

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Fanny Brenes Bonilla, Ing. Maikel Méndez Morales, Ing. José Andrés Araya Obando, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

Ing. Fanny Brenes Bonilla.
Profesora Guía

Ing. Maikel Méndez Morales.
Profesor Lector

Ing. José Andrés Araya Obando.
Profesor Observador

**Propuesta de diseño
del alcantarillado
pluvial, contemplando
técnicas de drenaje
urbano sostenible para el Barrio
Juanito Mora, del distrito de
Barranca, del cantón central de
Puntarenas**



Abstract

The purpose of this project was to develop the hydraulic design of the storm sewer network for the Juanito Mora neighborhood, located in Barranca de Puntarenas, considering scenarios with sustainable urban drainage techniques.

It was necessary to analyze historical rainfall records to obtain the Intensity-Duration-Frequency equation. A pre-dimensioning was carried out considering uniform flow, and for its hydrological-hydraulic model the SWMM tool was used, then a sensitivity analysis was carried out to various parameters to identify the most influential in the simulation of the network. Also, green roofs and permeable pavements were selected, for which a simulation of the network was carried out and a sensitivity analysis was carried out for some parameters in a similar way.

Based on the results obtained, it is concluded that the most sensitive parameters for the red proposal are the percentage of imperviousness, the curve number, and to a lesser extent, although equally appreciable, the surface coefficients "n" of Manning; in relation to green roofs, greater attention should be paid to porosity and thickness and, to a lesser extent, the conductivity parameter and berm, and with respect to permeable pavements, attention should be paid to the infiltration rate.

In addition, by replacing 35% of the impermeable areas of houses and buildings by green roofs, and 100% of the streets and avenues by permeable pavements, it is possible to reduce surface runoff by more than 50%, and there were no hydraulic capacity problems in the storm sewer network. This shows that the proposed network can be contemplated for a future development.

Keywords: Hydraulic, hydrology, runoff, precipitation, QGIS, green roof, permeable paving, stormsewer, drainage, analysis, sensitivity, SUDS, sustainability.

Resumen

La finalidad del presente proyecto fue elaborar el diseño hidráulico de la red de alcantarillado pluvial para el Barrio Juanito Mora, ubicado en Barranca de Puntarenas, considerando escenarios con técnicas de drenaje urbano sostenible.

Fue necesario analizar registros históricos de precipitación para obtener la ecuación de Intensidad-Duración-Frecuencia. Se realizó un predimensionamiento considerando flujo uniforme, y para su modelo hidrológico-hidráulico se utilizó la herramienta SWMM, seguidamente se llevó a cabo un análisis de sensibilidad a diversos parámetros para identificar los más influyentes en la simulación de la red, además, se seleccionaron los techos verdes y pavimentos permeables, para los cuales se llevó a cabo una simulación de la red y de forma similar se ejecutó un análisis de sensibilidad para algunos parámetros.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los parámetros más sensibles para la red propuesta son el porcentaje de área impermeable, el número de curva y en menor forma, los coeficientes superficiales "n" de Manning; en relación con los techos verdes se debe tener mayor atención a la porosidad y el espesor y, en una menor forma al parámetro de conductividad y la berma, y respecto a los pavimentos permeables se deberá prestar atención a la tasa de infiltración.

Además, al substituir un 35% las áreas impermeables de casas y edificios por techos verdes y, un 100% de las calles y avenidas por pavimentos permeables, se logró reducir en más de un 50% la escorrentía superficial, y no se presentaron problemas de capacidad hidráulica en la red de drenaje pluvial. De esta manera se comprueba que la red propuesta puede contemplarse para un futuro desarrollo.

Palabras claves: Hidráulica, hidrología, escorrentía, precipitación, QGIS, techo verde, pavimentos permeables, alcantarillado, drenaje, análisis, sensibilidad, SUDS, sostenibilidad.

Propuesta de diseño del alcantarillado pluvial, contemplando técnicas de drenaje urbano sostenible para el Barrio Juanito Mora, del distrito de Barranca, del cantón central de Puntarenas.

LUIS CARLOS LORÍA VARELA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre de 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Índice de figuras.....	1
Índice de tablas.....	2
Prefacio.....	4
Resumen ejecutivo.....	6
Introducción.....	9
Marco conceptual.....	11
Metodología	37
Resultados	51
Análisis de resultados	68
Conclusiones.....	80
Recomendaciones	80
Apéndice	81
Anexos	98
Bibliografía	106

Índice de figuras

Figura 1. Cuenca natural vs. cuenca urbana.....	12
Figura 2. Sección de tubería con flujo uniforme.....	17
Figura 3. Tubería de sección circular.....	18
Figura 4. Modelo conceptual de los principales módulos de SWMM.....	20
Figura 5. Modelo conceptual del módulo superficial.....	21
Figura 6. Componentes de un área de biorretención.....	28
Figura 7. Componentes de las cunetas verdes.....	29
Figura 8. Componentes de los depósitos de detención.....	29
Figura 9. Componentes de los depósitos de infiltración.....	30
Figura 10. Componentes de los depósitos de lluvia.....	30
Figura 11. Componentes de los estanques de retención.....	31
Figura 12. Componentes de las franjas filtrantes.....	32
Figura 13. Componentes de los humedales artificiales.....	32
Figura 14. Componentes de los pozos de infiltración.....	33
Figura 15. Componentes de las zanjas de infiltración.....	34
Figura 16. Componentes de las superficies permeables.....	34
Figura 17. Componentes de los techos verdes.....	35
Figura 18. Infraestructura verde presente en SWMM.....	36
Figura 19. Cambio en el concepto de áreas al utilizar el módulo LID de SWMM.....	36
Figura 20. Cuenca del Río Barranca, y ubicación de estaciones meteorológicas cercanas a la zona.....	38
Figura 21. Ubicación de la zona de estudio.....	42
Figura 22. Ancho característico en un plano.....	44
Figura 23. Configuraciones para el flujo entre subáreas.....	45
Figura 24. Modificación del área y ancho de una subcuenca al utilizar techos verdes en el SWMM.....	48
Figura 25. Curvas IDF para la estación 78027, Puntarenas.....	52
Figura 26. Hietograma de intensidades para períodos de retorno de 5, 10 y 25 años.....	53
Figura 27. Modelo digital de elevaciones a partir del levantamiento topográfico.....	54
Figura 28. Direcciones de flujo en Juanito Mora.....	54
Figura 29. Pendientes del terreno.....	55

Figura 30. Trazado de la red de alcantarillado pluvial en Juanito Mora.	55
Figura 31. Áreas de drenaje.	56
Figura 32. Clasificación superficial de las áreas de drenaje.....	56
Figura 33. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y de cálculo hidráulico.	60
Figura 34. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y cálculo hidráulico para techos verdes.....	65
Figura 35. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y cálculo hidráulico para pavimentos permeables.....	66
Figura 36. Capacidad de conductos, con el pre-dimensionamiento.	71
Figura 37. Variación de áreas impermeables de la red, sin SUDS y con techos verdes, y pavimentos permeables.....	73
Figura 38. Variación de infiltración y escorrentía superficial para cada subcuenca.	74
Figura 39. Variación en la capacidad de las tuberías.....	75
Figura 40. Variación de las velocidades en las tuberías	75
Figura 41. Variación en la distribución de tubería al reducir diámetros	76
Figura 42. Variación del hidrograma del sistema sin/con SUDS.	76
Figura 43. Variación de parámetros por escenario en la red pluvial.....	77

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de coeficiente de escorrentía para diversos períodos de retorno	16
Tabla 2. Valores recomendados de coeficiente de rugosidad para distintos materiales.....	18
Tabla 3. Coeficiente n de Manning para distintas superficies	22
Tabla 4. Valores recomendados de almacenamiento en depresiones.....	22
Tabla 5. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana...	24
Tabla 6. Valores de porcentaje de impermeabilidad para diferentes usos de suelo.	45
Tabla 7. Rango de variación inicial, mínimo y máximo de los parámetros para el análisis de sensibilidad.	47
Tabla 8. Rango de variación inicial, mínimo y máximo de los parámetros de techo verde y pavimento permeable para el análisis de sensibilidad.....	49
Tabla 9. Valores de Intensidad-Duración-Frecuencia para el registro de datos de la estación 78027, Puntarenas.....	51
Tabla 10. Intensidades alternadas (mm) para diversas duraciones y períodos de retorno.	52
Tabla 11. Características generales del trazado de las redes pluviales.	57
Tabla 12. Diámetros comerciales por utilizar	57
Tabla 13. Coeficientes de escorrentía a utilizar por tipo de superficie.	57
Tabla 14. Variación de áreas de drenaje, tiempo de concentración, intensidad y caudal para cada red pluvial.....	57
Tabla 15. Variación de parámetros hidráulicos para ambas redes pluviales.	57
Tabla 16. Valores relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y del tránsito hidráulico.	58
Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.....	58
Tabla 18. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros, en relación con el error relativo y la continuidad del cálculo hidráulico.....	59
Tabla 19. Nuevo porcentaje de área impermeable al utilizar techos verdes, y con pavimentos permeables en la red 3.....	61
Tabla 20. Nuevo porcentaje de área impermeable y cantidad de techo verde a colocar en la red 8.	61
Tabla 21. Valores relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y del tránsito hidráulico para los escenarios con techos verdes y pavimentos permeables.....	63
Tabla 22. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de techos verdes, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.	63

Tabla 23. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de techos verdes, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de tránsito hidráulico.	64
Tabla 24. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de pavimentos permeables, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.	65
Tabla 25. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de pavimentos permeables, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de tránsito hidráulico.	65
Tabla 26. Costo de referencia, para el escenario base, con techos verdes y pavimentos permeables, con reducción de diámetros.	67
Tabla 27. Diferencia de intensidades entre la estación 78027 y la investigación de Vahrson y Alfaro (1992), para una duración de 5 min y diversos períodos de retorno.	69
Tabla 28. Variación e indicadores para cada escenario de la red pluvial.	77

Prefacio

En Costa Rica, se puede mencionar que el urbanismo se ha desarrollado en el país de forma desordenada, tal como se hace mención en el PNDIP (MIDEPLAN, 2019), donde incluso un 50% de los cantones carecen de un plan regulador y en el caso de las provincia de Puntarenas, existe uno que cubre parcialmente el cantón según (MIVAH, 2018) y que en múltiples temáticas podría actualizarse; ante esta situación, hay varias comunidades que han observado como el crecimiento urbano también conlleva un aumento de la superficie impermeable y se modifica el ciclo hidrológico de la zona, lo cual puede llevar varias implicaciones, entre estas, que se den problemas por inundaciones a causa del aumento de escorrentía superficial, o se exponga incluso la necesidad de contar con una adecuada red de alcantarillado pluvial.

Hay diversas instituciones y gobiernos locales, que ante estos casos de afectaciones han buscado diferentes medidas para mitigar y a la vez poder brindar una mejor calidad de vida a sus comunidades, por ello, en este caso particular, la Municipalidad de Puntarenas ha respondido al interés de la asociación de desarrollo de Juanito Mora, para buscar propuestas que mitiguen la problemática con las inundaciones.

Debido a esto, el propósito principal del presente proyecto es ayudar a la comunidad de Juanito Mora, mediante una propuesta de diseño de alcantarillado pluvial, que le permita a la Municipalidad de Puntarenas contemplarlo como el inicio de un plan piloto de mejora en infraestructura pública, y que considere escenarios con técnicas de drenaje urbano sostenible enmarcadas dentro de la Guía para Manejo de Agua mediante infraestructuras verdes promovido por la Organización de las Naciones Unidas (PNUMA, 2014), el Plan Nacional de Desarrollo y de Inversión Pública 2019-2022 (MIDEPLAN, 2019); los Objetivos de

Desarrollo Sostenible (ODS); en especial el Objetivo Tres (Salud y Bienestar); Objetivo Seis (Agua Limpia y Saneamiento), Objetivo Nueve (Industria, Innovación e Infraestructura); Objetivo Once (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y el Objetivo Trece (Acción por el Clima), entre otras serie de normativas nacionales encaminadas al cumplimiento de los agenda 20 – 30 (CEPAL, 2018).

En consecuencia, con el desarrollo de la propuesta, se pretende seleccionar y evaluar la utilización de al menos una técnica de drenaje urbano sostenible, y exponer el impacto de esta en la propuesta de la red de alcantarillado pluvial, tanto en la eficacia que podría significar para la red, como los posibles costos y beneficios asociados; tomando en cuenta que a nivel global pueden considerarse a estas técnicas relativamente nuevas, dado que llevan poco tiempo desarrollándose, y que incluso a nivel país se han efectuado pocos trabajos al respecto, por lo que se espera, que este proyecto también sirva de aliciente para que se creen compromisos políticos e institucionales para difundir, promover e incentivar los proyectos de infraestructura verde y lograr una mejor calidad de vida, de acuerdo a lo previsto en los diversos objetivos de desarrollo sostenible. (PNUD, 2017)

Agradecimiento

Quisiera agradecerles a mis padres, Yolanda Varela y Jorge Loría y, a mis hermanos, Jorge, Freddy, Javier y José, por su apoyo y amor incondicional.

A Sylvia Vargas, por todo su apoyo, amor e impulsarme a seguir adelante.

Al personal de la unidad técnica de gestión vial de la Municipalidad de Puntarenas, en especial a la Ing. Gabriela Murillo, Ing. Carolina Vindas y al Ing. José Chan por la confianza y la colaboración con la información requerida.

A mi tutora, Ing. Fanny Brenes Bonilla, por su invaluable confianza, paciencia y generosa colaboración a lo largo de todo el trabajo.

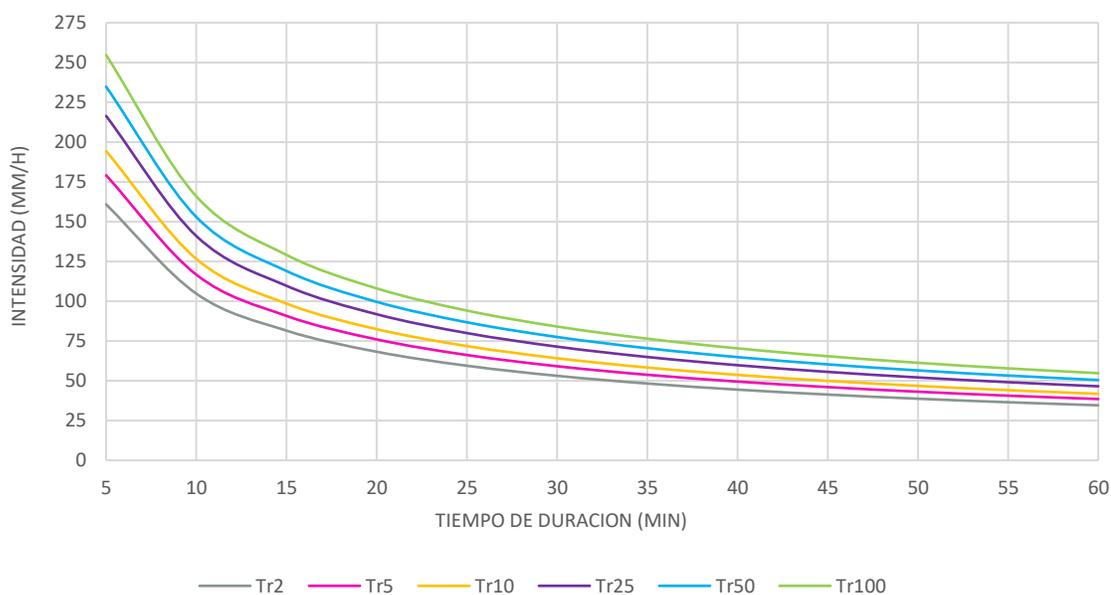
Finalmente, a todos los profesores, técnicos y demás funcionarios del Tecnológico de Costa Rica, que me han acompañado a lo largo de mi carrera universitaria.

Resumen ejecutivo

El estudio y la propuesta realizada surgieron como una respuesta a la preocupación que le externalizó la comunidad de Juanito Mora a la Municipalidad de Puntarenas, esto en relación con las inundaciones que han sufrido a lo largo de los años, dado que se ha perdido superficie permeable a raíz del crecimiento urbano, la carencia de ordenamiento territorial y la falta de una red de desfogue adecuada como lo es un alcantarillado pluvial.

Inicialmente el Instituto Meteorológico Nacional, colaboró con los datos de diversas estaciones, siendo escogida la 78027 de Puntarenas, principalmente por el período de datos y su

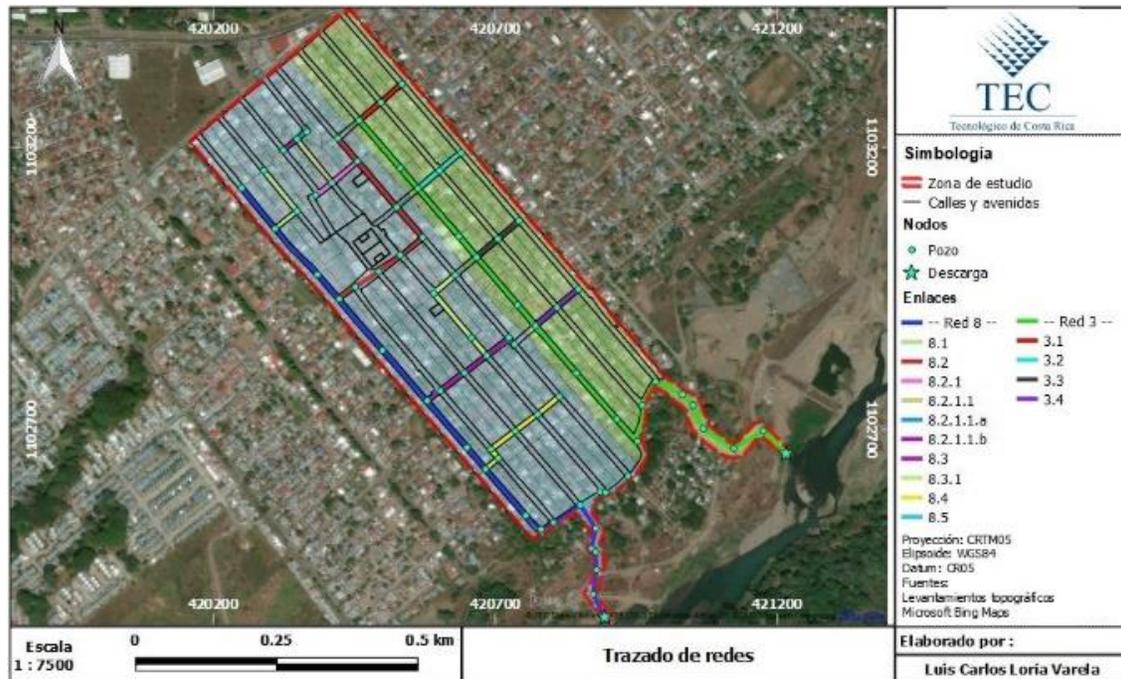
ubicación. Para obtener una serie de datos aún más confiable o uniforme, se utilizó el método Racional Deductivo (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998), se analizaron los datos dudosos y posteriormente se analizaron varias distribuciones de probabilidad, siendo la que mejor se ajustaba (según prueba de bondad de ajuste Smirnov – Kolmogorov): la distribución Gamma de tres parámetros. Con ello, se utilizaron coeficientes de medición y duración y, se realizó un proceso de regresión potencial, se obtuvieron las curvas de intensidad – duración – frecuencia para la estación 78027 de Puntarenas.



Curvas IDF para la estación 78027, Puntarenas.

Del levantamiento topográfico de la comunidad, y con el apoyo de sistemas de información geográfica, principalmente la herramienta QGIS, se logró delimitar y caracterizar las áreas de drenaje de la cuenca urbana. A partir de ello, se

pudo llevar a cabo el pre-dimensionamiento de la red de alcantarillado pluvial, considerando el método de flujo uniforme, mediante una hoja de cálculo en Excel.



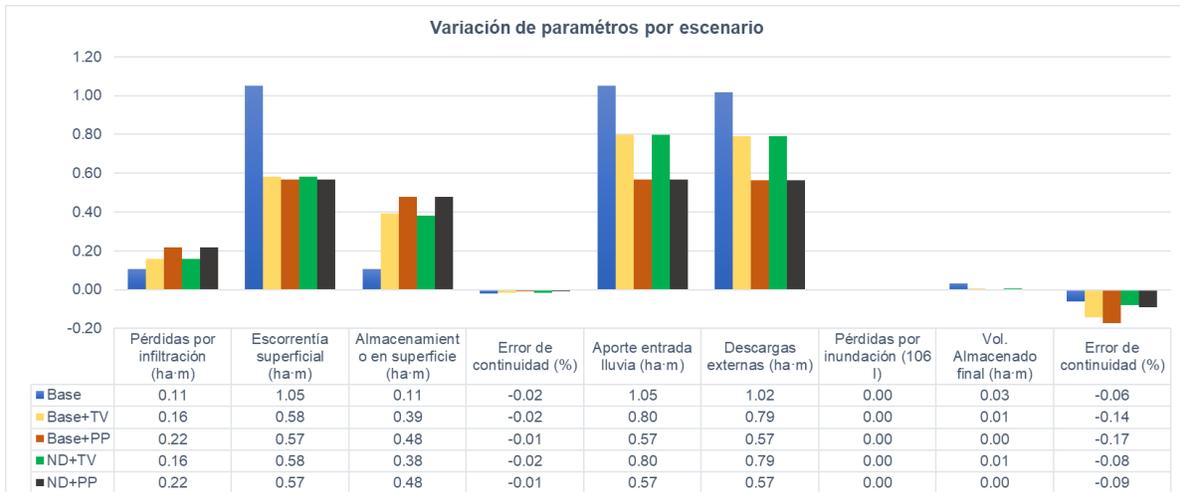
Trazado de la red de alcantarillado pluvial en Juanito Mora.

Al contar con esta red, se parametrizó el modelo de cálculo hidráulico en el modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM, por sus siglas en inglés), el cual es un programa de modelación numérica computacional, que se destaca por su amplia aplicación a nivel mundial y que a la vez es de código libre, también otorga una ejecución rápida y posee una amigable visualización e interfaz gráfica, que se va mejorando con el tiempo, haciendo más amigable su aplicación. No obstante, dado que varios parámetros hidrológicos e hidráulicos utilizados en la entrada de este modelo son inferidos y no se contaba con datos medidos que permitieran calibrarlo, fue necesario considerar como parte del proyecto, realizar un análisis de sensibilidad, el cual se aplicó a once parámetros distintos y permitió identificar aquellos con mayor influencia o sensibilidad en el modelo, para que así también, fuera posible reducir posteriores estudios a estos parámetros de entrada o se tenga mayor importancia, esto se identificó principalmente mediante errores

relativos, tanto para el cálculo de escorrentía, como para el cálculo hidráulico.

Posteriormente, al contemplar técnicas de desarrollo urbano sostenible y utilizar matrices de selección (Woods Ballard, y otros, 2007), se modelaron techos verdes para un 35% del área total de la superficie impermeable de las casas y edificios y se propuso sustituir el 100% del área de calles y avenidas por pavimentos permeables, posteriormente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para ciertos parámetros, de forma similar al que se efectuó en la red hidráulica, aunque sólo para cinco parámetros relacionados a los componentes de un techo verde y dos para los pavimentos permeables.

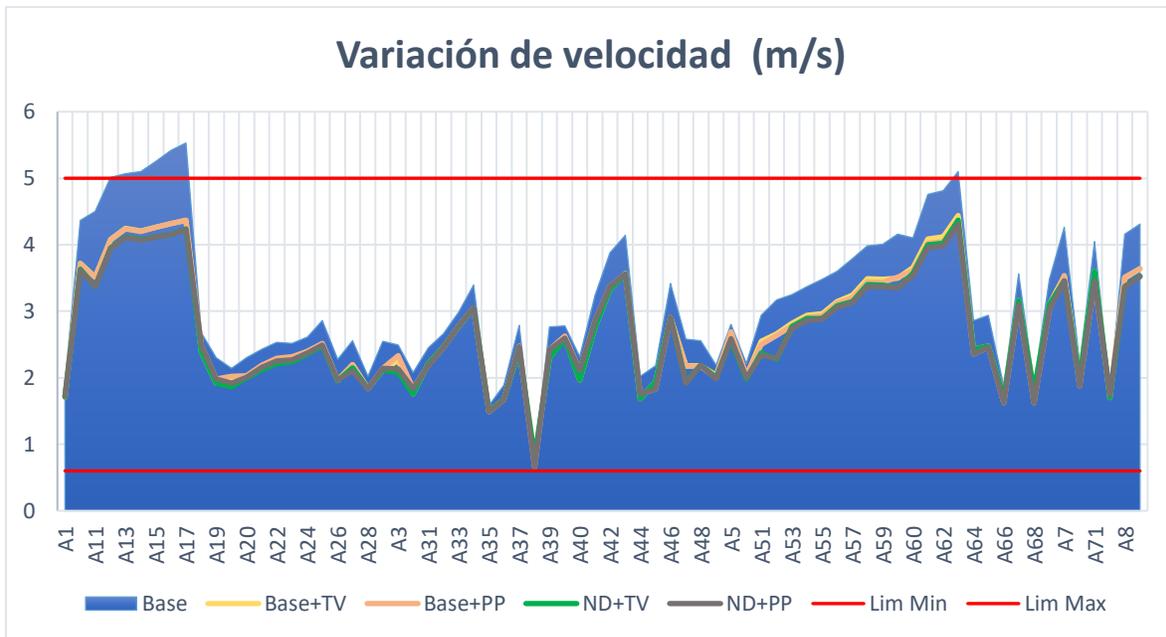
Finalmente, se pudo observar el impacto de utilizar infraestructuras verdes, tales como, techos verdes (TV) y pavimentos permeables (PP) y se resaltó una gran disminución en el flujo de escorrentía superficial dentro de la mancha urbana.



