUNCTION	119.31	536.04	0	00:35	0.169	0.846	0.205
42	JUNCTION	17.17	548.70	0	00:35	0.0223	0.867	0.217
43	JUNCTION	122.60	667.13	0	00:35	0.16	1.03	0.216
44	JUNCTION	112.76	776.82	0	00:35	0.151	1.17	0.246
7.	JUNCTION	47.69	47.69	0	00:35	0.0612	0.0612	0.261
8	JUNCTION	20.94	20.94	0	00:35	0.0267	0.0267	0.271
8L	JUNCTION	78.16	98.79	0	00:35	0.102	0.129	0.177
9	JUNCTION	32.20	32.20	0	00:35	0.0411	0.0411	0.306
D-1	OUTFALL	0.00	1397.01	0	00:35	0	2.4	0.000
D-2	OUTFALL	0.00	1473.24	0	00:33	0	2.49	0.000
D-3	OUTFALL	0.00	98.63	0	00:35	0	0.129	0.000
D-4	OUTFALL	0.00	1123.19	0	00:35	0	1.64	0.000

- Aporte de caudales en los conductos del alcantarillado existente

Summary Results							
Topic: Link Flow <input type="text"/> Click a column header to sort the column.							
Link	Type	Maximum [Flow] LPS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
2	CONDUIT	137.48	0	00:35	4.52	0.54	0.59
3	CONDUIT	41.60	0	00:35	2.09	0.24	0.43
4	CONDUIT	94.80	0	00:35	3.67	0.53	0.52
5	CONDUIT	249.09	0	00:35	6.66	0.78	0.72
6	CONDUIT	292.05	0	00:35	6.37	0.85	0.88
7	CONDUIT	259.04	0	00:34	5.28	1.00	1.00
8	CONDUIT	74.39	0	00:35	2.25	0.17	0.64
9	CONDUIT	326.97	0	00:31	6.69	1.15	1.00
10	CONDUIT	342.30	0	00:31	7.06	1.06	1.00
11	CONDUIT	414.67	0	00:32	3.40	1.28	1.00
12	CONDUIT	29.39	0	00:35	1.90	0.12	0.35
13	CONDUIT	119.10	0	00:35	4.19	0.45	0.56
15	CONDUIT	177.40	0	00:35	4.30	0.76	0.83
16	CONDUIT	214.25	0	00:40	7.62	0.65	0.56
17	CONDUIT	240.24	0	00:35	5.50	0.36	0.62
18	CONDUIT	532.43	0	00:35	7.60	0.84	0.91
19	CONDUIT	548.71	0	00:35	7.49	1.13	0.90
20	CONDUIT	667.02	0	00:35	7.52	0.72	0.68
21	CONDUIT	777.92	0	00:35	6.75	0.81	0.86
22	CONDUIT	77.76	0	00:35	3.50	0.25	0.46
23	CONDUIT	205.61	0	00:35	4.93	0.64	0.79

Summary Results

Topic: Link Flow Click a column header to sort the column.

Link	Type	Maximum [Flow] LPS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
23	CONDUIT	205.61	0	00:35	4.93	0.64	0.79
24	CONDUIT	294.29	0	00:35	2.82	1.11	0.80
25	CONDUIT	126.11	0	00:35	4.37	0.43	0.57
26	CONDUIT	260.74	0	00:35	5.92	0.81	0.84
27	CONDUIT	47.35	0	00:35	2.46	0.21	0.42
30	CONDUIT	704.56	0	00:35	6.34	0.72	0.83
31	CONDUIT	144.38	0	00:35	4.17	0.35	0.46
32	CONDUIT	244.24	0	00:35	5.75	0.51	0.54
33	CONDUIT	372.31	0	00:35	5.69	0.61	0.78
34	CONDUIT	606.08	0	00:32	4.82	1.20	1.00
35	CONDUIT	998.45	0	00:35	6.18	1.10	1.00
36	CONDUIT	31.90	0	00:35	1.36	0.13	0.56
37	CONDUIT	155.14	0	00:36	3.43	0.87	0.95
38	CONDUIT	286.31	0	00:35	3.93	1.11	1.00
39	CONDUIT	405.35	0	00:35	5.30	0.91	1.00
40	CONDUIT	1554.87	0	00:35	8.96	0.96	1.00
41	CONDUIT	1360.07	0	00:35	11.41	1.23	0.91
42	CONDUIT	1402.90	0	00:35	10.76	0.80	0.69
43	CONDUIT	1436.18	0	00:35	10.55	0.84	0.73
44	CONDUIT	1444.12	0	00:33	10.33	0.89	0.74
45	CONDUIT	1454.61	0	00:33	10.51	0.89	0.74

Topic: Link Flow Click a column header to sort the column.

Link	Type	Maximum [Flow] LPS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
33	CONDUIT	372.31	0	00:35	5.69	0.61	0.78
34	CONDUIT	606.08	0	00:32	4.82	1.20	1.00
35	CONDUIT	998.45	0	00:35	6.18	1.10	1.00
36	CONDUIT	31.90	0	00:35	1.36	0.13	0.56
37	CONDUIT	155.14	0	00:36	3.43	0.87	0.95
38	CONDUIT	286.31	0	00:35	3.93	1.11	1.00
39	CONDUIT	405.35	0	00:35	5.30	0.91	1.00
40	CONDUIT	1554.87	0	00:35	8.96	0.96	1.00
41	CONDUIT	1360.07	0	00:35	11.41	1.23	0.91
42	CONDUIT	1402.90	0	00:35	10.76	0.80	0.69
43	CONDUIT	1436.18	0	00:35	10.55	0.84	0.73
44	CONDUIT	1444.12	0	00:33	10.33	0.89	0.74
45	CONDUIT	1454.61	0	00:33	10.51	0.89	0.74
46	CONDUIT	1461.50	0	00:33	13.07	0.80	0.62
47	CONDUIT	20.76	0	00:35	1.39	0.08	0.26
48	CONDUIT	236.57	0	00:35	3.72	0.54	0.76
49	CONDUIT	813.22	0	00:35	6.57	1.02	1.00
L-53	CONDUIT	1397.01	0	00:35	11.12	1.30	1.00
L-54	CONDUIT	1473.24	0	00:33	16.55	0.50	0.50
L-55	CONDUIT	98.63	0	00:35	4.04	0.14	0.25
L-56	CONDUIT	1123.19	0	00:35	8.94	1.38	1.00

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Talia Beatriz Morocho Paquí** portador de la cédula de ciudadanía N.º 1900959188. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Propuesta de implementación de un sistema de drenaje con enfoque de sostenibilidad para la zona urbana del cantón Yacuambi”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 02 de diciembre de 2025

F: 
Talia Beatriz Morocho Paquí
1900959188