Variación de los distintos resultados para la continuidad del flujo de escorrentía y cálculo hidráulico, para cada escenario.

Propiamente con las tuberías, también se lograron varios resultados favorables, como lo es, la reducción de velocidades altas e incluso la

capacidad de carga hidráulica (tirante) se redujo, alejando a la red de problemas de sobrecarga.



Con la propuesta se concluye que los parámetros más sensibles para la red propuesta, son el porcentaje de área impermeable, el número de curva y en menor forma, aunque igualmente apreciables, los coeficientes superficiales “n” de Manning; en relación con las técnicas SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles) seleccionadas, para los techos verdes, se logró indicar que se debe tener mayor atención a la porosidad y el espesor del sustrato y, en una menor forma, el parámetro de conductividad

hidráulica y la berma. Con los pavimentos permeables, sólo la tasa de infiltración posee una sensibilidad a considerar. Además, se demuestra que se logró una importante disminución en la escorrentía superficial al utilizar técnicas SUDS, diversas mejoras en las tuberías de la red de alcantarillado y, se comprueba que los escenarios propuestos pueden contemplarse para un futuro desarrollo, e incluso que sirva de plan piloto para otros proyectos similares.

Introducción

El desarrollo urbano ha generado interacciones entre el ser humano y el ciclo del agua, uno de los resultados de esta dinámica, ha sido la impermeabilización de zonas extensas que interfieren en el ciclo natural del escurrimiento limitando la infiltración y percolación del agua en el perfil del suelo. En Costa Rica, esta problemática por la pérdida de superficie permeable se ha presentado en buena parte por la ausencia de ordenamiento territorial, a pesar de que hace más de 50 años contamos con la Ley de Planificación Urbana, pero ha encontrado un débil accionar político para su correcta ejecución, ya que prácticamente 50% de los cantones del país carecen de un plan regulador y, los que poseen uno también tienen diversas tareas pendientes, incluyendo una correcta fiscalización, o la necesidad de actualizarlo.

Teniendo en cuenta esto, se pretende enfocar este proyecto en una comunidad que conoce sobre esta carencia de ordenamiento territorial y presenta problemas de drenaje urbano, dado que han sufrido múltiples inundaciones; en al menos 42 veces durante 16 años (DesInventar, 2019), la comunidad de Juanito Mora está localizada en el distrito de Barranca, del cantón central de la provincia de Puntarenas. Este urbanismo posee un área de 34.6 ha y se divide en 8 calles principales, con 11 avenidas que intercomunican los diversos sectores internos. Barranca es de las localidades que posee mayor densidad poblacional en el cantón de Puntarenas, seguido por Chacarita y El Roble, cuenta con más de 28000 habitantes (INDER, 2015) y en Juanito Mora se estima que viven más de 1200 familias. Debe tomarse en cuenta que las inundaciones han repercutido en daños materiales, en la calidad de vida y condición de salud; en buena parte esto se debe a que no posee un alcantarillado pluvial ni residual, aunque sobre esto último, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ya ha firmado un préstamo para la construcción de un colector de aguas residuales. Al mencionar un alcantarillado pluvial, se vuelve de vital importancia mencionar los modelos hidrológicos e hidráulicos para la simulación de

diversos eventos que puedan presentarse en la cuenca urbana, estos modelos a la vez ayudan en la planificación y diseño del mismo alcantarillado pluvial.

Para el caso de Juanito Mora, hay una limitada cantidad de estudios que faciliten información pluviográfica, por ello, parte del interés del presente proyecto es que se prevé estimar la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) (Chow, Maidment, & Mays, 1994) y en este caso, de generarse una curva IDF, implicaría una actualización de información pluviográfica, que sería de utilidad para futuros proyectos. Cabe mencionar que mediante el atlas confeccionado por (Ortiz, 2014) se han observado al menos dos estaciones meteorológicas cercanas, que pertenecen al Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

Además, con el afán que el presente proyecto se transforme en un plan piloto y sea incluso replicable en otras zonas del cantón, que considere oportuna la Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Puntarenas, se prevé llevar a cabo un pre-dimensionamiento de una red de alcantarillado pluvial en flujo uniforme, y la modelación de la red, con la herramienta Storm Water Management (SWMM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Y aún más importante, se seleccionarán y utilizarán técnicas de drenaje urbano sostenible.

De acuerdo con (Perales Momparler & Doménech, 2008) estas técnicas se definen como: “Elementos integrantes de la infraestructura urbano – hidráulico – paisajística, cuya misión es captar, filtrar, retener, transportar, almacenar e infiltrar al terreno el agua, de forma que ésta no sufra ningún deterioro e incluso permita el escurrimiento subsuperficial del agua de forma natural a través del perfil del suelo, de al menos parte de la carga contaminante que haya podido adquirir por procesos de escorrentía urbana previa y que puede ser depurada naturalmente por los distintos procesos biofísicos y químicos que ocurren en el

recurso suelo. Todo ello, tratando de reproducir, de la manera más acertada posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o impacto antrópico.”

Además, hay que tener en cuenta que estas técnicas son conocidas con distintas topologías según el país: Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) en el Reino Unido, Best Management Practices (BMPs) en Estados Unidos o mejores prácticas de control (MPC) en algunos países de América Latina, entre otros.

En Costa Rica, si bien se carece de legislación, y no hay suficientes investigaciones al respecto, una vez que se seleccionen la(s) técnica(s) de drenaje urbano más apropiadas en función de determinados criterios, se deberán tomar en cuenta, por citar algunos ejemplos:

El trabajo de (Camacho, 2018) que analizó tres coberturas vegetales en techos verdes, mientras que anteriormente (Montalvo, 2014) realizó un análisis experimental de un techo verde en Costa Rica. Ambos casos están más enfocados en aspectos constructivos, también, (Umaña, 2018) diagnosticó y planteó una serie de propuestas relacionadas al alcantarillado pluvial del Instituto Tecnológico de Costa Rica, y en una de ellas implementa SUDS por medio de superficies permeables.

En este trabajo, también resaltará un análisis de sensibilidad (para ambos escenarios, con y sin SUDS), cuya finalidad es básicamente para el conocimiento y/o predicción de la tendencia a la variación del modelo, esto tras la realización de distintos cambios en los parámetros que lo definen, aunado a esto, se evaluará el funcionamiento y nivel de efectividad de la técnica SUDS sobre el control de la escorrentía, del cálculo hidráulico e incluso posibles inundaciones del sistema, esto estará ligado a un análisis costo – beneficio entre la implementación convencional de un alcantarillado pluvial y uno que contemple la(s) técnica(s) SUDS seleccionada(s).

En el panorama nacional, estas técnicas SUDS pueden verse como técnicas jóvenes y, por tanto, sin una vasta investigación, o suficientes experiencias y resultados, e incluso se carece de un marco normativo claramente diferencial. No obstante, la propuesta responde al compromiso del Gobierno del Costa Rica dentro de la Agenda 20 – 30 de Objetivos de Desarrollo Sostenible (CEPAL, 2018) que incorpora la infraestructura verde como herramientas de adaptación al cambio

climático y aumento de la resiliencia ante eventos climáticos extremos. Por ello, mediante estudios como los citados con anterioridad y esté presente proyecto de graduación, se pretende dar valor y resaltar las ventajas y beneficios de la utilización de estas técnicas SUDS y, de cómo esto sirve de incentivo para un cambio en el paradigma de la gestión de aguas pluviales, fomentando incluso un compromiso político, institucional y académico, en el cual, se aborden estrategias y gestiones relacionadas a la atención de la variabilidad climática y la reducción de emisiones contaminantes, alineado con lo indicado en la Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018 – 2030 (CNPU, 2018).

Objetivos

Objetivo general

Realizar el diseño hidráulico de la red de alcantarillado pluvial, considerando al menos una técnica de diseño urbano de desarrollo sostenible para el barrio Juanito Mora, en Barranca de Puntarenas.

Objetivos específicos

- Analizar los registros históricos de precipitación en la cuenca urbana, para el diseño de infraestructuras verdes de drenaje pluvial.
- Delimitar las áreas de drenaje de la red de alcantarillado pluvial para su caracterización mediante el uso de información existente y con el apoyo de sistemas de información geográfica.
- Realizar un pre-dimensionamiento de la red en flujo uniforme, generando un modelo numérico computacional hidrológico – hidráulico, utilizando la herramienta SWMM.
- Utilizar una técnica SUDS para la evaluación de la propuesta del alcantarillado pluvial convencional, y la presentación de una opción de diseño.
- Realizar un análisis de sensibilidad y de costo beneficio para las propuestas planteadas de infraestructuras verdes.

Marco conceptual

La proyección y el diseño de un sistema de alcantarillado pluvial es un trabajo que requiere del conocimiento de múltiples factores, dado que serán de vital importancia para el funcionamiento idóneo del sistema. A la vez, debe considerarse, que el mismo desarrollo urbano ha generado interacciones entre el ser humano y el ciclo hidrológico, uno de los resultados de esto, ha sido la impermeabilización de zonas extensas que, con anterioridad y de forma natural, eran capaces de gestionar el agua de lluvia que recibían.

En este proyecto se pretenden abarcar temas de hidrología, estadística aplicada a la hidrometeorológica, cálculo hidráulico y de técnicas de desarrollo urbano sostenible, además, se requiere del manejo de diversos programas, tales como, los sistemas de información geográfica o, de aquellos que serán vitales para la modelación hidráulica de la red de drenaje, como la herramienta Storm Water Management (SWMM) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Por ello, en este capítulo se pretende describir los conceptos básicos que posee cada tema.

Hidrología

Se puede definir como la ciencia natural que estudia el agua, su comportamiento, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el ambiente, incluyendo los seres vivos y en especial con el ser humano (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Prácticamente cada diseño y construcción de alguna estructura hidráulica, estará vinculada estrechamente con la hidrología, por ejemplo, es de gran utilidad para la determinación de caudales máximos que se pueden esperar en un vertido, o en una alcantarilla de un sistema de drenaje urbano, también para determinar la

capacidad que se requiere para asegurar el suministro adecuado de agua para una zona de riego o para el abastecimiento de una ciudad, así como, para medir que la capacidad de agua a bombear no incida en la sobreexplotación de un acuífero, entre otros. (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998).

Cuenca hidrográfica

Generalmente se considera que la cuenca hidrográfica posee una gran diversidad topográfica, además de poseer una red de cauces naturales que convergen en uno solo. Cabe destacar que la cuenca es la unidad básica de estudio de la hidrología, (Aparicio, 2006), y la define como: “una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Y a diferencia de una cuenca hidrológica, la cuenca hidrográfica se refiere a las aguas superficiales y no considera las aguas subterráneas.

Cuenca urbana

Este tipo de cuenca se destaca debido a que, en ella, se establecen asentamientos humanos con actividades sociales, económicas, políticas y culturales, apoyadas en sistemas tecnológicos artificiales que se desarrollan a expensas del sistema natural (Agredo, 2013).

Además, posee las siguientes características particulares en comparación con las cuencas hidrológicas naturales (Campos, Introducción a la Hidrología Urbana, 2010):

- No son de grandes dimensiones, su rango se encuentra entre decenas de km^2 y no entre cientos o miles de km^2 .
- El tiempo de respuesta o el tiempo de escorrentía ante una lluvia de diseño o tormenta, es de minutos y a lo máximo de sólo unas horas, influida por la

superficie impermeable que limita la infiltración en el suelo.

- El patrón del flujo natural se ve afectado por las calles, muros u otros obstáculos presentes en el ente urbano.
- La recarga y evapotranspiración es limitada y reducida.



Figura 1. Cuenca natural versus cuenca urbana. Fuente: Adaptado de (Mah, Putuhena, & Rosli, 2016).

Cabe mencionar que los límites de la cuenca urbana podrán ser trazados a partir de la topografía del área y según las características de los planos catastrados y la delimitación de la urbanización.

Precipitación

Vale indicar que la precipitación es de las variables con mayor relevancia en el ciclo hidrológico, e incide directamente en una cuenca urbana, ya que prácticamente se establece como la fuente primaria de agua en la superficie, por ello, su estudio es de gran importancia en el presente proyecto. Cabe mencionar, que la precipitación puede presentarse de diversas formas, sea: lluvia, escarcha, granizos o nieve.

Además, la precipitación guarda una relación estrecha con los conceptos de intensidad y duración de la lluvia.

La intensidad puede definirse como la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo y, es por medio de su medida, que es viable determinar qué tan fuerte llueve en una zona específica. De una forma básica se puede expresar así:

$$i = \frac{P}{t} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

$i_{\text{máx}}$: intensidad, en mm/hora.

P: precipitación en altura de agua, en mm.

t: tiempo, en horas.

La duración corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la lluvia. Suele indicarse en minutos o en horas y mientras más corta sea dicha duración, mayor será la magnitud de la intensidad de lluvia.

Medición de la precipitación

Podemos cuantificar la precipitación caída en un punto, principalmente con aparatos climatológicos conocidos como pluviómetros y pluviógrafos, ambos aparatos miden la altura del nivel del agua que se acumularía en la superficie, sin que se infiltre o se evapore, está medida

suele llamarse como lámina de lluvia y se expresa en (mm).

En el caso de los pluviógrafos, estos se diferencian, ya que además son un registrador, ya sea con una banda pluviográfica o por medio de una memoria digital en la cual son capaces de medir la intensidad de la precipitación.

Ajuste para intervalos fijos de observación

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), indica que los datos de precipitación obtenidos en intervalos fijos de observación, por ejemplo, cada 24 horas, difícilmente alcancen el verdadero valor máximo de precipitación para el intervalo de tiempo para el cual han registrado datos, por lo cual, establecen la recomendación de hacer uso de un factor de incremento, basado en los estudios de miles de estaciones. El valor de dicho incremento corresponde a un 13% para cada dato.

Precipitación máxima probable

La misma Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) establece que la precipitación máxima probable (PMP) se define como la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible que corresponde a determinada duración en una cuenca hidrográfica o zona de tormenta específica de un determinado lugar en un período dado del año, sin tener en cuenta las tendencias climáticas que se producen a largo plazo.

Estimación de curvas IDF

Las curvas de intensidad – duración – frecuencia (IDF), facilitan la obtención de intensidades de diseño para diferentes duraciones y períodos de retorno, por lo cual poseen una gran relevancia en todo tipo de diseño de estructuras de carácter hidrológico, tal como, drenajes agrícolas y alcantarillados urbanos, drenajes de carreteras o de aeropuertos, entre otros.

Para la estimación de estas curvas, se deben analizar probabilísticamente los registros de

precipitación de la zona y así establecer las precipitaciones máximas probables, posteriormente, se pretende optar por la expresión propuesta por (Bernard, 1932) y validada por (Aparicio, 2006) que posee la siguiente forma:

$$I = \frac{k \cdot T^m}{t^n} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

I; es la intensidad (mm/hr).

t: es la duración de la precipitación (min).

T: es el período de retorno (años).

k, m, n: son parámetros por estimar.

Para el proceso de obtención de las curvas IDF, es importante establecer la relación y la importancia de ciertos conceptos.

Alcantarillado pluvial

El alcantarillado pluvial urbano, tiene como función captar y evacuar las aguas de lluvia hasta lugares en donde se descarguen cuerpos de agua, de tal forma, que se reduzcan los daños, o cualquier inconveniente a los habitantes. Un sistema de alcantarillado está constituido por una red de conductos principales, los cuales, se abarcan en el presente proyecto, además, el sistema se completa mediante instalaciones complementarias, que permiten una adecuada captación y desalojo de las aguas de lluvia.

Normativa

En Costa Rica, se cuenta con el Reglamento de Fraccionamiento y Urbanizaciones (INVU, 2020) que se complementa con las disposiciones contenidas en los planes reguladores de las distintas municipalidades del país, no obstante, en materia de diseño, se indica que se deben de seguir los lineamiento del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) el cual es el ente encargado de establecer la normativa técnica para el diseño de alcantarillados pluviales, la misma está estipulada en: "Manual de Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Pluvial (AyA, 2017). Los

lineamientos con mayor relevancia se exponen a continuación:

- Caudal de diseño: el AyA recomienda la utilización del método racional.
- Período de retorno de diseño: se establece que no será menor a 10 años.
- El tiempo de recorrido o de viaje en la tubería: se debe calcular usando velocidad a tubo lleno.
- Tiempo de concentración: se debe considerar un valor mínimo de 10 minutos para el inicio de cada ramal que tenga un pozo donde se realice un aporte de caudal.
- Cálculo hidráulico: se establece que las tuberías deben ser diseñadas como conductos en escurrimiento libre, por gravedad, utilizando preferiblemente la ecuación de Manning.
- La velocidad mínima entre dos pozos debe ser de al menos 0.6 m/s, que garantice una fuerza tractiva de 0.10 Kg/cm² con un 85% de la capacidad de la tubería.
- Se establece una velocidad máxima de 5.0 m/s, para tramos entre pozos, y hasta 7.0 m/s en el tramo final.
- Secciones: Se indica que deben ser circulares, con un diámetro nominal mínimo de 400mm, un valor máximo del tirante hidráulico de 0.85 del diámetro y no se permite una disminución de diámetros en la dirección del flujo.
- Coberturas máximas y mínimas: ambas profundidades se definen como la medición entre la corona del tubo y la rasante terminada. El AyA define que la tubería pluvial deberá estar por debajo del sistema de saneamiento, a una distancia mínima de 0.20m, no obstante, también contempla ciertos casos especiales con profundidades máximas hasta de 15m.
- Pozos de registro: se indica una separación máxima de 120 m en línea

recta para los pozos de registro, estos se deben colocar al inicio, e intersección de tuberías, o en los cambios de dirección, material, pendiente. Además, se permite que funcionen como tragantes en los casos que se invierta el bombeo de la calzada.

- Desfogue de la red: La entrega de aguas pluviales a un colector (quebrada o río) debe tomar en cuenta el nivel máximo probable de las avenidas de este último, a fin de no obstaculizar la incorporación de las aguas. Esta entrega no debe ser hecha en forma perpendicular al curso del colector, sino que un ángulo no mayor de 45° y a no más de un metro de altura para disminuir el golpe de agua al caer.

Estimación de caudales

Aunque se pueden estimar los caudales a través de cualquier modelo de precipitación – escorrentía, en este caso se opta por la utilización del método racional, según (Campos, Introducción a la Hidrología Urbana, 2010), dicho método establece que la intensidad de lluvia “i” comienza instantáneamente y continúa indefinidamente, la cantidad de escurrimiento se va incrementando hasta alcanzar el tiempo de concentración (Tc), cuando toda la cuenca está contribuyendo al flujo en su salida. Por lo anterior, la intensidad “i” tiene una duración igual al “Tc” y corresponde al periodo de retomo del caudal máximo que se estima. El cociente entre el producto de la intensidad de lluvia “i” por el área de cuenca “A” y el caudal máximo “Q”, que ocurre al llegar al “Tc”, se denomina coeficiente de escurrimiento “C” y varía de cero a uno.

Su ecuación se representa de la siguiente forma:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A}{360} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

Q: caudal (m³/s).

c: coeficiente de escorrentía (adimensional).

i: intensidad de la precipitación (mm/h).

A: área de drenaje (ha).

Este método, a pesar de su fácil aplicación tiene ciertos parámetros que deben escogerse de forma muy cuidadosa, para así, lograr resultados más representativos y confiables.

Coeficiente de escorrentía

Esta variable podría considerarse como la menos precisa del método racional, dado que su valor se ve influenciado por diversos factores, tales como: la pendiente, la cercanía con el nivel freático, la intensidad de lluvia, el nivel de permeabilidad del suelo, la vegetación, la humedad, la altura de encharcamiento, entre otros.

Su valor teórico oscila entre 0 a 1, y a pesar de los diversos factores que influyen en su obtención, también debe considerarse que, entre mayor grado de impermeabilidad, sus valores serán más cercanos a 1, caso contrario, de presentarse mayor grado de infiltración se obtendrán valores de coeficiente menores.

A continuación, se observan los valores de coeficientes sugeridos, de acuerdo, con las características superficiales y del periodo de retorno de diseño.

Tabla 1. Valores de coeficiente de escorrentía para diversos períodos de retorno.

Característica de la superficie	Período de retorno						
	2	5	10	25	50	100	500
Urbanizada							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto / techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc)							
<i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)</i>							
Plano, 0- 2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)</i>							
Plano, 0- 2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75% del área)</i>							
Plano, 0- 2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Rural							
Área de cultivos							
Plano, 0- 2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0- 2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0- 2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Intensidad de precipitación

La intensidad corresponde a la altura de lluvia acumulada por unidad de tiempo. En este caso su magnitud se ha de determinar con base al resultado de la estimación de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) para la zona de estudio.

Cabe recordar que la magnitud de la intensidad está relacionada a un período de retorno de diseño “Tr” y al tiempo de concentración “Tc” estimado para cada área.

Tiempo de concentración

(Campos, Introducción a la Hidrología Urbana, 2010), define el tiempo de concentración “tc” como el lapso que le toma a una gota de agua fluir desde el punto hidráulicamente más remoto de la cuenca hasta su salida.

Para considerar tanto las áreas de drenaje como las tuberías del alcantarillado, se puede indicar que el tiempo de concentración se compone por un tiempo de entrada para cada área, y debe sumarse el respectivo tiempo de recorrido en la tubería.

$$t_c = t_e + t_v$$

Ec. 4

Dónde:

t_e : tiempo de entrada

t_v : tiempo de recorrido en la tubería.

Existen diversas ecuaciones empíricas para el cálculo del tiempo de entrada " t_e ", en este caso se opta por la utilización de las siguientes:

Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{l}{S^{1/2}} \right)^{0.77}$$

Ec. 5

Témez:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{1/4}} \right)^{0.76}$$

Ec. 6

Dónde:

T_c : tiempo de concentración en h.

l : longitud del tramo en m.

L : longitud del tramo en km.

S : pendiente, adimensional.

El tiempo de recorrido en la tubería " t_c " se puede estimar como el cociente de la longitud del tramo entre la velocidad de Manning en condiciones de flujo lleno, esto es:

$$t_v = \frac{L}{60V}$$

Ec. 7

Dónde:

T_v : tiempo de viaje en min.

L : Longitud del tramo en m.

V : Velocidad a flujo lleno en m/s.

Áreas de drenaje

Es el área propia o tributaria para cada tramo, esta se debe incluir en el cálculo únicamente cuando aporte escorrentía al tramo en estudio. Para su delimitación, se debe considerar tanto la topografía del lugar, como la dirección de flujo estimada por los sistemas de información geográfica.

Cálculo hidráulico

Flujo uniforme

En cumplimiento con la normativa, los colectores deben diseñarse como conducciones a flujo libre por gravedad.

Es importante considerar que el flujo de las aguas pluviales en una red de alcantarillado no tiene un comportamiento de flujo permanente, sin embargo, el dimensionamiento de cada tramo de tubería puede realizarse suponiendo un flujo uniforme y, aunque en este apartado se cuentan con varias fórmulas, se opta por las fórmulas propuestas por Manning dado su simplicidad y por ser ampliamente utilizada en el dimensionamiento de redes de alcantarillado. También deben considerarse ciertas características al realizar un diseño por flujo uniforme, tales como:

- Los parámetros hidráulicos propios de la sección a dimensionar, como: la profundidad hidráulica, el área mojada, la velocidad y el caudal, son constantes en toda la tubería.
- Al poseer parámetros constantes, tanto la línea de energía " S_f ", la superficie del agua " S_w " y el fondo " S_0 " de la tubería se considerarán como líneas paralelas.

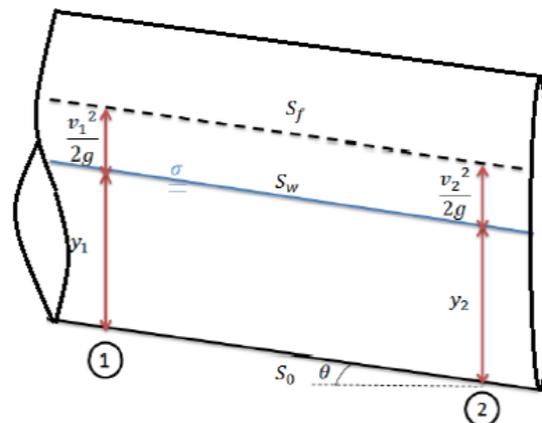


Figura 2. Sección de tubería con flujo uniforme.
Fuente: Adaptado de (Rossman L., 2015).

La ecuación de Manning se establece como:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

V: velocidad en m/s

n: coeficiente de rugosidad de Manning

R: radio hidráulico en metros

S: pendiente de la línea de energía en m/m

A la vez, la ecuación puede expresarse en términos del caudal y del diámetro de la tubería de sección circular, para ello, se supone la condición de flujo a tubo lleno, de esta forma el radio hidráulico se podrá definir así:

$$R = \frac{D}{4} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

R: radio hidráulico en metros

D: diámetro en metros.

Dado lo anterior, y considerando que la pendiente de la línea de energía es igual a la pendiente del fondo de la tubería, se pueden obtener las ecuaciones:

$$Q_o = \frac{1}{n} \left(\frac{D_o}{4}\right)^{2/3} S^{1/2} A \quad \text{Ec. 10}$$

$$D_o = \left[\frac{n^4 S^{1/2} Q}{\pi} \right]^{3/8} \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde:

Q_o: Caudal en m³/s

D_o: diámetro de la tubería en m

n: coeficiente de rugosidad de Manning

A: radio hidráulico en metros

S: pendiente de la línea de energía en m/m

A partir de la relación entre el caudal inicial y el caudal a tubo lleno, es posible obtener las demás propiedades hidráulicas, ya sea a través de gráficas o tablas que presenten una relación de estas propiedades, o bien, se puede utilizar el método de la secante; a continuación, se presentan las ecuaciones de dichas propiedades hidráulicas:

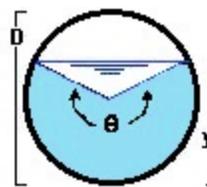


Figura 3. Tubería de sección circular. Adaptado de (Rossman L., 2015).

$$y = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \quad \text{Ec. 12}$$

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta) \quad \text{Ec. 13}$$

$$P = \frac{\theta D}{2} \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

θ: ángulo theta, en radianes.

Y: tirante, m.

D: diámetro de la tubería, m.

A: área hidráulica de la tubería, m.

P: perímetro mojado de la tubería, m.

Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning se determina principalmente por el material de la tubería, además, debe considerarse el estado que presenten las paredes de esta, principalmente si es liso o corrugado.

Tabla 2. Valores recomendados de coeficiente de rugosidad para distintos materiales.

Tipo de tubería	n de Manning
Tubo de concreto	0.010 - 0.011
Cajón de concreto	0.012 - 0.015
Tubo de costilla en espiral de metal	0.012 - 0.013
Polietileno liso	0.009 - 0.015
Polietileno corrugado	0.018 - 0.025
Cloruro de polivinilo (PVC)	0.009 - 0.011

Fuente: Adaptado de (Brown, y otros, 2009)

Clasificación del flujo

El parámetro utilizado para su clasificación es el del número de Froude:

$$F = \frac{Vr}{\sqrt{gD_h}} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

F: número de froude (adimensional)

Vr: Velocidad real en la tubería m/s.

g: aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

Dh: profundidad hidráulica en m.

Los regímenes de flujo se clasifican de la siguiente forma:

- $F > 1$ es flujo supercrítico.
- $F = 1$ es flujo crítico.
- $F < 1$ es flujo subcrítico

Se recomienda que F sea mayor a 1.1 y menor a 0.90 para así tener un flujo estable.

EPA SWMM

El modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM, por sus siglas en inglés) es un programa de modelación numérica para cálculo hidrológico e hidráulico, creado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Es de destacar que posee más de 45 años siendo mejorado de forma constante, dado que su primera versión se lanzó en 1971 y la última versión data del 2020, lo cual, le ha permitido establecerse como un referente en el análisis, corrección, verificación y justificación de cálculos en el ámbito de drenajes pluviales.

Este programa realiza sus cálculos a través de diversas capas o módulos, los cuales se dividen en: atmosférica, superficial, de aguas subterráneas, de transporte y, el más reciente sobre técnicas de drenaje urbano sostenible. De esta forma se simulan las diversas etapas de escurrimiento, infiltración, almacenaje, transporte y control de calidad que se generan debido a las aguas pluviales. No obstante, para realizar la simulación, no es necesaria la utilización de todos los módulos, ni de todos los elementos que posee SWMM, por lo cual, se le dará un mayor enfoque a los utilizados en el presente proyecto.

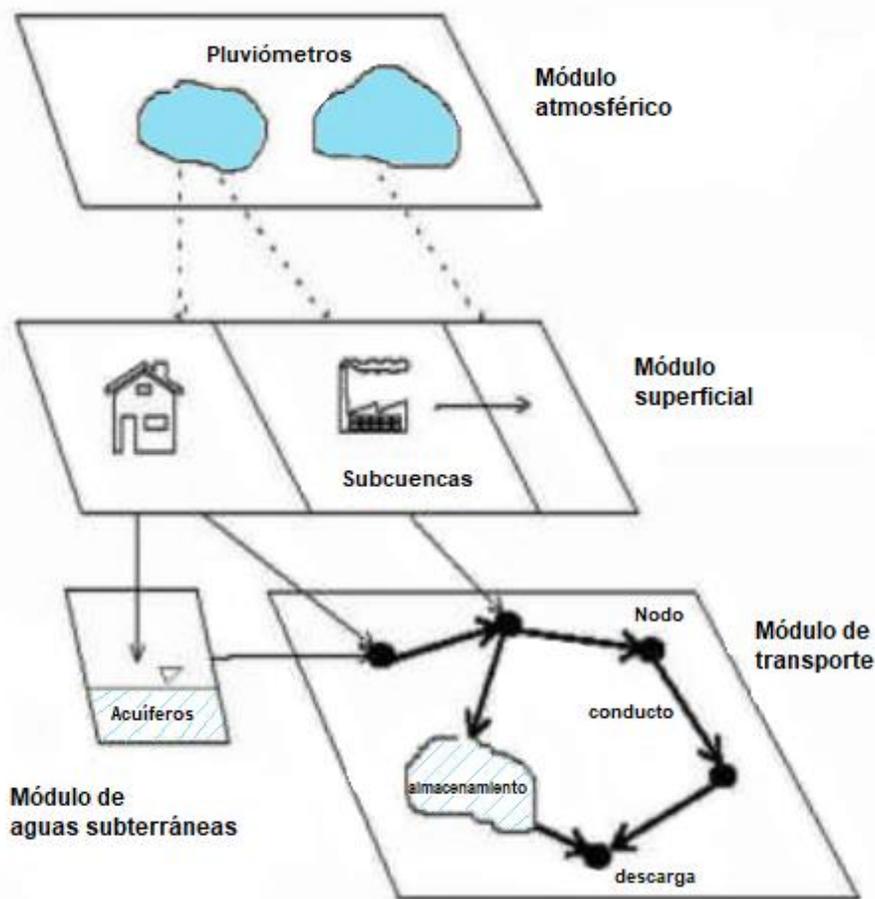


Figura 4. Modelo conceptual de los principales módulos de SWMM.
Adaptado de (Rossman & Huber, 2016).

Módulo atmosférico

Este módulo básicamente es el que posee datos de precipitación y se encarga de su respectivo análisis, para ello, utiliza los elementos pluviométricos para que el usuario introduzca los valores de entrada, ya sea, por medio de series temporales de datos o a través de un archivo externo al programa.

Módulo superficial

Las subcuencas son los elementos más representativos del módulo superficial, dado que son las áreas que reciben la precipitación del módulo atmosférico, en SWMM cada subcuenca trabaja como un depósito no lineal, en el cual, la precipitación se transforma en caudales de escorrentía, o bien, puede presentar pérdidas por almacenamiento, evaporación o infiltración.

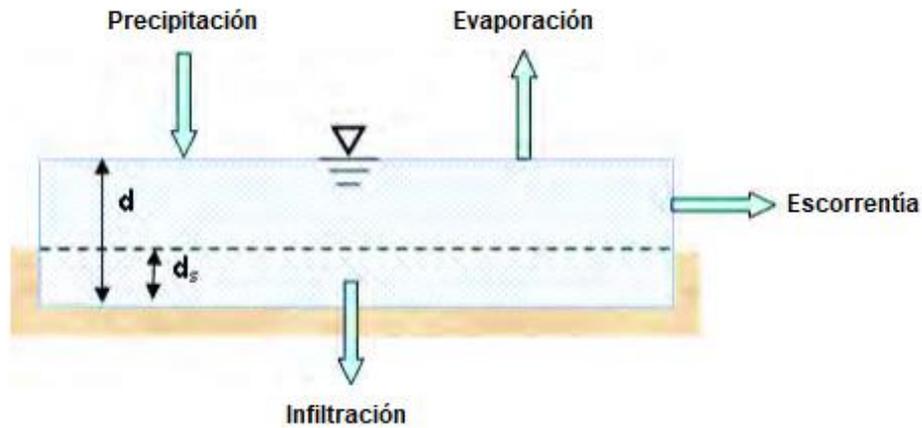


Figura 5. Modelo conceptual del módulo superficial.
Fuente: Adaptado de (Rossman L. , 2015).

Además de la transformación que se presentan en las subcuencas, es importante indicar que las mismas son delimitadas por el usuario, por lo que debe basarse en las propiedades del terreno y de las edificaciones existentes.

Una vez delimitadas las subcuencas es necesario establecer el porcentaje de impermeabilidad que posee cada una, así como, establecer un “n” de Manning, según sea la superficie, para ello, se recomienda utilizar los siguientes valores.

Tabla 3. Coeficiente “n” de Manning para distintas superficies.

Tipo de superficie	N de manning
Asfalto liso	0.011
Concreto liso	0.012
Concreto ordinario	0.013
Madera pulida	0.014
Ladrillo con mortero	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
Fundicion de hierro	0.015
Tuberías metal corrugado	0.024
Superficie de escombrera	0.024
Terreno improductivo	0.050
Terreno cultivado	
Residuos < 20%	0.060
Residuos > 20%	0.170
Pasto natural	0.130
Hierba	
Corta, pradera	0.150
Densa	0.240
Hierba Bermuda	0.410
Bosque	
Cubierta ligera de arbustos	0.400
Cubierta densa de arbustos	0.800

Fuente: Adaptado de (Brown, y otros, 2009).

Además, cada subcuenca debe poseer una caracterización de sus propiedades geométricas.

Pérdidas por almacenamiento en depresiones

Para (Gomez, 2007), las pérdidas por almacenamiento en depresiones podrían considerarse como el valor “equivalente” que posee el SWMM para considerar las pérdidas por interceptación diferenciada, o de precipitación retenida por la cubierta vegetal del terreno. Se pueden utilizar los siguientes valores:

Tabla 4. Valores recomendados de almacenamiento en depresiones.

Superficie	Altura (mm)
Superficie impermeable	1.25 - 2.5
Césped y hierba	2.5 - 5
Pastos y prados	5
Lecho forestal	7.5

Fuente: Adaptado de (Rossman L. , 2015)

Infiltración

Es importante destacar las pérdidas por infiltración, dado que la capacidad de infiltración del terreno estará principalmente en función de:

- Uso del suelo.
- Grado de saturación.
- Índice de porosidad
- Pendiente del terreno.
- Cobertura vegetal del terreno.

Para el cálculo de este factor, SWMM posee los siguientes métodos:

- Método de Horton.
- Método de Green – Ampt.
- Método del Número de Curva del S.C.S.

No obstante, únicamente se pretende desarrollar el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (S.C.S por sus siglas en inglés) ahora denominado, Servicio de Conservación de Recursos Naturales (N.R.C.S. por sus siglas en inglés); debido al gran uso que se ha realizado de dicho método, así como, a la facilidad de obtener los parámetros de este y su buen comportamiento en proyectos de cuencas pequeñas. Cabe recordar, que los valores del número de curva representan coeficientes de escorrentía, por lo cual, un valor de N igual a 100, indica que toda la lluvia escurre, y un número de N igual a 1, indica que toda la lluvia se infiltra (Villón, Hidrología, 2004). Para determinar el número de curva se recomienda el uso de los siguientes valores:

Tabla 5. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana.

Descripción del uso del suelo	Tipo de suelos			
	A	B	C	D
Tiera cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastos y prados				
En malas condiciones	68	79	86	89
En buenas condiciones	39	61	74	80
Pradera				
En buenas condiciones	30	58	71	78
Terreno boscoso				
Poco denso, cubierta forestal pobre o inexistente	45	66	77	83
Buena cubierta forestal	25	55	70	77
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc)				
En buenas condiciones (75% o más de hierba)	39	61	74	80
En pobres condiciones (50-75% de hierba)	49	69	79	84
Zonas comerciales (85% impermeable)				
	89	92	94	95
Poligonos industriales (72% impermeable)				
	81	88	91	93
Zona residencial				
Tamaño medio de la parcela (% Impermeabilidad)				
< 500 m2 (65%)	77	85	90	92
1000 m2 (38%)	61	75	83	87
1500 m2 (30%)	57	72	81	86
2000 m2 (25%)	54	70	80	85
4000 m2 (20%)	51	68	79	84
Aparcamientos pavimentados, tejados, caminos, asfaltados, etc.				
	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados, con cunetas y colectores de drenaje	98	98	98	98
Caminos de grava	76	85	89	91
Sucios	72	82	87	89

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Módulo de transporte

Este módulo se basa principalmente en la red de drenaje, la cual puede conformarse por diversas estructuras, tales como: tuberías, pozos de registro, bombas, elementos de almacenamiento, vertederos, orificios, entre otros. Para la representación de dichas estructuras (o incluso

cauces naturales), SWMM se centra en dos tipos de elementos:

- Nodos (pozos).
- Enlaces (tramos).

Nodos

Los nodos pueden verse como conexiones en el sistema de drenaje, los utilizados son:

- **Conexión:** Se utiliza para realizar uniones entre enlaces, en el sistema de drenaje pueden representar a los pozos de registro o tragantes.
- **De vertido o descarga:** Representan el punto final de la red, al utilizarse el método de cálculo de Onda Dinámica se le puede agregar ciertos parámetros de contorno, en caso contrario, se considera como una conexión.

Ambos tipos de nodo pueden influenciarse por el caudal que transporten las conexiones, o por uno externo, que ingrese el usuario o por el caudal de escorrentía que se genera a través de los módulos atmosférico y superficial.

Enlaces

Los enlaces de conducción (tramos) pueden ser vistos como las tuberías o canales por los que se va a desplazar el agua en el sistema de drenaje, esto se realiza de un nodo a otro. El SWMM permite crear diversos tipos de secciones transversales, según sea, el tipo de geometría que se seleccione en el programa, incluso si estas son abiertas o cerradas.

Cálculo de flujo SWMM

Al poseer los datos y elementos necesarios en los diversos módulos, es viable proceder con el cálculo hidráulico; esto se realiza a través de la simulación del transporte del agua a través de la red de alcantarillado pluvial y, debe destacarse que el SWMM considerará los principios de conservación de la masa, de la energía y de la cantidad del movimiento siempre que sea posible a través de sus diferentes métodos de cálculo:

- Flujo uniforme.
- Onda cinemática.
- Onda dinámica.

Es importante mencionar que la modelación del alcantarillado pluvial se ha de realizar mediante el enfoque de onda dinámica, dado que es la opción que se aproxima mejor a la realidad, ya que

considera todas las fuerzas actuantes, gravedad, fricción, presión e inercia y, permite simular los efectos de laminación, reflujos, condiciones de contorno aguas abajo o entrada en presión de la red. (Gomez, 2007).

Onda dinámica

Este método se basa en ecuaciones de diferenciales parciales que desarrolló Barre de Saint – Venant en 1871 para flujo unidimensional no permanente.

Para lograr deducirlas, (Chow, Maidment, & Mays, 1994) afirma que se deben de presentar las siguientes suposiciones:

- El flujo unidimensional, la profundidad y la velocidad varían solamente en la dirección longitudinal del canal. Esto implica que la velocidad del agua es constante y que la superficie del agua es horizontal en cualquier sección transversal perpendicular al eje longitudinal del canal.
- Se supone que el flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de tal manera, que la presión hidrostática prevalece y las aceleraciones verticales pueden despreciarse.
- El eje longitudinal del canal es aproximadamente una línea recta.
- La pendiente de fondo debe ser menor al 10% para que así se siga teniendo presiones hidrostáticas en el flujo.
- El fondo del canal debe ser capaz de no sufrir erosión, esto con el fin, de que los efectos de sedimentación y socavación sean despreciables.
- Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente turbulento son aplicables, de tal forma, que relaciones tales como, la ecuación de Manning puede utilizarse para describir los efectos de resistencia y así, calcular las pérdidas por fricción.
- El fluido es incompresible y de densidad constante a lo largo del flujo.

Al cumplirse las suposiciones anteriores, se pueden deducir las ecuaciones de Saint – Venant, las cuales constan de dos partes, esto debido a que consideran: la ecuación de continuidad para un flujo no permanente y, la ecuación de conservación de momento que se basa en la segunda ley de Newton.

La forma conservativa de la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 16}$$

Dónde:

$\frac{\partial Q}{\partial x}$: tasa de cambio del flujo con respecto a la distancia.

$\frac{\partial A}{\partial t}$: tasa de cambio del área con respecto al tiempo.

La forma no conservativa de la ecuación de conservación de momento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$\frac{\partial V}{\partial t}$: Aceleración local.

$v \frac{\partial V}{\partial x}$: Aceleración convectiva.

$g \frac{\partial y}{\partial x}$: Fuerza de presión.

gS_o : Fuerza gravitacional.

gS_f : Fuerza de fricción.

Para la deducción de las ecuaciones anteriores, el SWMM utiliza diferencias finitas de tipo explícito, no obstante, necesita utilizar intervalos de tiempo cortos (routing step), que se recomienda que sean inferiores a un minuto, esto para garantizar la estabilidad numérica del cálculo.

Técnicas de drenaje urbano sostenible

Las técnicas de drenaje urbano sostenible se engloban dentro de la filosofía de desarrollo sostenible mediante infraestructuras verdes, éstas

técnicas se enfocan a que el sistema global de saneamiento mejore su eficacia en la recogida, transporte, depure las aguas de escorrentía y preserve las condiciones naturales del entorno en el que se implantan. Además, objetivos para los que se diseñan los SUDS dependerán de diversos factores, como, por ejemplo, las normativas o reglamentos referentes al control de vertidos o las referentes al cumplimiento de los criterios de calidad en el medio receptor.

Para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2004), luego de una revisión bibliográfica sobre los distintos objetivos de diseño de las SUDS, se indicaron los siguientes criterios, que incluyen, de menor a mayor complejidad:

- Control de los picos de caudal y control frente a inundaciones.
- Control de picos de caudal e inundaciones y reducción de algunos contaminantes específicos.
- Control de picos de caudal, inundaciones, y control de calidad de agua.
- Control de múltiples parámetros.

De lo anterior, se puede indicar que el grado de complejidad aumenta cada vez, por el incremento de controles, dado que se contempla el criterio anterior, pero se adiciona un factor de control, e incluso para múltiples parámetros podría variar según las necesidades del proyecto.

Respecto a su denominación, el uso de estas técnicas ha obtenido varios nombres, según la región o el país donde han sido empleadas, por ejemplo, (Rodríguez, 2009) menciona:

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

En Costa Rica, aún es pronto para establecer algún consenso en referencia al nombre de las siglas empleadas, sin embargo, trabajos como el de (Montalvo, 2014), (Umaña, 2018) (Camacho, 2018), la conferencia de (Serrano, 2017), o incluso estudios del (BID, 2016) para la ciudad de San

José, han utilizado las siglas SUDS para referirse a este conjunto de técnicas, por lo cual en el presente trabajo se le indicará de la misma forma, y se podrán mencionar en el módulo LID, el cual es empleado en el programa SWMM.

Clasificación

Estas técnicas poseen terminologías y clasificaciones que aún no están del todo consensuadas, varían desde varios puntos de vista. De la revisión bibliográfica efectuada, se pueden encontrar al menos tres clasificaciones predominantes:

- Según el tipo de sistema empleado, básicamente en si requieren o no de la construcción de algún tipo de infraestructura. (Woods Ballard, y otros, 2015)
- Según la forma de gestión del sistema, ya sea un control en origen de la escorrentía, una gestión a escala local del entorno urbano, o bien, una gestión de cuenca a escala regional. (Perales Momparler & Doménech, 2008)
- Por el tipo de control, ya sea para control de fuentes de contaminación, o específicamente, para el control de escorrentía de las aguas pluviales de una red de drenaje. (Serrano, 2017) y (USEPA, 2004)

Para efectos del presente proyecto, se utilizará la primera clasificación, dado que resulta más sencilla, que básicamente consiste en las medidas no estructurales o preventivas y las medidas estructurales.

Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales son aquellas que no precisan acción directa sobre la red, ni la construcción de ningún tipo de infraestructura. Las no estructurales pueden ejemplificarse según (Abellán García, 2013) y (Redondo, 2019) de la siguiente forma

- Programas de educación pública: El objetivo es crear conciencia en los ciudadanos en relación con la protección ambiental de los hábitats acuáticos que reciben los vertidos de las redes de alcantarillado pluvial.

- Limpieza de las calles: La suciedad de las calles es una de las fuentes principales de ciertos contaminantes que llegan a verterse al medio receptor, a través, de los reboses de alcantarillado, de ahí, que la limpieza de las calles se considere una técnica de gestión. La efectividad de la limpieza de las calles depende del régimen de lluvias, de la frecuencia de la limpieza, del tipo de superficie y de otros factores, tales como, la densidad de circulación y del tipo de estacionamiento de vehículos en las calles.
- Programas de gestión de residuos: aceites, pinturas, productos de limpieza y cierto tipo de residuos domésticos son algunos de los residuos que pueden entrar en la red de alcantarillado y ser arrastrados al medio acuático. Una gestión adecuada de estos materiales requiere, en primer lugar, la concienciación ciudadana a través de programas de educación pública y, en segundo lugar, un programa efectivo de gestión de residuos.
- Control de fertilizantes y pesticidas: los fertilizantes y pesticidas arrastrados de la superficie urbana durante la lluvia, especialmente en zonas de parques, contribuyen notablemente al incremento de contaminación en la escorrentía y en los reboses.
- Control de la erosión del suelo: controlar la erosión de los suelos es importante, ya que las partículas de suelos y materia orgánica llevan asociados nutrientes y metales pesados por su poder quelante, además, de contribuir a los procesos de sedimentación en la red. Las principales fuentes por controlar en entornos urbanos son los parques y las zonas en construcción. Una posible solución en parques urbanos consiste en limitar ciertos tipos de usos del suelo y, por ejemplo, aumentar las zonas con cobertura vegetal.
- Control de la escorrentía de zonas comerciales e industriales: zonas como las gasolineras, las inmediaciones de estaciones del ferrocarril y zonas de parqueo de vehículos, son fuentes que

contribuyen muy significativamente a la contaminación de las aguas entrantes en la red, especialmente de ciertos contaminantes tales como, aceites, grasas, hidrocarburos y sólidos.

Medidas estructurales

Entre las medidas estructurales se consideran aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contienen algún tipo de elemento constructivo o suponen la adopción de criterios urbanísticos, se mencionan las siguientes:

- Áreas de biorretención.
- Cunetas verdes.
- Depósitos de detención.
- Depósitos de infiltración.
- Depósitos de lluvia.
- Estanques de retención.
- Franjas filtrantes.
- Humedales artificiales.
- Pozos y zanjas de infiltración.
- Superficies permeables.



Figura 6. Componentes de un área de biorretención. Fuente: (Otaño, 2018).

Su objetivo principal es el tratamiento de la escorrentía antes de su vertido al medio (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020), a través de procesos de descontaminación biológica. La eliminación de la contaminación se optimiza mediante la presencia de vegetación adecuada.

Cunetas verdes

Las cunetas verdes son canales anchos y poco profundos cubiertos de vegetación, diseñados con el fin de almacenar y transportar en superficie la escorrentía generada en las zonas impermeables.

- Techos verdes

Áreas de biorretención

Las áreas de biorretención son superficies ajardinadas que pueden ubicarse en zonas deprimidas en las que se infiltra el agua procedente de la escorrentía de zonas impermeables cercanas.

Pueden clasificarse en:

- Jardines de infiltración: Cuando el suelo es adecuado, puede generarse una depresión dentro de una zona verde y rellenarla con suelo autóctono preparado, donde se ubica el sistema de depuración e infiltración.
- Áreas de biorretención: Cuando el suelo no es adecuado, y se insertan dentro de áreas impermeables, se generan elementos ajardinados delimitados por bordillos.

1. Entrada de agua
2. Vegetación específica
3. Almacenamiento superficial
4. Suelo acolchado
5. Suelo de retención y tratamiento
6. Dren perforado
7. Infiltración

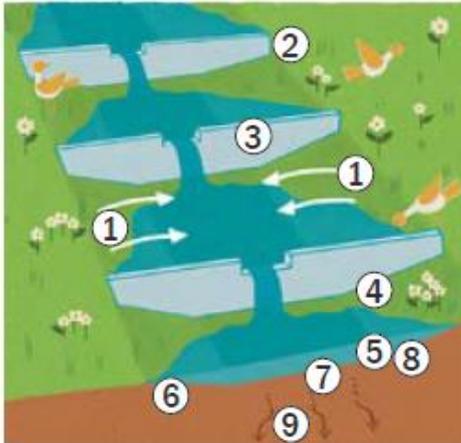
Pueden clasificarse según (Redondo, 2019):

- Cunetas tradicionales: Son canales recubiertos de césped y que tienen como único objetivo transportar el agua de escorrentía. Este tipo de TDUS se verá más detenidamente en el siguiente elemento. En algunos estudios reciben el nombre de "Canales de césped".
- Cuneta vegetal seca: Es un canal vegetado que dispone de un filtro realizado con suelo muy permeable, o un medio poroso artificial, que hace las veces de dren. El sistema se diseña para que todo el volumen de calidad se infiltre hacia

el medio a través del fondo del canal. Como la mayoría del tiempo permanece sin agua, son la opción más empleada en entornos urbanos.

- Cuneta vegetal húmeda: Es un canal vegetado diseñado para retener de un modo permanente un volumen de agua.

De este modo se dan las condiciones para que subsista vegetación como la de los humedales. Para mantener el volumen permanente es necesario que la superficie freática esté muy elevada, a veces incluso intercepta al canal, o que el suelo sea muy impermeable.



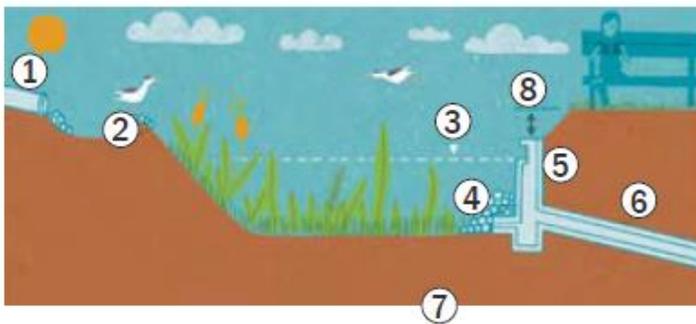
1. Escorrentía urbana
2. Máxima pendiente recomendada 5%
3. Terrazas intermedias cuando >5%
4. Altura de la hierba 15 cm.
5. Forma trapezoidal
6. Altura de tratamiento = 2/3 hierba
7. Ancho máximo 3m.
8. Pendiente lateral = 3:1
9. Infiltración

Figura 7. Componentes de las cunetas verdes. Fuente: (Otaño, 2018)

Las cunetas verdes cumplen su principal función al imitar el régimen de drenaje natural, al permitir que el agua escurra a través de la vegetación, disminuyendo el caudal gracias a que facilitan el proceso de filtración (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020). Suelen estar diseñadas para proporcionar una combinación de conducción, infiltración, detención y tratamiento de la escorrentía.

Depósitos de detención

Los depósitos de detención son estanques o depósitos diseñados para almacenar temporalmente los volúmenes de escorrentía generados aguas arriba, para posteriormente realizar una liberación lenta del agua. Estos sistemas se diseñan para que no almacenen un volumen permanente entre los sucesos de lluvia.



1. Entrada agua
2. Disipador de energía
3. Volumen de diseño
4. Salida filtrada
5. Estructura de rebose
6. Salida
7. Infiltración
8. Resguardo mín 0,3m.

Figura 8. Componentes de los depósitos de detención. Fuente: (Otaño, 2018).

La escorrentía discurre hacia ellos donde se van acumulando hasta un determinado momento en el que sale un caudal más bajo que el caudal de entrada, laminando así el flujo. (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020)

Depósitos de infiltración

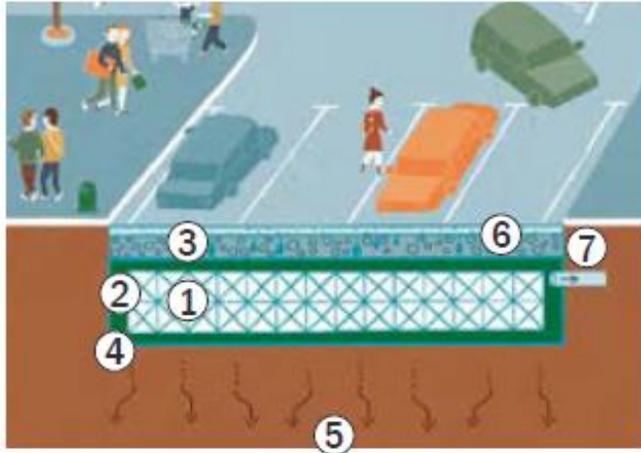
Estos para (Otaño, 2018) son depósitos enterrados, generalmente construidos a partir de sistemas geo celulares, que permiten la acumulación del agua y su infiltración al terreno.

La principal diferencia con las zanjas de infiltración realmente radica en su escala.

Suelen clasificarse en (Rodríguez Arbelo, 2017):

- Depósitos superficiales: Pequeños estanques de poca profundidad ubicados en suelos permeables. Aprovechan depresiones naturales o excavadas.

- Depósitos enterrados: Sistemas geocelulares de alta resistencia, módulos de material plástico con un alto índice de huecos. Se utilizan para crear estructuras para el almacenamiento y/o infiltración de agua de lluvia por debajo del nivel del terreno.



1. Bolques geocelulares
2. Geotextil permeable
3. Material granular
4. Geotextil permeable
5. Infiltración
6. Superficie permeable
7. Conducto de rebose

Figura 9. Componentes de los depósitos de infiltración. Fuente: (Otaño, 2018).

Depósitos de lluvia

Los depósitos se emplean para recolectar y almacenar el agua de lluvia que cae

principalmente en la cubierta de una edificación, o de otra superficie de captación.



1. Tejado
2. Canaleta/Bajante
3. Depósito de almacenaje
4. Filtro
5. Entrada anti-turbulencia
6. Rebosadero con sifón
7. Toma de agua
8. Equipo de control
9. Red de agua no potable
10. Sensor de nivel de agua
11. Tubería de aspiración
12. Rebosadero del equipo de control
13. Tubo de agua potable para realimentación
14. Tubo de servicio
15. Infiltración

Figura 10. Componentes de los depósitos de lluvia. (MSC Agua, 2020)

Su funcionamiento está basado en que el agua que precipita sobre el techo va a parar a unas

canaletas que la conducen hacia un bajante que desemboca en el depósito de recolección de lluvia.

Aquí se conserva para, posteriormente, darle algún uso, como sería agua de riego, para cisternas de baño, agua para lavar, etc. Con este aprovechamiento se consigue reducir el gasto de agua de la red de abastecimiento.

Estanques de retención

Estos son estanques construidos con un volumen de agua permanente igual al volumen de calidad de agua. Las aguas de escorrentía cuando entran en el depósito desplazan a las existentes.

A la vez, (Rodríguez Arbelo, 2017) los clasifica en:

- Estanques de retención extendida: El volumen permanente es una fracción del volumen de calidad de agua (superior al 50%). Posee un rendimiento de

eliminación similar a los estanques de retención, pero requieren menos espacio.

- Micro estanques de retención: Con estas técnicas se retiene un porcentaje del volumen de calidad de agua inferior al 20%. Son similares a los estanques de detención extendida. Se obtienen buenos rendimientos para cuencas pequeñas.
- Sistemas de estanques múltiples: Se dimensionan de modo que la suma del volumen permanente en todos los estanques sea igual al volumen de calidad de agua. Como se incrementan los tiempos de recorrido del agua proporcionan más eliminación y protección aguas abajo. En contrapartida requieren más espacio.

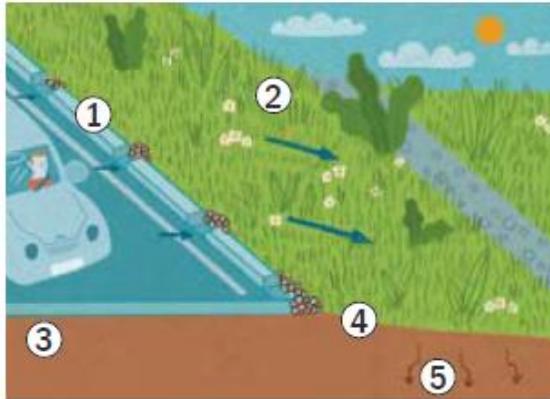


Figura 11. Componentes de los estanques de retención. Fuente: (Otaño, 2018)

Franjas filtrantes

Las franjas filtrantes son áreas uniformes, anchas, con una pendiente suave y cubiertas con una densa grama. Su función más relevante es tratar la calidad de la escorrentía de las áreas adyacentes aguas arriba, reduciendo los niveles de partículas contaminantes. Además, se suelen disponer de bermas en los bordes de la franja filtrante con el objeto de que el agua pueda ser retenida e infiltrada en el terreno. (Redondo, 2019)

Y, para (Rodríguez Arbelo, 2017) las franjas filtrantes son similares en su composición a las zanjas de infiltración, con la diferencia de su efectividad en la función del transporte, siendo habitual que incorporen una tubería de drenaje para facilitar esta función. Son habituales en terrenos con capacidad de infiltración baja o donde existe peligro de contaminación de aguas subterráneas.



1. Acceso de agua
2. Vegetación, pendiente $< 10\%$
3. Ancho de pavimento max. 18m.
4. Ancho vegetación mín 4,5m.
5. Infiltración

Figura 12. Componentes de las franjas filtrantes. Fuente: (Otaño, 2018)

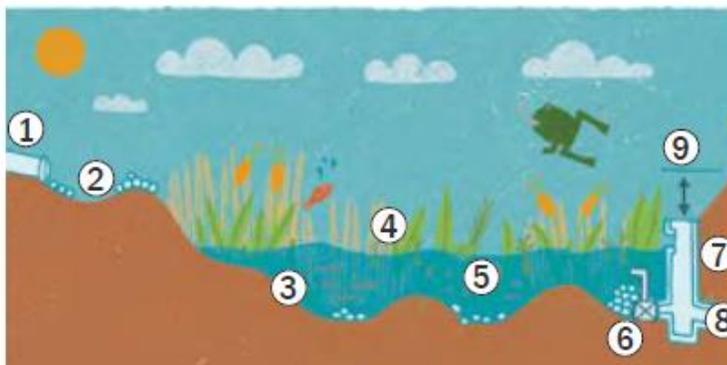
El funcionamiento de las franjas filtrantes se presenta al imitar el régimen del drenaje natural, permitiendo que el agua escurra a través de la vegetación a baja velocidad facilitando la filtración de las partículas suspendidas y ralentizando la velocidad del flujo.

Humedales artificiales

Los humedales permiten el almacenamiento de agua de escorrentía y flujos subterráneos, de

escasa profundidad y con una elevada densidad de vegetación emergente, propia de pantanos y zonas húmedas. Esta alta cantidad de vegetación hace que sean capaces de generar altos niveles de eliminación de contaminantes como sólidos en suspensión, metales pesados, nitrógeno y coliformes de entre el 50 – 90%. (Rodríguez Arbelo, 2017)

Además de la gran efectividad en el control de la calidad del agua, también son muy útiles en el control del volumen de escorrentía.



1. Entrada
2. Disipador de energía
3. Fondo irregular
4. Volumen variable
5. Volumen permanente
6. Válvula
7. Rebose
8. Conducto de salida
9. Resguardo mín 0,3m.

Figura 13. Componentes de los humedales artificiales. Fuente: (Otaño, 2018).

Además, indica (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020) que los humedales pueden tener forma irregular, con bases anchas y taludes laterales suaves, cubiertos de vegetación. Permiten el almacenamiento temporal por encima de la superficie del terreno en forma de lámina de agua, alcanzando profundidades máximas aproximadas de 10 cm. Para su instalación se puede aprovechar pequeños espacios abiertos en jardines y lugares públicos o privados donde se pueda producir la infiltración.

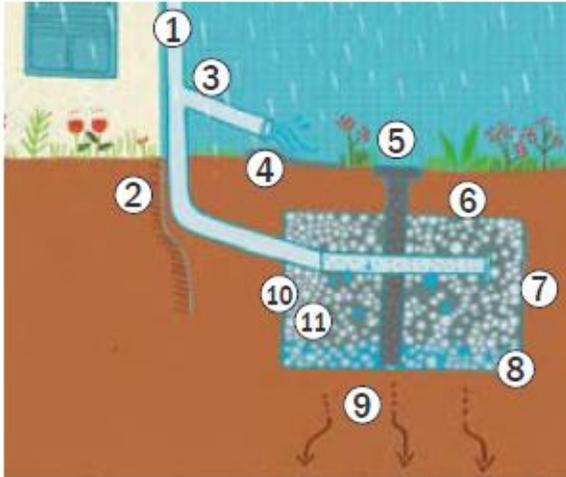
Los pozos de infiltración son sistemas subterráneos de almacenamiento temporal de la escorrentía de los tejados de las edificaciones (Redondo, 2019). El volumen de escorrentía almacenado por estos sistemas se infiltra en el suelo que rodea la zanja. Aunque los tejados no son una fuente importante de contaminación, sí que lo son de volumen de escorrentía. Estos sistemas se aplican para reducir el volumen de escorrentía enviado hacia los sistemas de tratamiento situados aguas abajo de la cuenca y, de este modo, reducir su tamaño.

Pozos de infiltración

Además, pueden clasificarse según (Rodríguez Arbelo, 2017) en:

- Relleno granular: La infiltración se produce al pasar el agua a través de una capa de áridos gruesos (pétreos o de materiales plásticos) con una porosidad mínima del 30%.

- Módulos geo celulares: El volumen de almacenamiento se genera gracias a estructuras prefabricadas modulares huecas.
- Con cámara: En este caso el pozo cuenta con una cámara de obra donde el agua se almacena mientras se infiltra a través del fondo, cubierto de material granular.



1. Bajante
2. Cimentación
3. Rebosadero
4. Dissipador de energía
5. Abertura de inspección
6. Cobertura
7. Profundidad mínima 0,65m.
8. Diámetro de 0,6 a 1,5 m.
9. Terreno de infiltración
10. Lámina geotextil
11. Áridos gruesos

Figura 14. Componentes de los pozos de infiltración. Fuente: (Otaño, 2018)

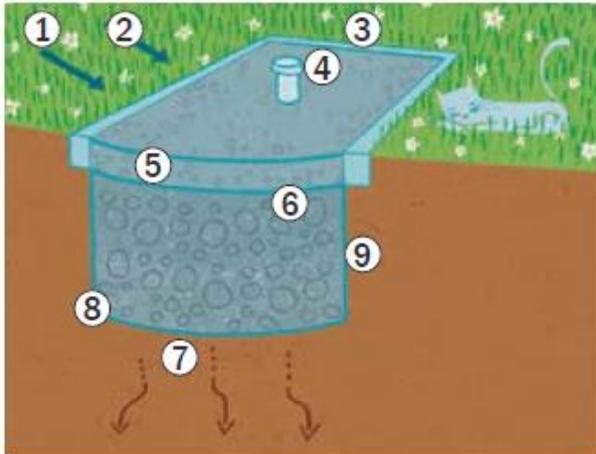
A estos pozos llega el agua de escorrentía procedente de las zonas adyacentes. Que puede ingresar a través de la superficie o desde redes de conductos.

Poseen dos funciones principales según (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020), la primera almacenar agua temporalmente en el volumen del cilindro del pozo y la segunda infiltrarla en el terreno. Se recomienda que los pozos cuenten con un rebose previo que impida la entrada al pozo de un mayor volumen de agua para el que fue diseñado puesto que puede provocar colmataciones a la larga.

Las zanjas de infiltración son zanja excavadas en el terreno y rellena de material granular o geo celular que permite el almacenamiento y la infiltración de la escorrentía urbana en el suelo que rodea a la zanja (Redondo, 2019).

La infiltración hacia el terreno se realiza durante un periodo de 2 días. Una de las principales ventajas de las zanjas de infiltración es que, además de tratar la contaminación asociada a la escorrentía urbana, ayudan a preservar el balance hídrico, proporcionan un volumen de recarga a los de acuíferos y contribuyen a preservar los caudales base de pequeños arroyos y cauces.

Zanjas de infiltración



1. Pre - tratamiento
2. Flujo superficial
3. Ancho de la zanja
4. Abertura de inspección visual
5. Gravass finas
6. Gravass gruesas
7. Terreno de infiltración
8. Lámina geotextil
9. Profundidad 1-2m.

Figura 15. Componentes de las zanjas de infiltración. Fuente: (Otaño, 2018)

Su principal funcionamiento es almacenar en un lecho de gravas o de celdas plásticas un volumen de agua que se infiltra en el subsuelo por el suelo y las paredes de la zanja. (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020)

Superficies permeables

Las superficies permeables son superficies formadas por uno o múltiples tipos de materiales que principalmente permiten el paso del agua a través de la misma superficie, facilitando la infiltración del agua hacia el terreno y permitiendo ser almacenada incluso en las capas subsuperficiales, para posteriormente ser evacuada o reutilizada. Es importante tener en cuenta que, si este SUDS se compone de varias capas, todas ellas han de tener permeabilidades crecientes desde la superficie hacia el subsuelo,

esto considerando como objetivo de que el agua fluya a través de la superficie permeable y no se quede retenida en su interior.

Existen diversos tipos de superficies permeables, por ejemplo:

- Pavimentos continuos de cualquier tipo de mezcla porosa (asfalto, concreto, resinas, etc.).
- Gramoquín.
- Gravass.
- Bloques impermeables con juntas permeables.
- Pavimento de bloques impermeables con huecos rellenos de grama o grava.
- Pavimento de bloques impermeables con ranuras sin relleno alguno.
- Pavimento de bloques porosos.



1. Pavimento permeable
2. Capa de apoyo de arena
3. Gravass medias
4. Almacenamiento grava
5. Suelo natural
6. Infiltración

Figura 16. Componentes de las superficies permeables. Fuente: (Otaño, 2018).

Techos verdes

Los techos verdes se definen como sistemas multicapas con cobertura vegetal que se implantan en tejados, terrazas y azoteas de las edificaciones: viviendas, centros comerciales, entre otros. Concebidas para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y laminando el caudal punta.

Dentro de los techos verdes se pueden identificar diferentes tipos, que varían principalmente en función de la profundidad del sustrato y de su vegetación (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020) y (Redondo, 2019):

- Extensivas: son cubiertas ligeras, por lo que la vegetación es baja, pueden ser llanas o inclinadas y apenas necesitan mantenimiento, ya que las plantas resisten con pocos requerimientos de agua, fertilizantes o de la adición de nutrientes. Espesores 20 – 150 mm, se

recomiendan plantas resistentes a sequías (Sedum).

- Intensivas: son similares a un jardín convencional con sustrato mayores a 125 mm, permiten incluso su uso y ser equipadas con mobiliario, lo cual implica mayores cargas estructurales. Requieren mayor mantenimiento.
- Semi – Intensivas: Las características de este sistema son una combinación de las asociadas a anteriores, con una profundidad media de entre 120 mm y 250 mm y algunas necesidades de mantenimiento.
- Biodiversas: es similar en composición a una cubierta extensiva, pero se diseña específicamente para crear un entorno que pueda ser colonizado naturalmente por plantas, insectos y pájaros, creando un hábitat similar al que había antes del desarrollo urbano.



1. Filtro de hojas
2. Grava
3. Vegetación
4. Sustrato
5. Lámina geotextil filtrante
6. Drenaje/ Almacenamiento
7. Membrana impermeable
8. Aislante térmico
9. Estructura
10. Bajante

Figura 17. Componentes de los techos verdes. Fuente: (Otaño, 2018)

Su funcionamiento también podrá variar ya sea si cubre total o parcialmente el techo de un edificio. Estos techos tienen diferentes propósitos (Abéllan, Martín, & Otaño, 2020):

- Uno es la absorción de lluvia que queda retenida por la vegetación, el sustrato y en algunas de las capas inferiores antes de pasar a la red de alcantarillado.
- Proporcionan aislamiento térmico.
- Son capaces de crear un hábitat para la fauna.

- Contribuyen a bajar la temperatura del aire urbano combatiendo de esta forma el efecto isla de calor.

Selección de técnicas

Se deben de tener en cuenta ciertos criterios de selección, que serán de utilidad para la elección, dimensionamiento y ubicación de las técnicas para

el proyecto que se quiera llevar a cabo. En este sentido la organización Construction Industry Research and Information Association (CRIA) es una de las principales dedicadas al estudio de las técnicas SUDS y ha propuesto al menos cuatro matrices de selección teniendo en cuenta diversos factores; las matrices de selección pueden observarse en el Anexo 6:

- Matriz de selección en función de las características físicas del lugar.
- Matriz de selección en función de los usos del suelo.

- Matriz de selección en función del rendimiento en el control de la cantidad y calidad del agua.
- Matriz de selección en función de factores ambientales y sociales.

Módulo LID

Cabe mencionar que SWMM posee un módulo de SUDS, o como menciona el programa, de LIDs, acá se ejemplifican algunos:



Figura 18. Infraestructura verde presente en SWMM.
Fuente: (USEPA, 2016).

Este módulo de SWMM permite realizar simulaciones y contemplar los diferentes procesos que se indican en las medidas estructurales, ligados a los controles en origen, la retención, captura, transporte e infiltración de las escorrentías de agua urbanas, los cuales son los procesos típicos en los sistemas SUDS. Dichos procesos, se consideran como características de la propia cuenca de estudio. Para (Calabuig Belda, 2016), este módulo consiste en: destinar una nueva cuenca en el modelo matemático íntegramente destinado a la definición del LID. De manera simplificada, en la siguiente figura se visualiza el modo de funcionamiento tras la implementación del módulo, al contemplar las

áreas que se deban añadir, se tendrá la siguiente conceptualización para áreas permeables, impermeables y LID:

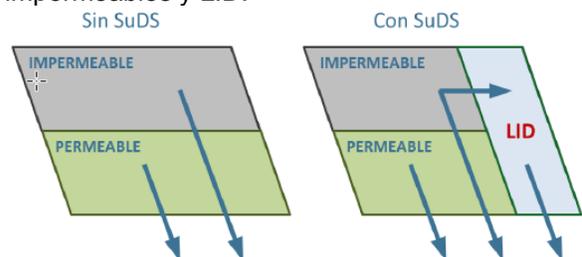


Figura 19. Cambio en el concepto de áreas al utilizar el módulo LID de SWMM.
Fuente: Adaptado de (Rossman L., 2015).

Metodología

Actividades preliminares

Este paso esencialmente trata sobre la búsqueda de información, por lo cual se realizó:

- Diversas consultas a la Municipalidad de Puntarenas con el fin de recabar información planimétrica o altimétrica de la zona.
- Visita al sitio, para efectuar un registro visual y de identificación de estructuras de alcantarillado pluvial, así como, para analizar las condiciones del terreno, pues será vital, tanto para el trazado de la red, como para la identificación de los puntos de descargas pluviales.
- Obtención de los datos de las estaciones meteorológicas, se realizó por medio de una solicitud al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), en cumplimiento con el documento de "Requisitos para obtener y utilizar datos e información meteorológica".

- Que se encuentren a menos de 20 km de distancia de la zona en estudio.
- Tengan como mínimo un período de registro de datos de 10 años.
- En el caso que varias estaciones cumplan con el período mínimo, debe verificarse que entre ellas coincidan sus datos por un período similar de 10 años.
- Finalmente, se dará preferencia a los registros de datos más recientes.

De las estaciones indicadas anteriormente, únicamente la 78027 cumple con lo indicado, a pesar de que se encontraba aún más lejana en relación con la 80002 que se ubica en Barranca. No obstante, cumplía a cabalidad con las indicaciones anteriores.

Pluviometría

Inicialmente se identificaron las estaciones meteorológicas cercanas a la zona en estudio:

- 78006 en Miramar.
- 78027 en Puntarenas.
- 82002 en San Miguel de Barranca.

Con la finalidad de recopilar datos de precipitación que se pudiesen considerar para el análisis respectivo, para esto se estableció el siguiente criterio de escogencia final para, la o las estaciones:

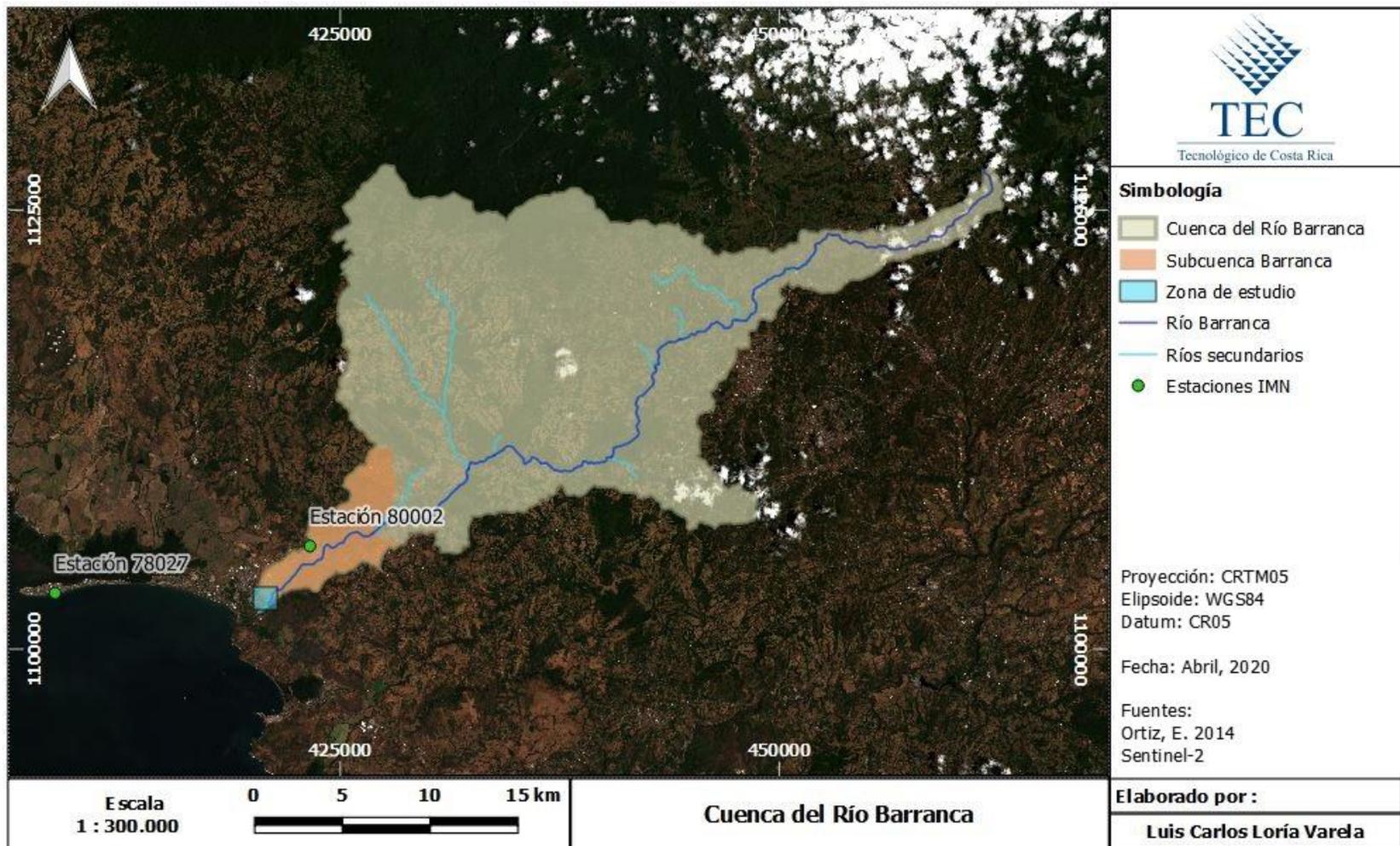


Figura 20. Cuenca del Río Barranca, y ubicación de estaciones meteorológicas cercanas a la zona.

Completación de datos

En Costa Rica, como en América Latina, hay notables carencias en las redes de medición, lo que limita en gran medida la disponibilidad de datos y a la vez su nivel de confianza, por ello, es necesario emplear métodos o herramientas de la hidrometeorológica que faciliten la obtención de una serie de datos más confiables o uniformes, esto se realiza por medio de la estimación, completación o extensión de las series de datos.

La completación tiene lugar, por ejemplo, si para determinado registro de datos de un pluviómetro se presentan series incompletas, o una ausencia de valores sin justificación. Si se cuenta sólo con un pluviómetro y el mismo posee series incompletas, se puede optar por la utilización del método racional deductivo, propuesto en el caso de no contar con estaciones cercanas y que la estación propia posea al menos 10 años de registro (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998).

El método racional deductivo considera que la precipitación del mes faltante es igual al porcentaje de precipitación promedio mensual, respecto al total anual acumulado promedio en esa estación, por lo cual, la precipitación del mes faltante se estima como:

$$P_i = \frac{\sum P}{(12 \times 100\%) - \sum S_i} \times S_i \quad \text{Ec. 18}$$

Dónde:

Pi: es la precipitación por estimar.

i: es cada uno de los meses desconocidos.

$\sum S_i$: es la suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce y el porcentaje promedio asignado.

Análisis de frecuencias

Una vez completado el registro de precipitaciones, se seleccionan las máximas precipitaciones por

año de registro y se deberán realizar los procesos de:

- Análisis de datos dudosos.
- Distribuciones de probabilidad.
- Pruebas de bondad de ajuste: Smirnov – Kolmogorov.

Análisis de datos dudosos

Una vez obtenidos los datos, se debe comprobar la calidad de estos, que sean congruentes entre sí; ya que estos de no serlo, pueden afectar significativamente el posterior análisis estadístico. Por ello, se recomienda (Chow, Maidment, & Mays, 1994) el método del U.S. Water Resource Council, que establece las siguientes ecuaciones de frecuencia para detectar datos dudosos para límites altos y bajos:

$$Y_A = \bar{y} + K_n S_y \quad \text{Ec. 19}$$

$$Y_B = \bar{y} - K_n S_y \quad \text{Ec. 20}$$

Dónde:

Y_A: Indica límite alto o superior.

Y_B: Indica límite bajo o inferior.

Y: la media aritmética de los logaritmos de los datos de estudio.

K_n: Coeficiente de datos dudosos, depende de la muestra.

S_y: Desviación estándar de los logaritmos de los datos de estudio.

Los datos que no estén dentro de los límites son considerados dudosos y se deberán excluir del análisis, y de ser necesario, realizar nuevamente la completación sin estos datos. Los valores de “K_n” para datos dudosos se muestran en el Anexo 2, los mismos son para un nivel de significancia del 10%, con información normalmente distribuida.

Distribución de probabilidades

Al contar con los datos de precipitación completados y comprobados, se deberán utilizar modelos probabilísticos que representen de forma

satisfactoria el comportamiento de la precipitación (Villón, Hidrología Estadística, 2006). Existen varias distribuciones de probabilidad que se usan en el diseño hidrológico.

En este caso, se utilizarán diferentes distribuciones para obtener aquella que mejor se ajuste, estas serían las siguientes, y sus respectivas fórmulas pueden observarse en el Anexo 3:

- Normal.
- Log normal de dos parámetros.
- Log normal de tres parámetros.
- Gamma de dos parámetros.
- Gamma de tres parámetros.
- Log Pearson tipo III.
- Gumbel.
- Log Gumbel.

Pruebas de bondad de ajuste: Smirnov – Kolmogorov

La prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov, permite verificar la calidad del ajuste, esto se realiza mediante la comparación de las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo (Villón, Hidrología Estadística, 2006), de la siguiente forma:

$$\Delta = \max |F(x) - P(x)| \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

Δ : estadístico de Smirnov – Kolmogorov.

$F(x)$: probabilidad de la distribución teórica.

$P(x)$: probabilidad empírica de los datos.

Para determinar la probabilidad empírica, deben ordenarse los datos de menor a mayor y se trabaja con la probabilidad de excedencia que posee cada valor de la muestra, para lo cual, se utiliza la fórmula de Weibull:

$$P(x) = \frac{M}{N + 1} \quad \text{Ec. 22}$$

Dónde:

$P(x)$: probabilidad empírica de los datos.

M: número de orden.

N: número de datos.

Una vez definidas, tanto la probabilidad de la distribución teórica, como la probabilidad empírica y haber calculado el estadístico de Smirnov – Kolmogorov, se debe comparar con el valor crítico del estadístico Smirnov – Kolmogorov, para ello, se puede utilizar la tabla del Anexo 4.

Al poseer ambos valores, se debe utilizar el siguiente criterio para establecer la bondad del ajuste:

- Si $\Delta < \Delta_0$ el ajuste es bueno.
- Si $\Delta > \Delta_0$ el ajuste no es bueno, lo cual implicaría utilizar otra distribución o registro de datos a evaluar.

Coefficientes precipitación – duración

Ante la carencia de información pluviográfica en la zona, que establezcan relaciones para lluvias de 24 horas, es viable la utilización de coeficientes de duración, para obtener diversas magnitudes de precipitación horaria.

Cabe indicar que tales coeficientes han sido objeto de estudio por diversos investigadores, tales como, (Bell, 1969), (Espildora, 1971) o (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998), e incluso (Goswani, 1973) ha demostrado la confiabilidad de dichos coeficientes de precipitación – duración al evaluar el uso de los encontrados en los Estados Unidos en otras partes del mundo; lo anterior es aplicable para los coeficientes calculados por Espildora y Campos, quienes han realizado estudios en Chile y México, respectivamente.

En este proyecto se pretenden utilizar los valores de Campos, los cuales se obtuvieron al comparar 8 criterios de estimación y están en el Anexo indicado.

Curvas IDF

A partir de los valores máximos de precipitación obtenidos, se deberá construir una tabla de la intensidad según el período de retorno.

Para obtener las magnitudes de los parámetros de ajuste de la ecuación 1. Primero se realiza el siguiente cambio de variable:

$$d = K \cdot T^m \quad \text{Ec. 23}$$

De esta forma se obtiene la expresión:

$$I = d \cdot t^{-n} \quad \text{Ec. 24}$$

Con lo cual se realiza una regresión potencial para obtener así, el parámetro “n”; del resultado obtenido se repite el proceso de cambio de variable y de regresión potencial para obtener los parámetros restantes de “K” y “m”.

Y a partir de los parámetros de ajuste obtenidos, se puede completar la ecuación de intensidad para la estación pluviométrica escogida. Obtenida dicha ecuación, es posible tabular valores para distintos períodos de retorno y de duración y, de los cuales se obtendrá la gráfica de las curvas IDF.

Caracterización del área de estudio

La comunidad de Juanito Mora se localiza en el distrito de Barranca, cantón central de la provincia de Puntarenas, la zona de estudio se ubica de la siguiente forma:

- Coordenadas en la proyección CRTM05: entre las longitudes oeste 421235 y 420135 y, entre las latitudes norte 1102350 y 1103450.
- Y para el datum WGS84: entre las longitudes 84°43'42.2" O y 84°43'06.2" O, y las latitudes 9°58'06.6" N y 9°58'42.6" N.

Juanito Mora podría considerarse como un conjunto urbano cerrado, dado que no posee conexión con los barrios que limitan al noreste o suroeste, además, limita al noroeste con una carretera secundaria y una ciclovía. Se localiza en la parte inferior de la cuenca del Río Barranca, por lo que al sureste limita con el cauce de dicho río.

Este urbanismo posee un área de 34.6 ha, y puede decirse que se subdivide en 8 avenidas principales y 10 calles que intercomunican los diversos sectores internos, tiene una pendiente media de 1.33% que desciende en dirección noreste –

suroeste. La cota más baja del terreno se encuentra a 2.92 m y la más alta a 19.28 m. En general, la zona tiene un relieve llano y pendiente relativamente uniforme, únicamente en los tramos finales es más pronunciada.

Esta localidad es de las que posee mayor densidad poblacional en Barranca, con aproximadamente 3500 habitantes, los cuales, se han visto afectados en múltiples ocasiones debido a inundaciones, dado que carecen de un alcantarillado pluvial, que ha repercutido en daños materiales, en la calidad de vida y condición de salud de los pobladores.

Para definir las características topográficas del barrio de Juanito Mora, se digitalizan los puntos y curvas de nivel que facilitó el Ing. José Chan, topógrafo de la Municipalidad de Puntarenas. A través de esto, se realizó una interpolación triangular TIN, en AutoCAD Civil 3D 2020 para obtener el modelo de elevación digital del terreno, y se georreferencia en coordenadas CRTM05. Posteriormente se obtuvieron los siguientes modelos:

- Modelo digital de elevaciones.
- Direcciones de Flujo.
- Pendientes del terreno.

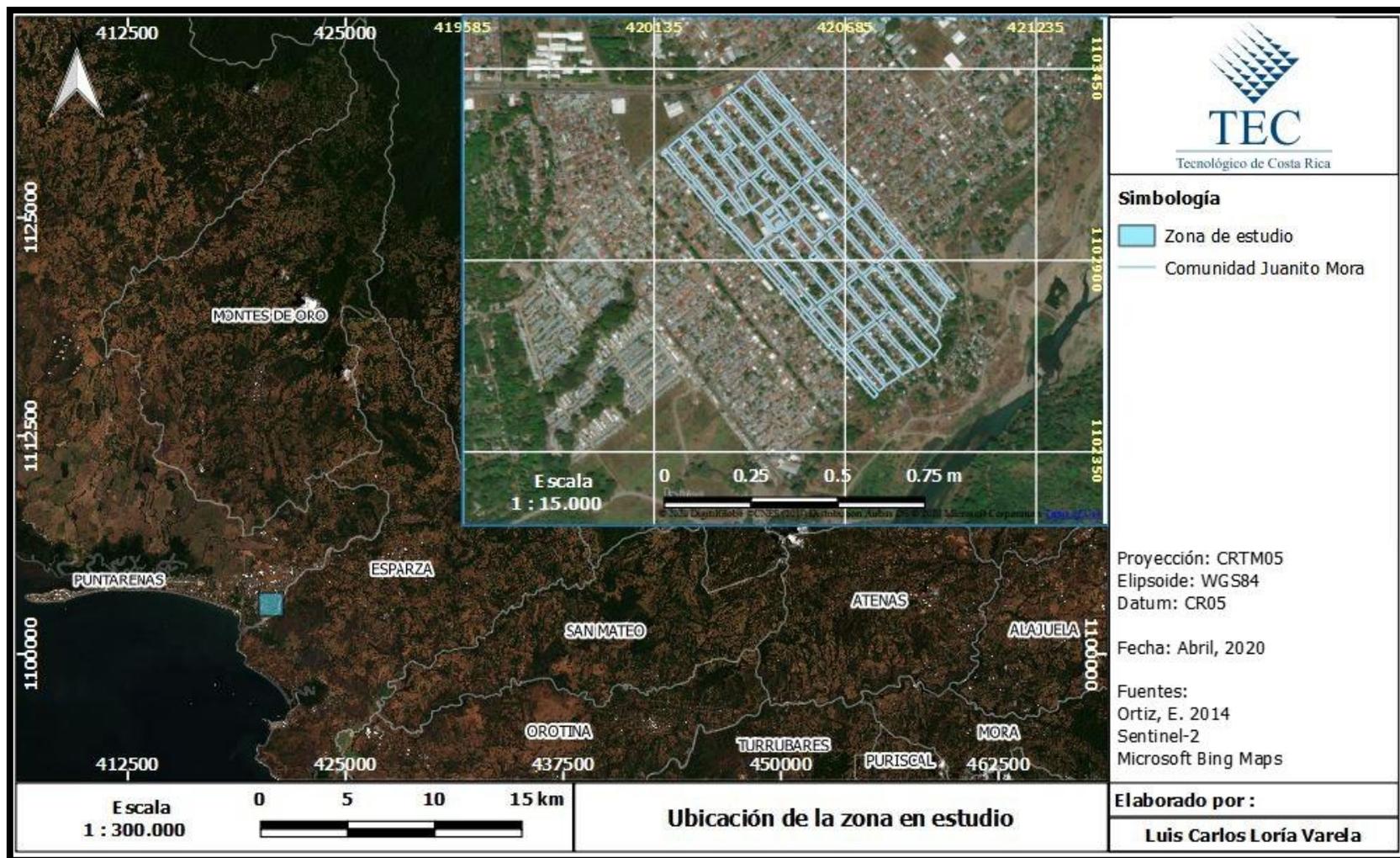


Figura 21. Ubicación de la zona de estudio. Trazado de red.

Para el trazado de la red se han de considerar los diversos elementos que inciden en la superficie, tales como, los valores de planimetría y altimetría citados anteriormente, así como, la estructura ya existente, sean edificios, carreteras, parques, etc. Además, se toma como referencia el ráster de la dirección de flujo.

Dada las características de la localidad, se establecerán dos colectores principales, estos se ubicarían prácticamente a lo largo de la avenida 3 (salida en avenida 1) y de la avenida 8 (salida en avenida 6), ambos desembocarían cerca del cauce del río Barranca. Finalmente, todo esto se toma en cuenta para la colocación de los pozos respectivos, además, se garantiza que se cumpla con los lineamientos del AyA en relación con el posicionamiento y distancia de estos.

Áreas de drenaje

Las áreas de drenaje (o subcuencas) para cada pozo se realizan de acuerdo al trazado y a las características de la superficie obtenidas con anterioridad, y si bien, ciertos autores como (López, 2003), recomienda obtener las áreas de cada pozo mediante el uso de bisectrices en cada manzana, cabe recordar que este proceso tiene como objetivo capturar el efecto de la variabilidad espacial en la topografía, cauces de drenaje, porcentaje de impermeabilidad, y demás características del suelo para que idealmente, se represente cada sector de la cuenca de forma uniforme; y casi no se modela a tal nivel de detalle. Por ello, este proceso se simplificó mediante el uso de polígonos irregulares de cuatro lados.

Por medio de QGIS se realizaron capas para tres tipos de zonas:

- Calles y avenidas.
- Viviendas y edificios.
- Zonas verdes.

Y a cada área de drenaje se le asignan sus respectivos valores de: área, longitud máxima y pendiente de la superficie (esta se extrae del modelo creado anteriormente).

Flujo uniforme

Una vez trazada la red, se realiza un cálculo previo mediante método racional, considerando flujo uniforme, es importante recalcar que esto debe considerarse como un pre-dimensionamiento de la

red de alcantarillado pluvial, en este apartado se hará uso de una hoja de cálculo de Excel, en la cual, se realizarán los siguientes procesos:

- Determinar el caudal de escorrentía que ingresa a cada pozo, mediante la fórmula del método Racional (Ec. 10).
- Se estima el diámetro de sección necesario mediante la ecuación Ec. 11. Y se elige un diámetro nominal (comercial) superior al obtenido.
- Se determinan las diversas propiedades hidráulicas de la sección.
- Se obtiene la velocidad real mediante la Ec. 8.
- Deben realizarse las siguientes revisiones:
 - El esfuerzo tractivo debe ser superior a 0.1 kg/m².
 - La relación Y/D debe ser inferior a 0.85.
 - La velocidad máxima a flujo lleno debe ser de 5 m/s.
 - El número de froude debe ser estable, para lo cual no debe encontrarse en el rango de 0.9 a 1.1.
- Finalmente, se obtienen las cotas de terreno, de la rasante y, de cobertura, tanto iniciales como finales.

Tiempos de concentración

Al poseer las longitudes y pendientes, se calculan los tiempos de concentración mediante las fórmulas de Kirpich y Témez. Además, el tiempo de concentración se irá actualizando conforme se inicie el pre-dimensionamiento del diámetro para cada tramo, dado que debe considerarse el tiempo de viaje que posee el flujo y, el coeficiente de escorrentía que debe variar según el área.

Respecto a este último, se optó por hacer un promedio ponderado según cada subcuenca, de la siguiente forma:

$$C_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i A_i)}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

C_{prom} = Coeficiente de escorrentía promedio.

C_i = coeficiente de escorrentía de la subcuenca i .
 A_i = área de la subcuenca.

Intensidad

Finalmente se obtiene el valor de intensidad mediante la Ec. 1, para ello, se utiliza un período de retorno de 10 años y la duración del tiempo de concentración que posee cada área de drenaje, aunque debe considerarse un tiempo de concentración mínimo de 10 minutos según la normativa técnica nacional.

Flujo no permanente

Una vez que se cuenta con el pre-dimensionamiento de la red, se procede con la parametrización del modelo numérico de cálculo hidráulico del SWMM. Para la correcta modelación, se deben definir los siguientes elementos: catálogo de materiales y de secciones, elementos de la red, subcuencas y series temporales de lluvia. Del pre-dimensionamiento anterior y las capas en QGIS, ya se cuenta con los datos de:

- Área.
- Longitudes.
- Pendiente.
- Cotas de terreno.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para tubería.

Tormenta de diseño

Para la obtención de la tormenta de diseño, se debe contemplar las curvas IDF de la metodología indicada en Pluviometría.

Teniendo dichas curvas como base, se aplica el método de bloques alternos, en intervalos de 5 min para un período de retorno de 10 años y una duración de 40 min.

$$b_k = k \cdot I_{(k \cdot \Delta t)} - \sum_{j=1}^{k-1} b_j \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

B_k = bloque de intensidad en mm/h.
 K = número de bloque.

I = Intensidad que corresponde al $k \cdot \Delta t$ minutos en mm/h.

Ancho característico

Este parámetro es uno de los menos tangibles en SWMM, usualmente se somete a procesos de calibración y de acuerdo con (Rossman L. , 2015) y (Gironás, Roesner, & Davis, 2009) se puede calcular al dividir el área de la subcuenca entre la longitud máxima del flujo.

$$W = A/L \quad \text{Ec. 27}$$

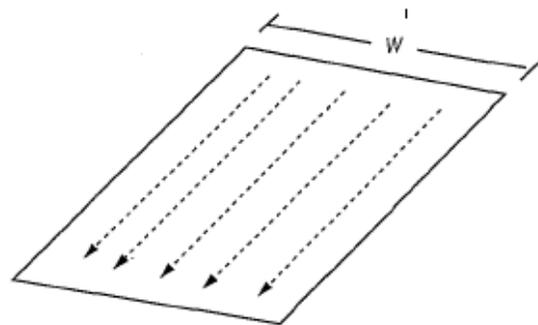


Figura 22. Ancho característico en un plano
 Fuente: (Macor, 2002).

Otros autores, como (DiGiano, 1977) o (Macor, 2002) utilizan otros método de cálculo, ya que consideran un factor de sesgo por la forma de la subcuenca, o bien, una idealización distinta, en caso de planos asimétricos o simétricos. No obstante, para efectos de este proyecto, se ha optado por realizar la medición de la longitud del flujo en QGIS, siendo en la mayoría de los casos una medición desde el extremo más largo, en el sentido noroeste a sureste, por lo cual, el ancho característico se ha calculado mediante la Ec. 27.

Coeficiente de rugosidad de Manning “n”

Este coeficiente corresponde al flujo superficial, y se han utilizado dos únicos valores de la Tabla 3. Coeficiente “n” de Manning para distintas superficies:

- “n” impermeable = 0.012.
- “n” permeable = 0.15.

Almacenamiento en depresiones

Los valores de este coeficiente son los indicados en la Tabla 4. Valores recomendados de almacenamiento en depresiones.

- Superficie impermeable = 1.25.
- Superficie permeable = 2.5.

Área impermeable sin almacenamiento en depresiones

Este parámetro se define de forma porcentual, e indica el área impermeable que no genera pérdidas por almacenamiento, por defecto el SWMM utiliza un valor de 25% que será el utilizado.

Porcentaje de área impermeable

Se utilizarán los siguientes valores:

Tabla 6. Valores de porcentaje de impermeabilidad para diferentes usos de suelo.

Uso de suelo	% Imperm
Edificios	80
Calles	98
Zonas verdes / baja densidad urbana	19
Aire libre urbano	11

Fuente: (Rossman L. , 2015).

Además, este parámetro debe ponderarse de la siguiente forma:

$$\%Imper_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^N (\%Imper_i A_i)}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

$\%Imper_{prom}$ = Porcentaje de impermeabilidad promedio.

$\%Imper_i$ = Porcentaje de impermeabilidad por tipo de suelo "i".

A_i = área de la subcuenca.

Flujo entre subáreas

Según la caracterización de la subcuenca pueden presentarse hasta 3 diferentes formas de enrutamiento de la escorrentía superficial.

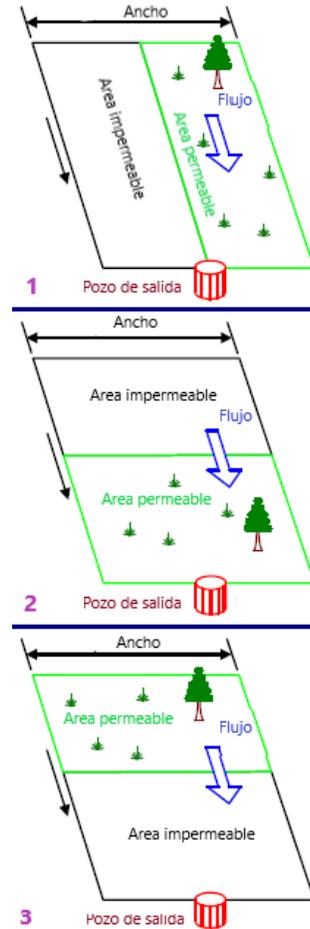


Figura 23. Configuraciones para el flujo entre subáreas. Adaptado de (Autodesk, 2017).

SWMM por defecto utiliza el #3, el cual, se le considera "impervious", donde el flujo se da permeable al área impermeable, #1 es cuando ambas áreas aportan directamente, #2 cuando el flujo se da de impermeable a permeable. En este caso, la mayoría del área de la zona de estudio corresponde al #3, excepto para los tramos finales que se ha considerado utilizar el #2, dado que prácticamente predomina área permeable.

Escorrentía transportada

Parámetro que indica el porcentaje de escorrentía que fluye entre las subáreas, este valor es difícil de estimar y se utilizará el valor por defecto del SWMM, el cual establece un 100%.

Número de curva

A partir de los valores definidos, se debe de obtener el promedio ponderado según cada subcuenca, de la siguiente forma:

$$NC_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^N (NC_i A_i)}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

NC_{prom} = Número de curva promedio.

NC_i = Número de curva según el tipo de suelo "i".

A_i = área de la subcuenca.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad cuantifica la incertidumbre, que puede definirse como una variación relativa en la salida de algún modelo (ya sea numérico o de otra índole) de acuerdo con las variaciones en los datos iniciales del mismo (Saltelli, 2002).

Los análisis de sensibilidad se pueden realizar con estos fines:

1. Para determinar los parámetros que deberán analizarse y así, reducir la incertidumbre.
2. Para determinar qué parámetros son irrelevantes y, pueden no contemplarse o eliminarse del modelo final.
3. Para determinar cuáles son los parámetros o datos de entrada que contribuyen más a la variabilidad del resultado del modelo.
4. Ayudar en la identificación de aquellos parámetros que están más correlacionados con el resultado final.
5. Una vez que el modelo esté en uso, servirá para indicar las consecuencias de cambiar un parámetro de entrada.

Sobre el procedimiento, si bien, hay muchas formas distintas de llevar a cabo un análisis de sensibilidad, el propuesto es el de perturbación de parámetros (Chapra, 1997), o bien, de "uno en uno", que consiste en cuantificar la sensibilidad al ir variando un parámetro a la vez, para un rango dado, mientras el resto de los parámetros, permanecen constantes; es decir, se obtendrá una tasa de cambio o error porcentual, con respecto a un cambio en los parámetros de entrada, como el porcentaje de impermeabilidad, el ancho característico, la pendiente superficial, entre otros.

Respecto al criterio para evaluar la tasa de cambio o la eficiencia del análisis, se evaluará simplemente mediante la estimación del error porcentual relativo:

$$EPR = 100 \cdot \frac{(x_{obs} - x_{sim})}{x_{obs}} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

X_{obs} = valor observado, o inicial para este caso.

X_{sim} = Valor simulado, o los resultados de los incrementos.

Relacionado a los parámetros, rangos y valores, estos fueron establecidos de acuerdo con los valores tomados y utilizados en la revisión bibliográfica y por recomendación técnica de la tutora, según su experiencia profesional en proyectos de esta índole, teniendo en cuenta rangos implementados en: SWMM, libros, o publicaciones de (Rossman & Huber, 2016), (Wanielista, 1990) y (Temprano, Arango, Cagliao, Suarez, & Tejero, 2006).

Para los primeros tres parámetros, las variaciones se llevan a cabo como porcentaje de reducción o aumento, a diferencia de otros parámetros adicionales, en los que los cambios en los valores son directos.

A continuación, se pueden observar los parámetros seleccionados, su valor inicial, rangos y delta de cambio que se usará en cada simulación.

Tabla 7. Rango de variación inicial, mínimo y máximo de los parámetros para el análisis de sensibilidad.

Componente	Símbolo	Valor inicial	Valor MIN	Valor MAX	Δ Cambio
<i>SUBCUENCA</i>					
% área impermeable	Imperv	(11% a 88%)	-20%	+20%	5%
Ancho característico	Width	(12.29 a 105.54)	-30%	+30%	10%
Pendiente superficial	Slope	(0.43% a 4.02%)	-15%	+15%	5%
N superficial impermeable	Nimp	0.012	0.010	0.024	0.002
N superficial permeable	Nperv	0.15	0.10	0.40	0.05
Depresión - impermeable	Simp	1.25	1	2.5	0.25
Depresión - permeable	Sperv	2.5	2.5	5	0.5
% Imp. Sin almacenamiento	Zero %	25	0	50	12.5%
Escorrentía transportada	Rted	100	0	100	20%
<i>INFILTRACIÓN</i>					
Número de Curva	Curveno	(69 a 98)	-15%	+15%	5%
<i>TUBERÍA</i>					
N Manning tubería	n Mann	0.009	0.009	0.015	0.001

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Escenarios con SUDS

Al haberse determinado el pre-dimensionamiento de la red y con ello, las condiciones hidráulicas y el comportamiento en general del sistema, se opta por seleccionar técnicas SUDS con la intención de mitigar la escorrentía y ciertos problemas de capacidad del modelo, además, de la posibilidad de disminución de diámetros de las tuberías.

Para la selección se tomaron en consideración las distintas tipologías de SUDS, junto con las matrices de selección propuestas por CIRIA, presentes en el Anexo 6.

Por lo tanto, los escenarios, incluyendo serían:

1. Pre-dimensionamiento inicial.**
2. Pre-dimensionamiento inicial + uso de techo verde.
3. Pre-dimensionamiento inicial + uso de pavimento permeable.
4. Nuevo diseño + uso de techo verde.**
5. Nuevo diseño + uso de pavimento permeable.**

** Poseen un análisis de sensibilidad para ciertos parámetros.

Para los techos verdes, se realizó la implementación de esta técnica de la siguiente forma:

- Definir un único tipo de techo verde extensivo.
- Los parámetros a utilizar se basan en revisión bibliográfica.
- El área por unidad se ha fijado en 150 m².
- Se establece un ancho por unidad de 15 m.
- Se consideraron casos de estudio que rondan entre 100% a 20% de uso del área total de los edificios, se optó por utilizar un 35% del área total de edificios para su colocación.
- Se considera que la unidad de techo verde es de 150 m², por lo que este porcentaje podría ser incluso menor en ciertas subcuencas, dado que tendrá sólo incidencia en la superficie impermeable de la subcuenca o área de drenaje, correspondiente a los Edificios, lo cual no va a afectar el porcentaje de superficie permeable que exista en la subcuenca, y el porcentaje de área impermeable deberá recalcularse.

Como se ha indicado, esta técnica modifica el área en el cual se coloque, en este caso será la superficie impermeable, concretamente la de edificios, por lo cual, se debe llevar a cabo un nuevo cálculo de la misma, a la vez, como se verá en la siguiente imagen (basada en la Figura 19 y Figura 23).

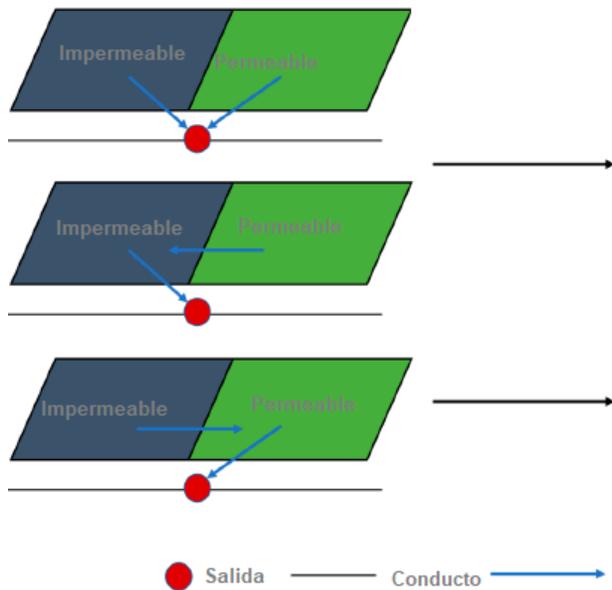


Figura 24. Modificación del área y ancho de una subcuenca al utilizar techos verdes en el SWMM. Adaptado de (Liang, Zhang, Xia, & She, 2020).

Respecto a los pavimentos permeables, se implementó esta técnica en el modelo SWMM de la siguiente forma:

- Definir un único tipo de pavimento permeable.
- Los parámetros a utilizar se basan en revisión bibliográfica.
- El área que se sustituirá será el 100% del área actual de pavimento, esto quiere decir que la totalidad de las calles sería permeable.

Análisis de sensibilidad

Para ambos escenarios (4 y 5) se contempla llevar a cabo un análisis de sensibilidad, pero únicamente seleccionando parámetros relacionados exclusivamente con techos verdes o pavimentos permeables, contemplados en el módulo LID del SWMM.

En el caso de techos verdes se adoptaron algunos valores, rangos y cambios recomendados con la tutora a cargo y, de revisión de: (Rossman L. , 2015), de (Rossman & Huber, 2016), y de (Bárcena Pasamontes, 2017). Mientras que en el caso de los pavimentos se hizo la revisión de parámetros y rangos de (Randall, Sun, Zhang, & Jensen, 2019), de (Arjenaki, Sanayei, Heidarzadeh, & Mahabadi, 2020), de (Vaillancourt, Duchesne, & Pelletier, 2019), de (Carvallo Aceves & Fuamba, 2016), de (García Haba, 2011), de (Palla & Gnecco, 2015), de (Qin, Li, & Fu, 2013), y de (Umaña, 2018).

Seleccionados los distintos parámetros sobre los cuales se realizará el análisis de sensibilidad para ambos sistemas, se realiza para cada uno de ellos la misma metodología que se comentó anteriormente, de forma ordenada.

En primer lugar, se procede a disminuir o aumentar el valor del número, ya sea de forma porcentual o fijo, según lo indique el Δ de cambio para un rango determinado.

Nuevamente, la estimación del error porcentual relativo de la Ec. 30 se utiliza para evaluar la eficiencia en el análisis de los parámetros.

Es importante tomar en cuenta que de la totalidad del abanico de parámetros que definen un techo verde o un pavimento permeable en el modelo matemático del SWMM, se ha descartado la posibilidad de modificar los siguientes:

- Volumen de vegetación.
- Rugosidad de superficie.
- Pendiente de la superficie.
- Punto de marchitez permanente.
- Pendiente de conductividad.
- Altura de succión.
- Relacionados al mat de drenaje.
- Espesores, tanto para el pavimento como para la subbase.
- Fracción del área impermeable.
- El factor de colmatación.

Tabla 8. Rango de variación inicial, mínimo y máximo de los parámetros de techo verde y pavimento permeable para el análisis de sensibilidad.

Componente	Valor inicial	Valor MIN	Valor MAX	Delta
<i>SUPERFICIE</i>				
Altura de la berma (mm)	25	0	50	12.5
Volumen de vegetación	0.15	-	-	-
Rugosidad de superficie	0.4	-	-	-
Pendiente de la superficie (%)	15	-	-	-
<i>SUELO</i>				
Espesor (mm)	100	50	150	25
Porosidad m ³ /m ³	0.5	0.4	0.6	0.05
Capacidad de campo m ³ /m ³	0.3	0.15	0.45	0.05
Punto de marchitez m ³ /m ³	0.1	-	-	-
Conductividad hidráulica mm/h	100	50	150	25
Pendiente de conductividad	45	-	-	-
Altura de succión (mm)	3.5	-	-	-
<i>MAT DE DRENAJE</i>				
Espesor (mm)	26	-	-	-
Relación de huecos	0.3	-	-	-
Rugosidad de superficie	0.25	-	-	-
<i>DIMENSIONES TECHO</i>				
Área por unidad (m ²)	150			
Ancho de la unidad (m)	15			
<i>PAVIMENTO</i>				
Espesor de capa (mm)	120			
Relación de vacíos	0.15	0.12	0.24	0.03
Fracción del área impermeable (%)	0			
Permeabilidad (mm/h)	250	150	350	50
Factor de colmatación	0			
<i>SUB-BASE</i>				
Espesor de capa (mm)	300			
Relación de vacíos	0.6	0.4	0.8	0.1
Tasa de infiltración (mm/h)	3	1	9	2
Factor de colmatación	0			

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Las revisiones de resultados según la normativa costarricense se mantendrán igual y, debe acotarse que el AyA, ni el CFIA o algún otro ente ha establecido hasta el momento, alguna reglamentación específicamente relacionada con los SUDS. Por ello, se validó las recomendaciones dispuestas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible para las Infraestructuras verdes urbanas, de las cuales el Gobierno de la República de Costa Rica debe cumplir dentro de la agenda 20 – 30.

Costos

En relación con los costos, se realiza una estimación de estos de la siguiente forma:

- Para tubería: Se cuenta con la referencia de costos unitarios por parte de la empresa Durman Aliaxis, para la tubería TPD.

- Para techos verdes: La referencia que se posee es por parte del Ing. José Andrés (Productor Agropecuario, 2016), y del arquitecto Roderick Anderson (Nelson Ulloa, 2016), que indican costos de referencia entre \$40 a \$180 y entre \$100 a \$120, respectivamente.
- Para pavimentos permeables: Se emplean precios unitarios basados en el Manual de Valores Base Unitarios por Tipologías Constructivas del Ministerio de Hacienda de Costa Rica, 2019. Además, se considera que se debe remover un espesor de al menos 10 cm.

Resultados

En relación con la pluviometría, la estación 78027 de la ciudad de Puntarenas cumplió con el criterio de selección. Los datos fueron provistos por el Instituto Meteorológico Nacional y se realizó la completación de datos y su respectivo análisis de frecuencias (Ver Apéndice 1 y 2).

consecutivos, los cuales, se resuelven mediante regresiones potenciales y la ecuación de intensidad obtenida a partir de dichas regresiones es:

$$I = \frac{401.362 \cdot T^{0.118}}{t^{0.619}} \tag{Ec. 31}$$

Curvas IDF

A partir de las precipitaciones, se utilizan los coeficientes del apéndice 2, para obtener los parámetros de la Ec. 24. Y con las precipitaciones máximas corregidas, se considera la Ec. 1 y se proceden a realizar dos cambios de variable

Dónde:
 I: la intensidad de precipitación en mm/h.
 T: es el período de retorno en años.
 t: es el tiempo de duración de la precipitación.

Tabla 9. Valores de Intensidad – Duración – Frecuencia para el registro de datos de la estación 78027, Puntarenas.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
5	160.83	179.12	194.32	216.42	234.78	254.71	307.76
10	104.73	116.64	126.54	140.93	152.89	165.87	200.41
15	81.49	90.75	98.46	109.65	118.96	129.06	155.93
20	68.20	75.95	82.40	91.77	99.56	108.01	130.50
25	59.40	66.16	71.77	79.93	86.72	94.08	113.67
30	53.06	59.10	64.11	71.41	77.47	84.04	101.54
35	48.24	53.72	58.28	64.91	70.42	76.39	92.30
40	44.41	49.46	53.66	59.76	64.83	70.34	84.98

Fuente: Elaboración propia, 2020.

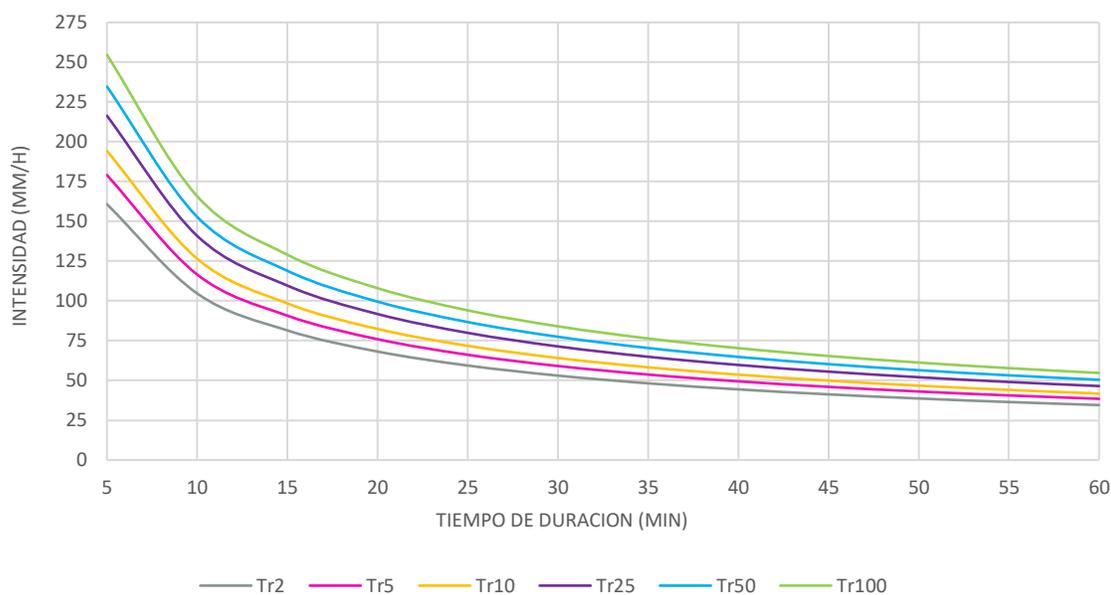


Figura 25. Curvas IDF para la estación 78027, Puntarenas. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Además, a partir de las curvas IDF, es posible obtener el hietograma mediante la Ec. 26 del método de bloques alternos, los cuales, serán utilizados más adelante en los cálculos del modelo SWMM:

Tabla 10. Intensidades alternadas (mm) para diversas duraciones y períodos de retorno.

Duración (min)	Períodos de retorno (años)		
	5	10	25
5	21.46	23.28	25.93
10	26.97	29.26	32.59
15	38.99	42.30	47.11
20	179.12	194.32	216.42
25	54.16	58.76	65.44
30	31.55	34.23	38.12
35	23.80	25.83	28.76
40	19.63	21.30	23.72

Fuente: Elaboración propia, 2020.

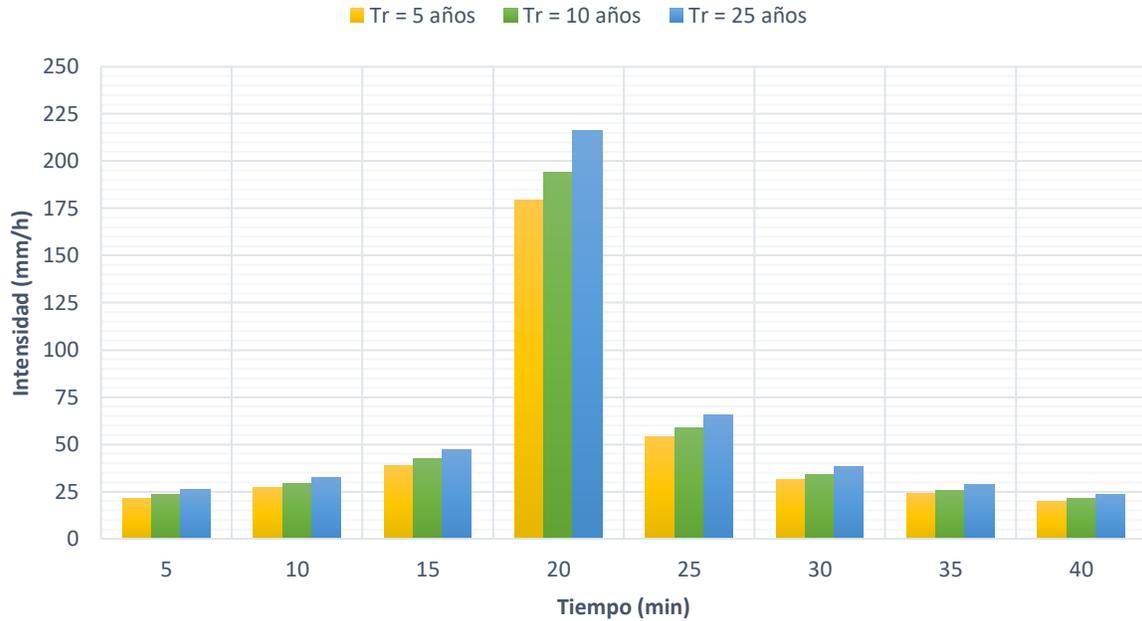


Figura 26. Hietograma de intensidades para períodos de retorno de 5, 10 y 25 años. Fuente: Elaboración propia, 2020

Caracterización del área de estudio

A partir del levantamiento facilitado por la Municipalidad, se obtiene el modelo digital de

elevaciones (MDE) de Juanito Mora; posteriormente se obtuvieron los siguientes ráster:

- Representación de la dirección de flujo.
- Representación de pendientes.

Cabe indicar, que este proceso se realizó en QGIS (que incorpora módulos para análisis de terreno como GRASS o SAGA).

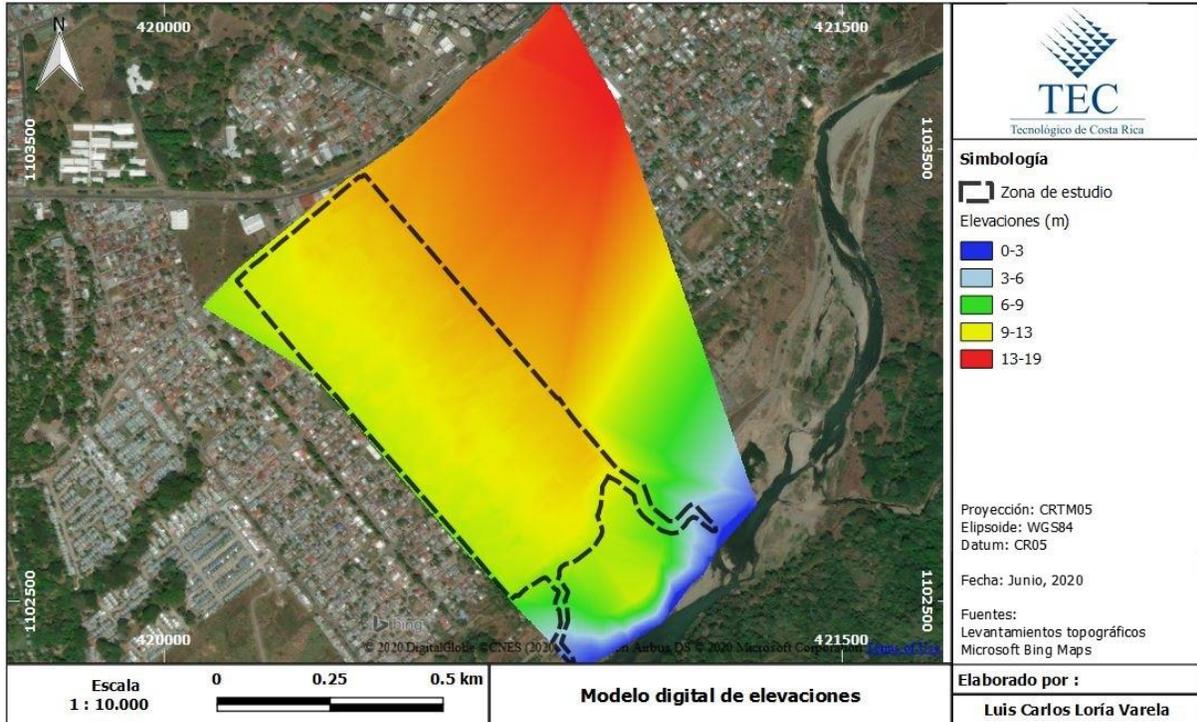


Figura 27. Modelo digital de elevaciones a partir del levantamiento topográfico.

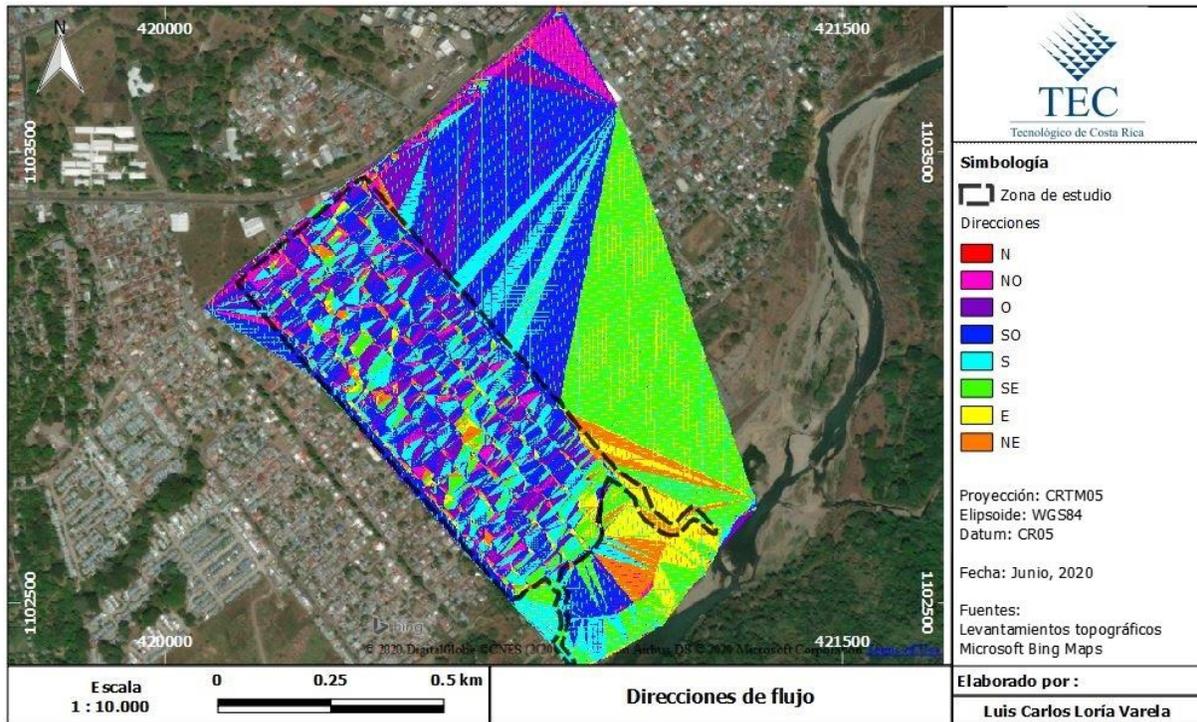


Figura 28. Direcciones de flujo en Juanito Mora.

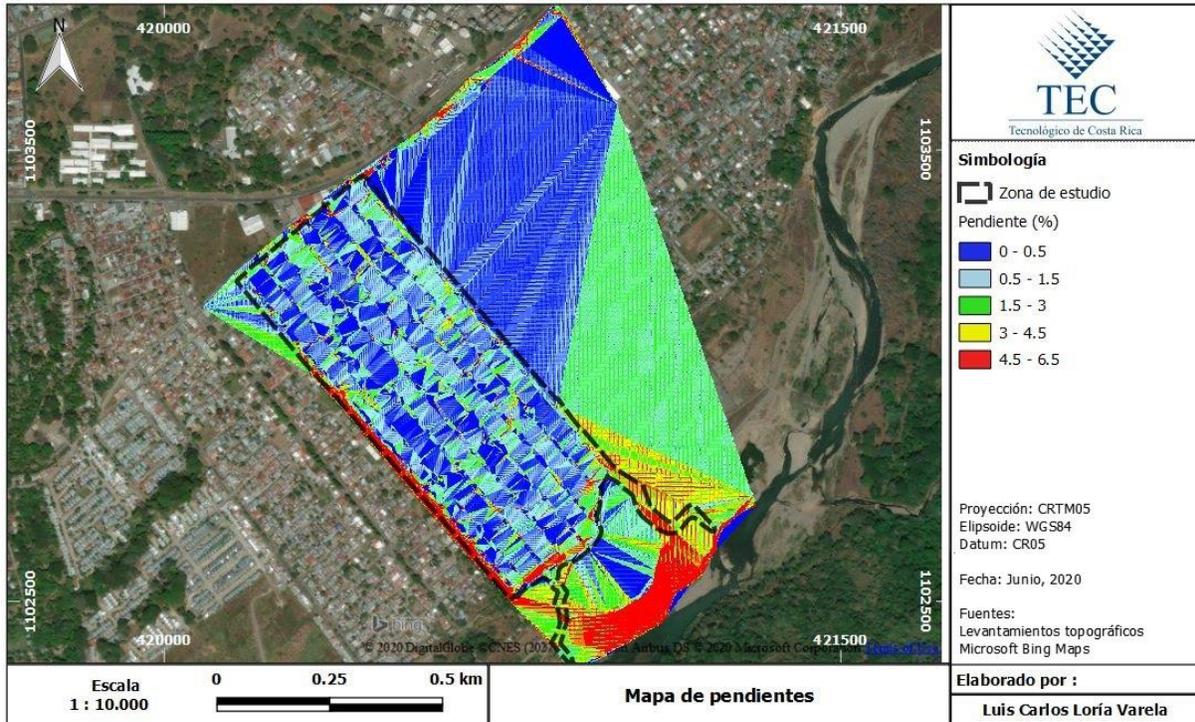


Figura 29. Pendientes del terreno.

A partir de los mapas anteriores, y en cumplimiento con la normativa del AyA se optó por realizar un trazado combinado y se establecieron

dos redes, seguidamente se observarán las respectivas áreas de drenaje y la clasificación de las capas.

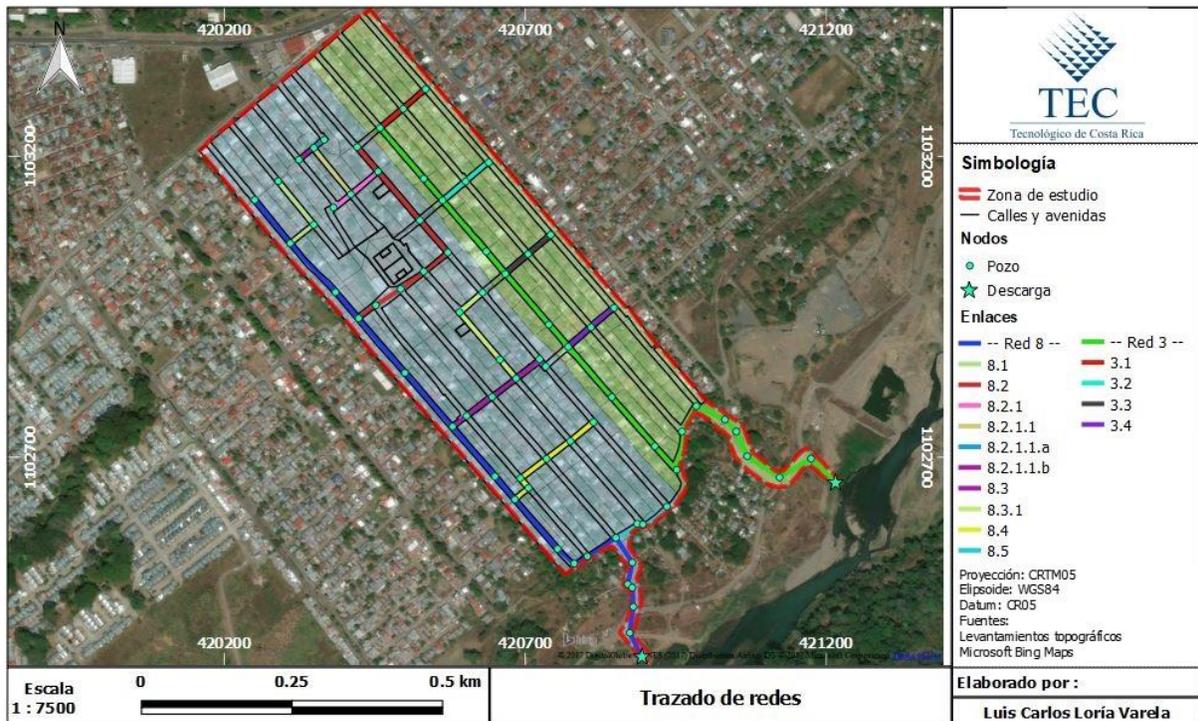


Figura 30. Trazado de la red de alcantarillado pluvial en Juanito Mora.

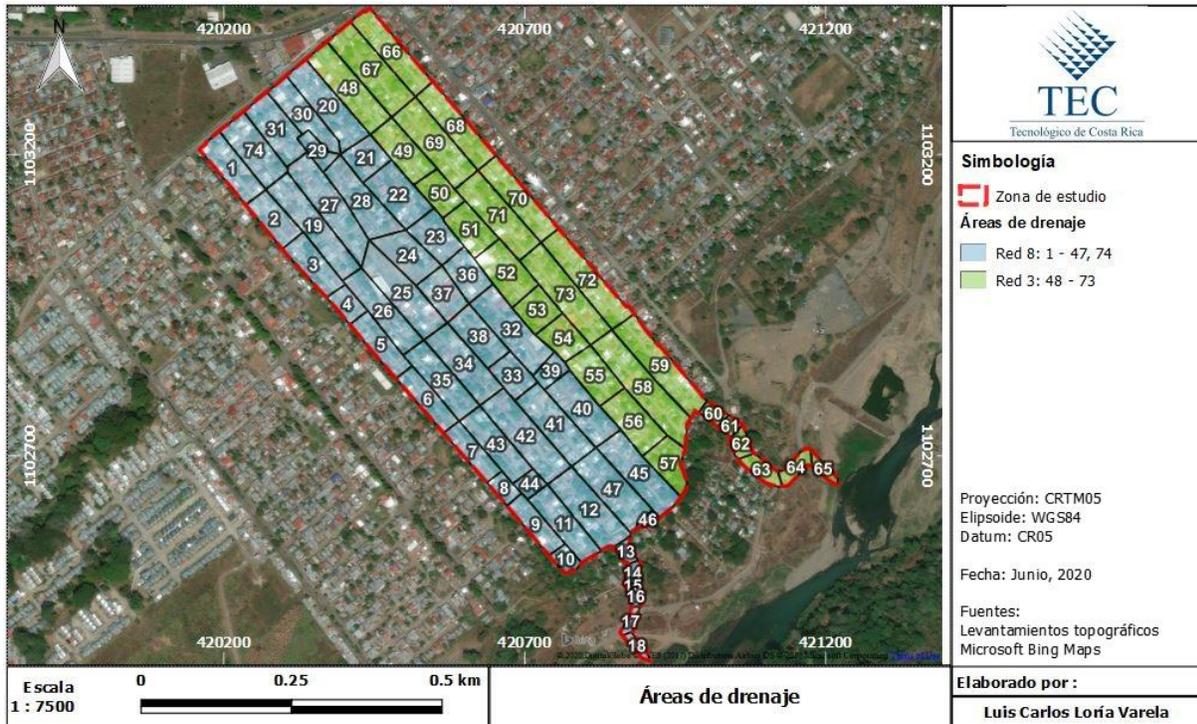


Figura 31. Áreas de drenaje.

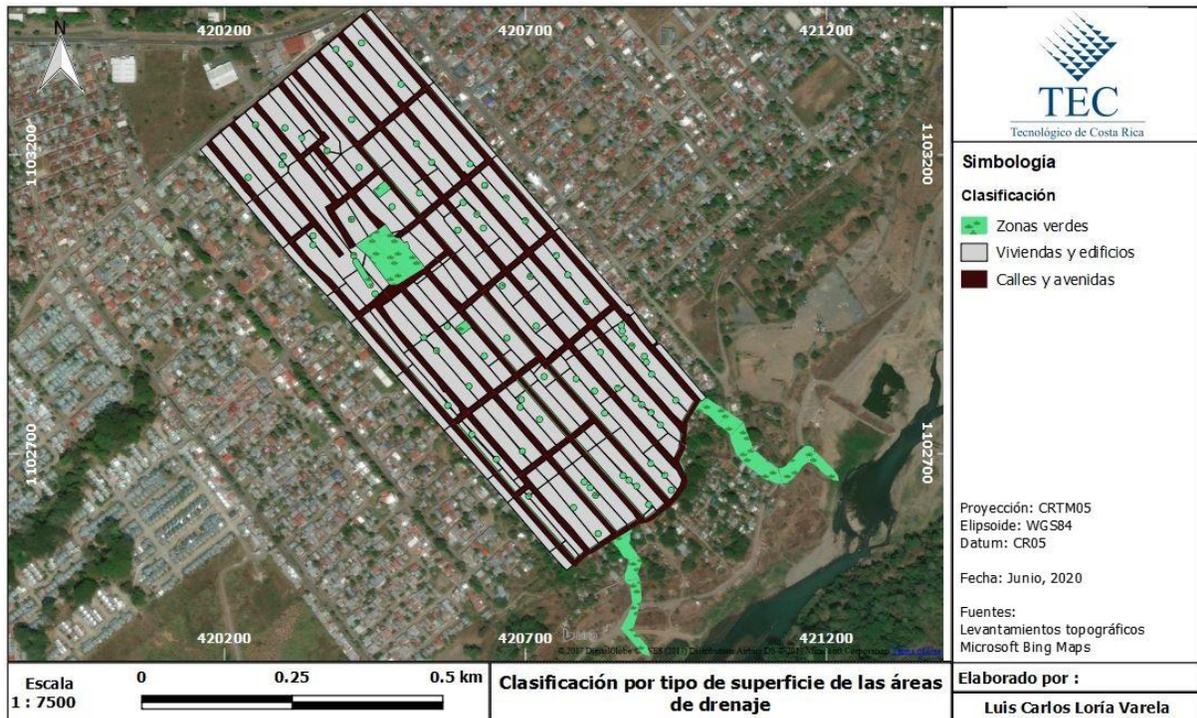


Figura 32. Clasificación superficial de las áreas de drenaje.

De forma general, se indica la cantidad de áreas por red, la cantidad de pozos, tramos y la longitud de los mismos que la componen.

Tabla 11. Características generales del trazado de las redes pluviales.

Características	Red 3	Red 8	Total
# Áreas	26	48	74
Área Mín. (m ²)	805	153	-
Área Máx. (m ²)	10001	8698	-
# Pozos	25	47	72
# Tubería	25	47	72
Long. Tubería (m)	2765	4325	7089

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Flujo uniforme

En esta sección se presentan las características y parámetros que se utilizan para diseño por flujo uniforme (por medio de una hoja de cálculo en Excel).

Se consideraron diámetros comerciales que utilizan, tanto las empresas Amanco Wavin o Durman Aliaxis. Se utilizó un “n” de Manning para la tubería de PVC de 0.009, dado que es lo indicado en la hoja técnica para el tipo TPD de Durman Aliaxis.

Tabla 12. Diámetros comerciales por utilizar

Diam (mm)	Diam (pulg)
450	18
525	21
600	24
675	27
750	30
825	33
910	36
975	39
1050	42
1200	48
1350	54

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Cálculo hidrológico

Si bien en la Figura 32, aparecen sólo 3 capas, se decidió dividir la capa vegetal, más que todo por los tramos finales, dado que predomina el área verde y hay poco suelo impermeable, por ello, se consideró que en esas secciones se utilizaría un pasto medio para la elección del coeficiente de escorrentía.

Tabla 13. Coeficientes de escorrentía a utilizar por tipo de superficie.

Período de retorno	Viviendas y edificios	Calles y avenidas	Zona verde con pasto plano	Zona verde con pasto medio
10	0.83	0.81	0.37	0.38

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para las áreas de drenaje o subcuencas, a pesar de que hay áreas con un tiempo de concentración bajo, tal como se observa en la siguiente tabla, con valores desde 0.85 min, se consideró utilizar los 10 min de valor mínimo, tal y como, indica la normativa costarricense.

Tabla 14. Variación de áreas de drenaje, tiempo de concentración, intensidad y caudal para cada red pluvial.

Características	Red 3	Red 8
A (ha)	0.02 a 0.87	0.08 a 1
Long (m)	12.46 a 167.03	38.85 a 176.02
Sterr (%)	0.43 a 4.01	0.99 a 6.59
AEdif (ha)	0 a 0.63	0 a 0.72
APav (ha)	0 a 0.22	0 a 0.25
AVeg (ha)	0 a 0.29	0 a 0.1
A2Veg (ha)	0 a 0.08	0 a 0.19
Coef Prom	0.37 a 0.83	0.37 a 0.82
Tc (min)	0.85 a 39.78	1.18 a 40.75
Intensidad (mm/h)	53.84 a 126.54	53.05 a 126.53
Q (m3/s)	0.01 a 2.78	0.01 a 1.66

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Cálculo hidráulico

Si bien el detalle, tanto del cálculo hidráulico como de las cotas del terreno, rasante, cobertura y de desnivel se puede apreciar en el Apéndice 3. A continuación, se observa la variación general por red de los parámetros hidráulicos que más atención poseen:

Tabla 15. Variación de parámetros hidráulicos para ambas redes pluviales.

Parámetros	Red 3	Red 8
Diám (m)	0.45 a 1.2	0.45 a 1.35
V (m/s)	2.3 a 4.50	1.5 a 4.15
F. ζ (kg/m ²)	0.74 a 2.44	0.27 a 2.05
Y/D <0.85	0.26 a 0.70	0.31 a 0.70

período de retorno de 10 años y se utilizan los valores obtenidos en Tabla 10. Intensidades alternadas (mm) para diversas duraciones y períodos de retorno. La simulación se realiza bajo flujo no permanente (onda dinámica); al respecto se obtuvieron los siguientes valores relacionados, a la continuidad de flujo escorrentía y del tránsito hidráulico.

Flujo no permanente

Se presenta el comportamiento de la red de alcantarillado pluvial de Juanito Mora, se utiliza un

Tabla 16. Valores relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y del tránsito hidráulico.

Parámetros	Vol (ha m)	Altura (mm)
Escorrentía		
Precipitación Total	1.265	35.772
Pérdidas por infiltración	0.106	3.008
Escorrentía superficial	1.052	29.736
Almacenamiento en superficie	0.107	3.034
Error de continuidad (%)	-0.018	-
Cálculo hidráulico		
Aporte entrada lluvia	1.051	10.512
Descargas externas	1.018	10.181
Pérdidas por inundación	0.000	0.001
Vol. Almacenado final	0.032	0.324
Error de continuidad (%)	-0.061	-

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Análisis de sensibilidad

resultado para cada una, con su respectivo valor obtenido por simulación y el porcentaje de error relativo correspondiente para cada rubro.

De los once parámetros escogidos, se realizaron sesenta y nueve simulaciones, acá se mostrará el

Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.

Parámetro	Error relativo	Escorrentía				
		Precipitación Total (ha·m)	Pérdidas por infiltración (ha·m)	Escorrentía superficial (ha·m)	Almacenamiento en superficie (ha·m)	Error de continuidad (%)
Imperv	Prom %	0.000%	35.259%	5.632%	20.327%	0.104%
Width	Prom %	0.000%	0.000%	1.394%	13.551%	0.111%
Slope	Prom %	0.000%	0.000%	0.317%	3.115%	0.028%
Nimp	Prom %	0.000%	0.000%	2.173%	21.095%	0.246%

Nperv	Prom %	0.000%	0.000%	1.933%	18.847%	0.028%
Simp	Prom %	0.000%	0.000%	1.362%	13.396%	0.000%
Sperv	Prom %	0.000%	0.000%	1.027%	9.907%	0.000%
Zero%	Prom %	0.000%	0.000%	0.523%	5.140%	0.014%
Rted	Prom %	0.000%	0.000%	0.665%	6.542%	0.022%
Curveno	Prom %	0.000%	42.767%	3.612%	6.854%	0.028%
N mann	Prom %	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla 18. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros, en relación con el error relativo y la continuidad del cálculo hidráulico.

Cálculo hidráulico						
Parámetro	Error relativo	Aporte entrada lluvia (ha·m)	Descargas externas (ha·m)	Pérdidas por inundación (10 ⁶ l)	Vol. Almacenado final (ha·m)	Error de continuidad (%)
Imperv	Prom %	5.614%	5.882%	112.500%	5.078%	1.080%
Width	Prom %	1.411%	1.686%	33.333%	9.375%	0.874%
Slope	Prom %	0.349%	0.393%	0.000%	2.604%	0.350%
Nimp	Prom %	2.093%	2.582%	71.429%	16.964%	1.813%
Nperv	Prom %	1.903%	2.079%	66.667%	5.208%	0.642%
Simp	Prom %	1.316%	1.359%	0.000%	0.000%	0.227%
Sperv	Prom %	0.971%	0.963%	0.000%	0.000%	0.377%
Zero%	Prom %	0.571%	0.737%	0.000%	3.125%	0.328%
Rted	Prom %	0.704%	0.904%	20.000%	3.750%	0.262%
Curveno	Prom %	3.584%	3.504%	33.333%	4.688%	0.374%
N mann	Prom %	0.000%	1.162%	2016.667%	35.938%	2.027%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

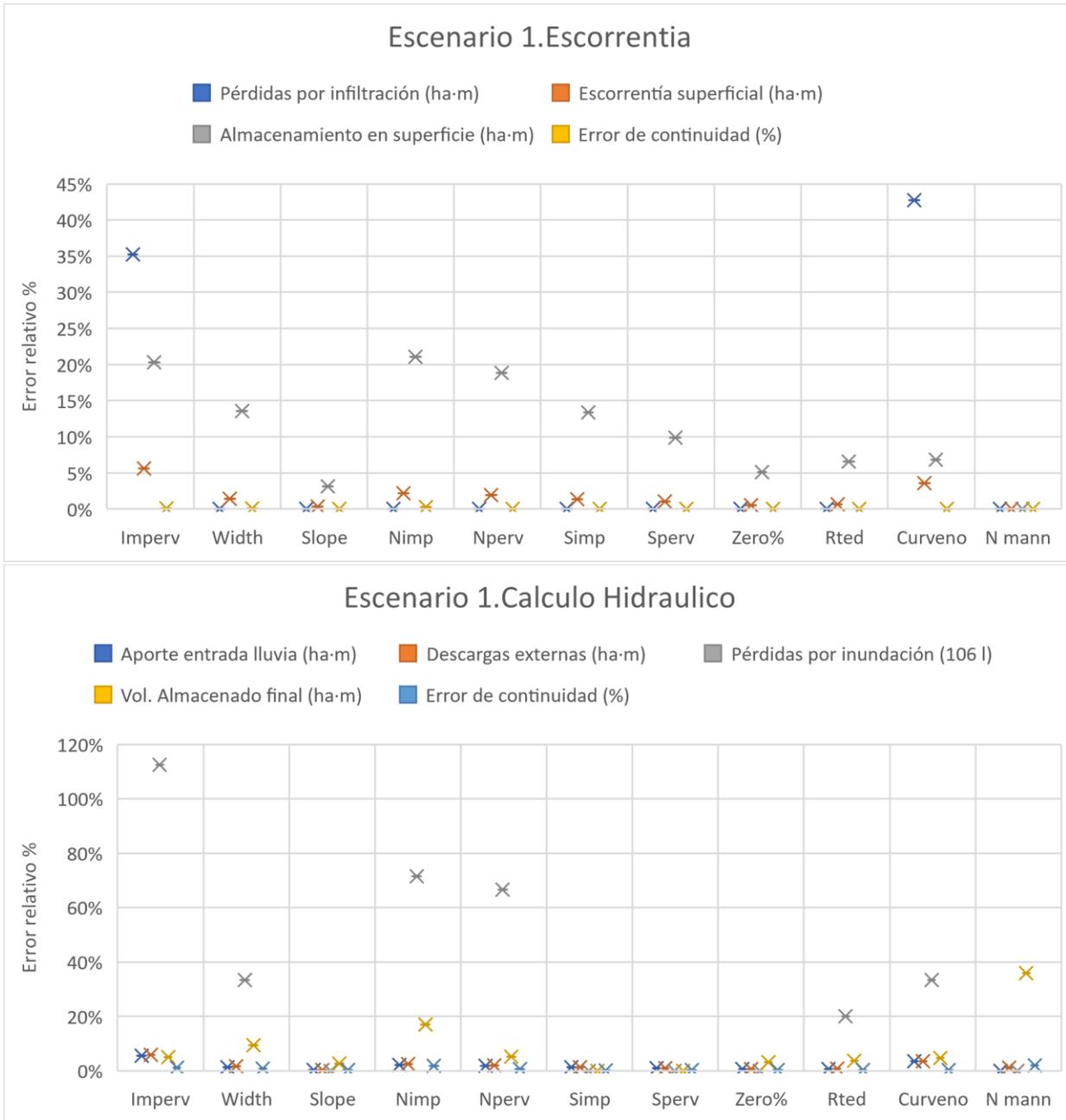


Figura 33. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y de cálculo hidráulico. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Escenarios con SUDS

Al considerar el uso de techos verdes, se estableció que únicamente se iba a utilizar un 35% del área total de los edificios actuales, esto conlleva una variación en el área impermeable y en la mayoría de casos, también implica variar el

ancho característico, no obstante, se optó por mantener el mismo; por lo cual, solo se varió el área impermeable, además, se indica la cantidad de unidades de techo verde a colocar, tomando en cuenta que cada unidad posee un área de 150 m², y en relación con los pavimentos permeables, se cambió la totalidad de las áreas de calles y avenidas y, se calculó la nueva área impermeable por subcuenca.

Tabla 19. Nuevo porcentaje de área impermeable al utilizar techos verdes, y con pavimentos permeables en la red 3.

Área	% Imper	% Imper con PP	% Imper con TV	Unidades de TV
S48	84.00%	60.13%	63.61%	13
S49	83.00%	60.35%	62.84%	9
S50	85.00%	54.09%	67.31%	5
S51	80.00%	61.10%	60.99%	7
S52	83.00%	58.31%	64.35%	9
S53	82.00%	65.62%	61.42%	6
S54	85.00%	56.36%	65.71%	6
S55	81.00%	62.97%	61.40%	8
S56	82.00%	63.52%	60.17%	10
S57	84.00%	50.85%	68.16%	5
S58	82.00%	58.27%	63.06%	16
S59	80.00%	55.32%	62.10%	12
S60	11.00%	11.00%	11.00%	0
S61	11.00%	11.00%	11.00%	0
S62	11.00%	11.00%	11.00%	0
S63	11.00%	11.00%	11.00%	0
S64	11.00%	11.00%	11.00%	0
S65	11.00%	11.00%	11.00%	0
S66	83.00%	58.12%	64.67%	10
S67	82.00%	59.89%	62.31%	14
S68	84.00%	57.55%	64.40%	10
S69	83.00%	59.20%	64.02%	13
S70	83.00%	56.07%	65.24%	9
S71	84.00%	59.02%	63.48%	13
S72	84.00%	56.51%	64.81%	12
S73	84.00%	57.23%	64.46%	14

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla 20. Nuevo porcentaje de área impermeable y cantidad de techo verde a colocar en la red 8.

Área	% Imper	% Imper con PP	% Imper con TV	Unidades de TV
S1	84.00%	59.73%	63.09%	9
S2	84.00%	60.27%	64.09%	7
S3	83.00%	60.41%	62.59%	8
S4	85.00%	56.16%	69.11%	3
S5	83.00%	58.04%	63.57%	7
S6	82.00%	56.59%	64.47%	6
S7	81.00%	52.93%	63.76%	5
S8	83.00%	53.69%	68.32%	2
S9	82.00%	54.69%	65.77%	5
S10	84.00%	49.70%	75.48%	1
S11	84.00%	57.54%	65.37%	9

S12	78.00%	57.57%	60.05%	12
S13	11.00%	11.00%	11.00%	0
S14	11.00%	11.00%	11.00%	0
S15	11.00%	11.00%	11.00%	0
S16	11.00%	11.00%	11.00%	0
S17	11.00%	11.00%	11.00%	0
S18	11.00%	11.00%	11.00%	0
S19	82.00%	61.31%	61.29%	14
S20	83.00%	61.60%	61.62%	13
S21	81.00%	60.12%	60.75%	6
S22	78.00%	57.76%	59.20%	10
S23	84.00%	58.75%	64.77%	7
S24	49.00%	35.80%	42.28%	3
S25	67.00%	48.04%	52.34%	10
S26	80.00%	58.37%	60.54%	10
S27	81.00%	57.52%	61.46%	14
S28	81.00%	58.57%	62.08%	11
S29	82.00%	52.08%	69.28%	2
S30	84.00%	59.93%	63.61%	9
S31	82.00%	61.50%	61.64%	10
S32	83.00%	60.07%	63.02%	13
S33	83.00%	55.39%	65.58%	5
S34	82.00%	59.78%	61.82%	12
S35	84.00%	59.28%	64.25%	10
S36	84.00%	59.99%	65.60%	6
S37	84.00%	61.91%	63.35%	7
S38	78.00%	58.34%	58.44%	8
S39	81.00%	54.26%	68.70%	2
S40	81.00%	60.96%	60.78%	11
S41	80.00%	59.23%	60.42%	12
S42	84.00%	58.39%	64.35%	14
S43	84.00%	57.17%	65.27%	9
S44	86.00%	50.01%	69.46%	2
S45	81.00%	57.19%	62.46%	12
S46	88.00%	26.18%	87.60%	0
S47	81.00%	62.13%	59.48%	13
S74	83.00%	63.32%	61.95%	11

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Respecto al comportamiento de la red, una vez establecidos todos los datos de partida, se introducen en software para modelación numérica SWMM y se hace la simulación de la red de alcantarillado pluvial con SUDS, más adelante, se analizarán dichos resultados. Al considerar la disminución de escorrentía superficial y el aumento de infiltración, se opta por reducir el diámetro de ciertos tramos de tubería,

principalmente para los colectores principales ubicados para la "avenida 8 y 3" de cada red. Una vez realizado el cambio, se prosigue con los últimos escenarios, del nuevo diseño más los SUDS seleccionados. Al volver a realizar la simulación se obtienen la totalidad de valores relacionados a la continuidad de flujo de escorrentía y del tránsito hidráulico.

Tabla 21. Valores relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y del tránsito hidráulico para los escenarios con techos verdes y pavimentos permeables.

Parámetros	Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
	Vol (ha·m)	Altura (mm)						
<i>Escorrentía</i>								
Almacenamiento inicial SUDS	0.08	2.30	-	-	0.08	2.30	-	-
Precipitación Total	1.27	35.77	1.27	35.77	1.27	35.77	1.27	35.77
Pérdidas por infiltración	0.16	4.47	0.22	6.18	0.16	4.47	0.22	6.18
Escorrentía superficial	0.58	16.46	0.57	16.08	0.58	16.46	0.57	16.08
Drenaje SUDS	0.22	6.07	-	-	0.22	6.07	-	-
Almacenamiento en superficie	0.39	11.08	0.48	13.51	0.38	11.08	0.48	13.51
Error de continuidad (%)	-0.02	-	-0.01	-	-0.02	-	-0.01	-
<i>Cálculo hidráulico</i>								
Aporte entrada lluvia	0.80	7.97	0.57	5.69	0.80	7.97	0.57	5.69
Descargas externas	0.79	7.89	0.57	5.65	0.79	7.89	0.57	5.65
Pérdidas por inundación	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vol. Almacenado final	0.01	0.08	0.00	0.04	0.01	0.08	0.00	0.04
Error de continuidad (%)	-0.14	-	-0.17	-	-0.08	-	-0.09	-

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para el escenario con la reducción de tuberías (escenarios 4 y 5), se realiza un análisis de sensibilidad, tanto para techos verdes como para los pavimentos permeables, con la variación indicada en los parámetros de la Tabla 8.

Tabla 22. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de techos verdes, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.

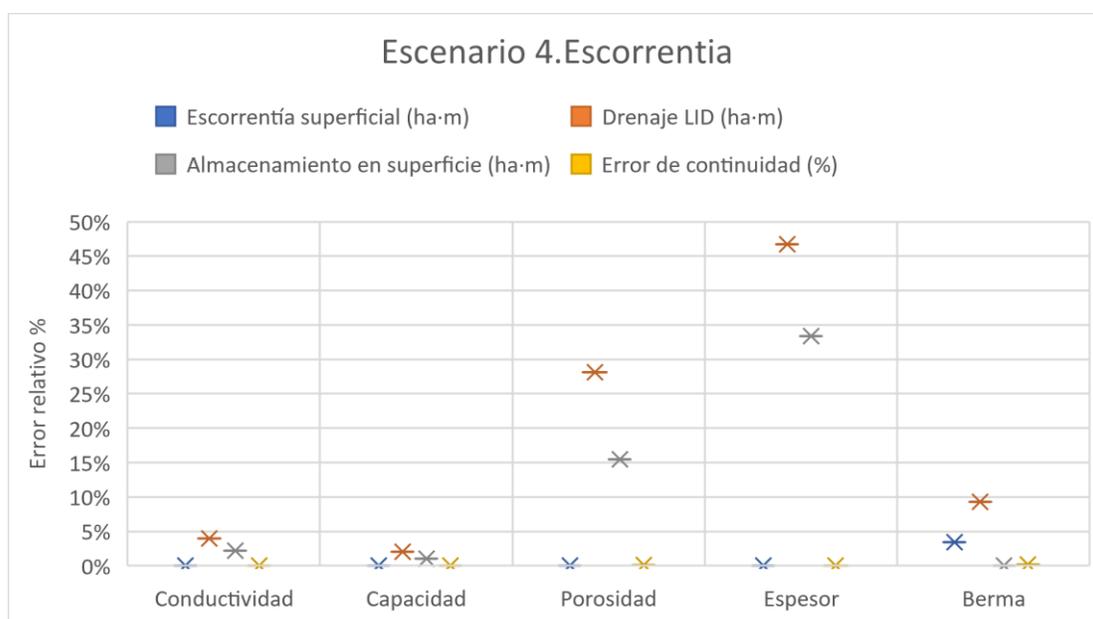
Escorrentía							
Parámetro	Error relativo	Precipitación Total (ha·m)	Pérdidas por infiltración (ha·m)	Escorrentía superficial (ha·m)	Drenaje LID (ha·m)	Almacenamiento en superficie (ha·m)	Error de continuidad (%)
Conductividad	Prom R.E	0.000%	0.000%	0.043%	3.953%	2.168%	0.050%
Capacidad	Prom R.E	0.000%	0.000%	0.000%	2.016%	1.063%	0.044%
Porosidad	Prom R.E	0.000%	0.000%	0.000%	28.140%	15.434%	0.083%
Espesor	Prom R.E	0.000%	0.000%	0.000%	46.744%	33.355%	0.050%
Berna	Prom R.E	0.000%	0.000%	3.436%	9.302%	0.000%	0.150%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla 23. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de techos verdes, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de tránsito hidráulico.

Calculo hidraulico						
Parámetro	Error relativo	Aporte entrada lluvia (ha·m)	Descargas externas (ha·m)	Pérdidas por inundación (10 ⁶ l)	Vol. Almacenado final (ha·m)	Error de continuidad (%)
Conductividad	Prom R.E	1.035%	1.077%	0.000%	3.125%	0.095%
Capacidad	Prom R.E	0.544%	0.465%	0.000%	6.250%	0.015%
Porosidad	Prom R.E	7.591%	7.636%	0.000%	0.000%	0.095%
Espesor	Prom R.E	12.610%	12.833%	0.000%	9.375%	0.158%
Berma	Prom R.E	0.000%	0.032%	0.000%	0.000%	0.291%

Fuente: Elaboración propia, 2020.



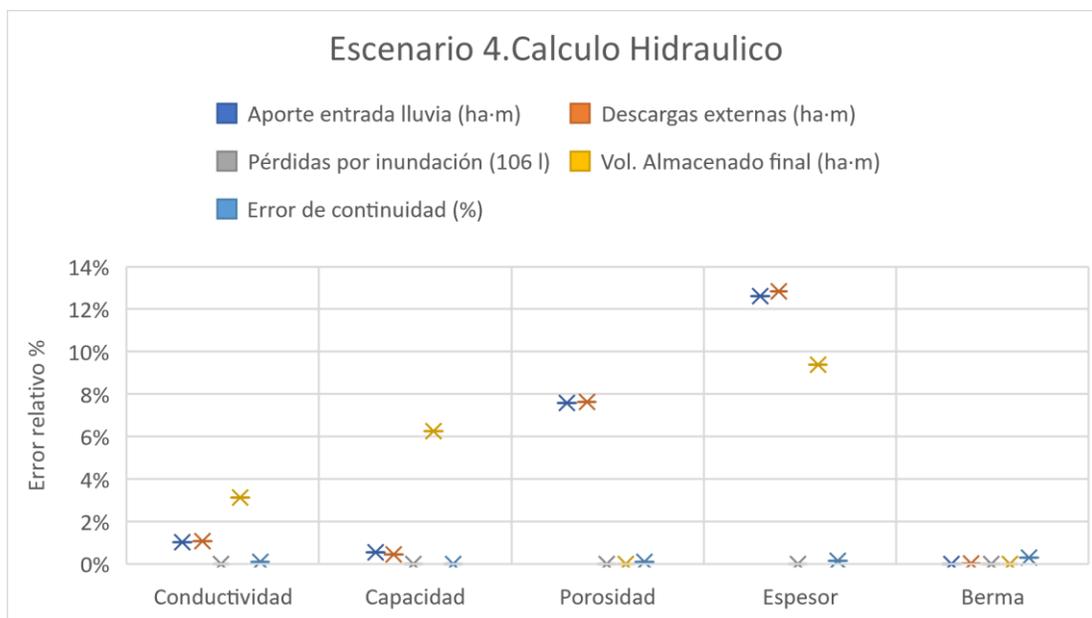


Figura 34. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y cálculo hidráulico para techos verdes. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla 24. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de pavimentos permeables, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de escorrentía.

Escorrentía						
Parámetro	Error relativo	Precipitación Total (ha-m)	Pérdidas por infiltración (ha-m)	Escorrentía superficial (ha-m)	Almacenamiento en superficie (ha-m)	Error de continuidad (%)
Permeabilidad	Prom R.E	0.000%	0.000%	3.559%	4.289%	0.083%
Tasa de infiltra	Prom R.E	0.000%	25.000%	0.000%	11.506%	0.694%

Tabla 25. Resultados del análisis de sensibilidad para múltiples parámetros de pavimentos permeables, en relación con el error relativo y la continuidad del flujo de tránsito hidráulico.

Calculo hidraulico						
Parámetro	Error relativo	Aporte entrada lluvia (ha-m)	Descargas externas (ha-m)	Pérdidas por inundación (10 ⁶ l)	Vol. Almacenado final (ha-m)	Error de continuidad (%)
Permeabilidad	Prom R.E	3.559%	3.584%	0.000%	0.000%	0.415%
Tasa de infiltra	Prom R.E	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

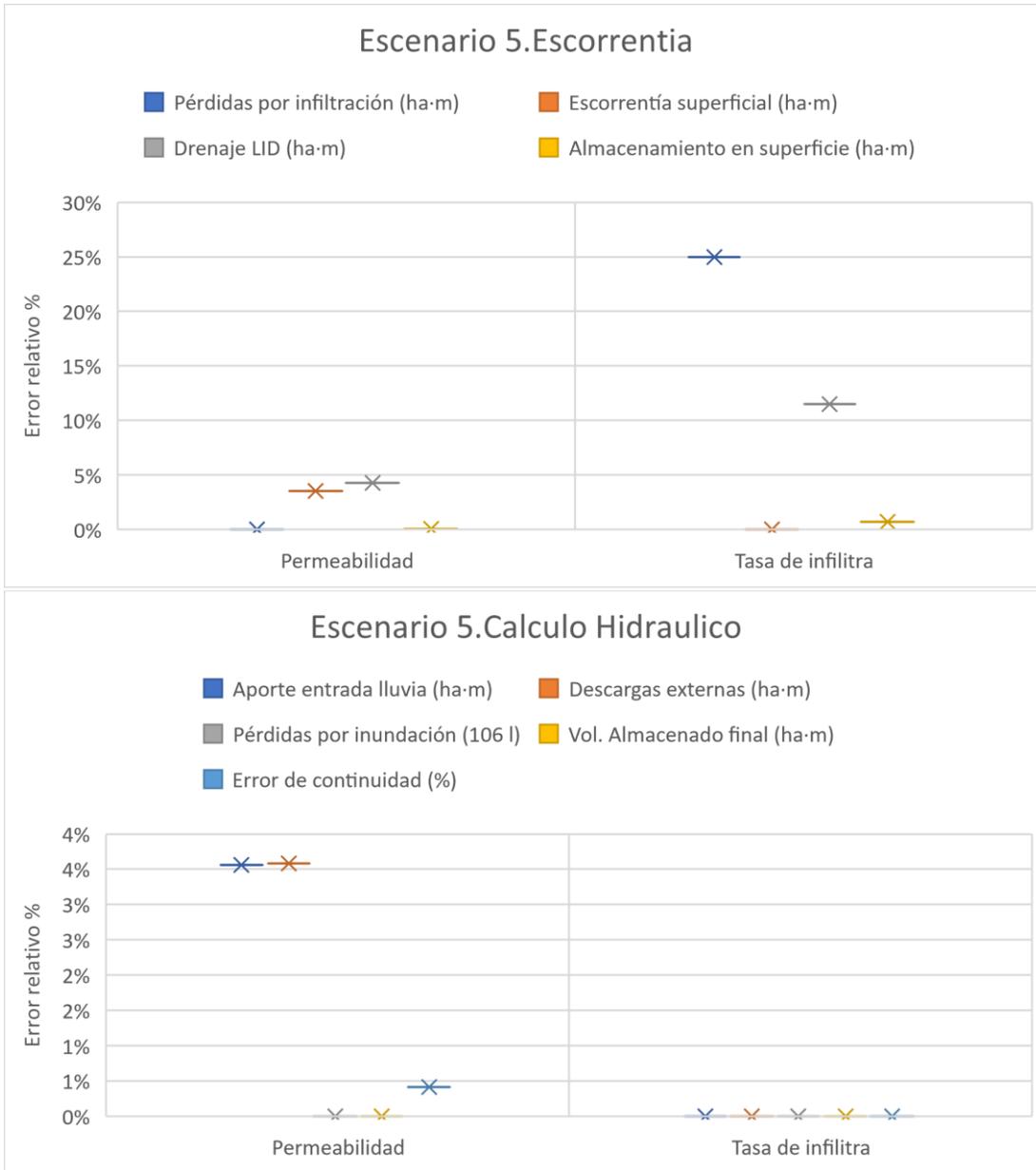


Figura 35. Errores relativos de los parámetros relacionados a la continuidad del flujo de escorrentía y cálculo hidráulico para pavimentos permeables. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Presupuesto

Los precios que se indican en esta sección son estimados, para el pavimento permeable se utilizó el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva del Ministerio de Hacienda del 2020, y se asumió el costo para la tipología en \$13000. Además, se considera utilizar un costo de metro

cuadrado para techos verdes de \$60, considerando que son extensivos, y, en relación con la tubería, la referencia fue brindada por Durman Aliaxis, en dicho caso, únicamente se incluye el costo unitario de la tubería utilizada. Cabe destacar que no se incluye el impuesto del valor agregado, ni la mano de obra, ni el flete. Además, se utilizó como referencia de conversión \$1 = \$607, a fecha de noviembre del año 2020.

Tabla 26. Costo de referencia, para el escenario base, con techos verdes y pavimentos permeables, con reducción de diámetros.

Componente	Base		Con techos verdes		Con Pavimentos permeables	
	Red 3	Red 8	Red 3	Red 8	Red 3	Red 8
Tuberías Pluviales	\$1.056.473	\$1.470.957	\$917.860	\$1.279.057	\$917.860	\$1.279.057
Techos Verdes	-	-	\$1.809.000	\$3.060.000	-	-
Pavimento Permeable	-	-	-	-	\$667.225	\$1.087.786
Remoción Capa 10cm	-	-	-	-	\$133.445	\$217.557
Total, por red	\$1.056.473	\$1.470.957	\$2.726.860	\$4.339.057	\$1.718.530	\$2.584.400
Total, sistema	\$2.527.430		\$7.065.917		\$4.302.930	

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Análisis de resultados

Actividades preliminares

Al analizar el levantamiento topográfico que facilitó la Municipalidad de Puntarenas, se consideró apto para el uso, pese a no estar completamente actualizado, pues a raíz de la visita al área de estudio, se evidenció que el levantamiento no posee la nueva cancha multiuso, ni las nuevas zonas de descanso y el boulevard existente.

Además, fue necesario digitalizar cada uno de los puntos, de manera que sean reconocidos los atributos en AutoCAD Civil 3D 2020 y que esto permitiese generar un modelo digital de elevaciones. Otro inconveniente en relación con el levantamiento es que consta de dos partes, realizadas en distintos años, por lo cual, se considera que debería actualizarse en su totalidad, máxime, que, además, de las zonas faltantes, actualmente se contempla realizar mejoras en algunas calles, lo cual, podría incidir en una variación de la superficie. Es importante mencionar, que el levantamiento sólo incluye la zona urbana, no se logró realizar un levantamiento para el cauce del río Barranca, ya que corresponde a un análisis de modelación fluvial que conlleva otra serie de componentes, no correspondientes a este proyecto de graduación.

Pluviometría

Para la pluviometría, inicialmente se consideraron los criterios y ejemplos indicados por la (CONAGUA, 2019) con el fin de establecer los requisitos en la elección y descarte de estaciones, en primera instancia se solicitaron datos para el período de 1995 – 2020, con el fin de obtener, un registro de al menos 20 años. No obstante, la estación de Miramar (78006) únicamente poseía datos “recientes” a partir del 2015 y la estación 82002 se encuentra sin registros desde el 2007, por lo cual, se optó por la utilización de la estación 78027 de Puntarenas. Dicha estación se encuentra aproximadamente a 12 km de la

localidad de Juanito Mora, y posee un registro de 19 años. Al identificarse algunos registros faltantes, se estimó necesaria la completación estadística de datos, a través del método racional deductivo, no obstante, se tuvo que excluir el valor de 272.8 mm de octubre de 2018, debido a que estaba por encima del umbral alto en la prueba de datos dudosos. Por ello, se tomó como valor máximo para 2018 el de 69.7 mm. Con dicho valor se realizó nuevamente la completación y ya no se presentaron inconvenientes con los umbrales de datos dudosos.

Con una precipitación máxima mensual diaria de 144.60 mm (Ver Tabla AP – 2), convierte a octubre el mes con los registros más altos. Posteriormente se evaluaron las distintas distribuciones de probabilidades (Ver Figura AP- 1)Tabla AP- 4. Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov. y se verificaron con la prueba no paramétrica de Kolmogorov – Smirnov, con la cual se obtuvo que el estadístico Δ obtenido para la función de Gamma 3 parámetros, es entre todas las distribuciones, el que posee menor valor en relación con el tabular.

Tabla 19, donde se aprecia que el estadístico Δ obtenido para la función de Gamma 3 parámetros, es entre todas las distribuciones, el que posee menor valor en relación con el tabular Δ .

Una vez verificado el ajuste, se realizó un análisis de frecuencia utilizando factores de frecuencia, y el factor de corrección, posteriormente se consideraron los coeficientes propuesto por (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998), dado que poseen cierta similitud climática y se considera aceptable la extrapolación de su uso. Con ello, se calculan las precipitaciones (e intensidades) máximas que facilitan (mediante regresiones potenciales) la obtención de la Ec. 31 de intensidad de la estación 78027 de Puntarenas, y es por medio de dicha ecuación que se obtuvieron las curvas y tablas de Intensidad – Duración – Frecuencia.

Respecto al resultado obtenido, resulta conveniente comparar los valores máximos de la ecuación Ec. 31 con los calculados por (Vahson & Alfaro, 1992), esto se muestra a continuación:

Tabla 27. Diferencia de intensidades entre la estación 78027 y la investigación de Vahrson y Alfaro (1992), para una duración de 5 min y diversos períodos de retorno.

Años	Propia	V&A	Dif %
<u>2</u>	160.83	151.94	5.53%
<u>5</u>	179.12	183.54	-2.47%
10	194.32	207.45	-6.76%
25	216.42	239.05	-10.46%
50	234.78	262.95	-12.00%
100	254.71	286.86	-12.62%
500	307.76	342.37	-11.25%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

De la tabla anterior puede afirmarse que los rangos de variación (principalmente a la baja) se encuentran dentro de un rango aceptable, debido a que la investigación de (Vahrson & Alfaro, 1992) utilizó un período de registro aproximado a 21 años previo a 1990 y los datos de la estación 78027 son posteriores a 2001 y, coinciden con las variaciones registradas y analizadas por el (CRRH-IMN, 2008) para los períodos de 1961 – 1990 versus 1991 – 2005, donde se indica que las zonas del sur de la península de Nicoya, Santa Elena y Bajo Tempisque disminuyeron su precipitación anual en un rango entre 2 a 16%. Además, las proyecciones climática a través de modelos dinámicos (PRECIS) para dichas zonas del Pacífico Norte, estiman niveles de reducción entre el 2 al 18% para los siguientes 100 años.

Flujo uniforme

En la Tabla 12 se muestran los diámetros comerciales de tuberías de PVC a utilizar, si bien, existen más diámetros comerciales que pueden ser considerados, se optó, por escoger únicamente los más comunes entre los fabricantes y distribuidores de tubosistemas en Costa Rica, en este caso se investigó la oferta de tuberías de Amanco Wavin y Durman Aliaxis. Además, para el valor “n” de Manning se consideraron tanto las recomendaciones de los fabricantes, como las de la Asociación de tuberías de PVC (Uni-Bell PVC Pipe Association, 2001) por lo cual se estima adecuado utilizar un valor de 0.009.

Trazado y cálculo hidrológico

Entre las etapas iniciales para el diseño de un alcantarillado pluvial, puede considerarse como primordial, la planificación de un correcto trazado del sistema, las formas de interconexión entre tramos y la selección cuidadosa de los sitios de descarga del alcantarillado. Por ello, es vital el levantamiento topográfico que facilitó la Municipalidad de Puntarenas, dado que, a partir del mismo, se obtuvo el modelo digital de elevaciones que sirve como insumo principal para la ejecución de los procesos de análisis de terreno, a través de AutoCAD Civil 3D 2020 se logró obtener el MDE, el cual se analizó en QGIS y se logró obtener modelos de direcciones de flujo, y pendiente.

Para el trazado de la red del alcantarillado pluvial, se tomaron en cuenta múltiples opciones debido a diversos factores, tales como: la cantidad de puntos de descarga, la cantidad de tramos, la característica de la superficie, posibles alturas de caída, entre otros. En este sentido fue beneficioso obtener las direcciones del flujo, pues al considerar el levantamiento y la visita a la localidad de Juanito Mora, se logró establecer una percepción de que el trazado secundario debe poseer un sentido noreste – noroeste, en el sentido de las calles, además, se establecieron dos colectores principales, que recorren la mayor parte de la avenida 3 y 8, dado que esto facilita la descarga al cauce del Río Barranca, que corresponden a las únicas dos vías que tienen más facilidad de comunicarse con el cauce del río; respecto al levantamiento, este influye significativamente, dado que indica las alturas superficiales y las edificaciones; se descartó la colocación de un solo colector en la avenida 8, dado que la caída de altura desde un punto inicial de la avenida 1 hacia la avenida 8 hubiese significado una gran profundidad de excavación, pues es una zona relativamente plana. En resumen, se puede indicar que se estableció un trazado combinado (CONAGUA, 2019). El resultado de las consideraciones anteriores es visible mediante la Figura 30.

Con la determinación del trazado, y las características iniciales del terreno, se establecieron las respectivas áreas de drenaje (subcuencas) que aportan caudales de escorrentía a los diversos pozos de inspección de la red. Al realizar la simplificación del trazado de las áreas mediante figuras rectangulares, de igual forma, se consideraron las direcciones de flujo, la característica del terreno y de los elementos estructurales (vías, viviendas y edificaciones) que

permiten dicha simplificación. La Figura 31 establece la numeración de cada una de dichas áreas, además, indica un color azul para las áreas que aportan al colector 8, y en verde para las que aportan al colector 3. En el apéndice 3 (Tabla AP - 6 y Tabla AP - 7) puede verse un resumen de la distribución del trazado e indica las áreas que drenan a cada pozo de la red pluvial.

A través de QGIS, se crearon las capas poligonales para cada tipo de superficie, esto se observa en la

Figura 32. Se establecieron tres tipos de superficie principales que son predominantes en la zona:

- Calles y avenidas.
- Viviendas y edificios.
- Zonas verdes.

La Tabla 13 indica los coeficientes de escorrentía para cada área, donde se diferencian dos zonas verdes, esto debido a que los tramos finales (cerca de la zona de descarga) presentan pendientes mayores. Cabe indicarse, que la determinación de dichas áreas se basa en la información detallada del levantamiento topográfico, en la visita de campo y en lo observado en imágenes satelitales (a través de QGIS).

El apéndice 3 posee más detalles de cada área de drenaje, por lo cual se presentan áreas totales que varían entre 0.02 ha a 1 ha; a la vez se presentan las distintas sub – áreas superficiales. El sector urbanizado suele presentar hasta tres combinaciones superficiales, mientras que los tramos finales hacia las zonas de descarga únicamente se consideraron como zonas verdes, estas superficies influyen en el coeficiente promedio de escorrentía. También posee los tiempos de concentración, intensidad y caudal máximo que aporta cada área. Las variaciones se dan en los tiempos de concentración, a raíz del cambio en la componente del tiempo de viaje que posee cada tubería y, este puede repercutir en el cálculo de la intensidad y por consecuencia en el caudal máximo.

Cálculo hidráulico y pre-dimensionamiento

Los resultados a analizar en esta sección parten del trazado, de la caracterización de las áreas de drenaje y, de la influencia por la precipitación en la zona. Posteriormente se centra en la toma de decisiones por cada tramo de la red de alcantarillado, dado que surgen diversas

posibilidades según la variación entre pendientes y diámetros; todo ello mientras se toma el cumplimiento de la normativa técnica. Cabe mencionar, que el diseño se realiza a través de una hoja de cálculo de Excel, considerando flujo uniforme.

Previo al diseño de cada propuesta debe tomarse en cuenta que el funcionamiento de una red de alcantarillado pluvial es muy difícil que en la realidad posea un comportamiento en flujo uniforme, principalmente se comporta como flujo variado en régimen no permanente, sin embargo, al considerar las ecuaciones de Saint – Venant puede observarse que tanto el planteamiento de las ecuaciones, como la resolución de las mismas, sería un tema complejo de llevar a cabo de manera manual, por esta razón se utiliza el modelo de onda dinámica del SWMM como una forma de revisión y, el prediseño o pre-dimensionamiento se plantea en flujo uniforme, que además, de ser ampliamente utilizado, destaca que este no posee una alta complejidad de cálculo, por lo cual, brinda una mayor manejabilidad al momento de diseñar las obras. También es importante considerar el mayor cumplimiento de la normativa técnica, dado que la misma establece ciertos límites que buscan que se obtenga un diseño aceptable, aunque deben considerarse los siguientes aspectos:

- El método de flujo uniforme prácticamente no se ve influenciado por la longitud de los tramos, esto quiere decir que si se tienen dos tuberías de diferente longitud (por ej: una de 10 m y otra de 100 m), estas poseerían el mismo tirante hidráulico en todos sus puntos, siempre que posean las mismas dimensiones y el mismo caudal.
- No se consideran las interacciones o influencias que se dan en una red de alcantarillado, ya que el diseño prácticamente se realiza por cada tubería. Es decir, prácticamente no se toman en cuenta las condiciones de contorno.

Es importante indicar que se evitó una pendiente por debajo de 0.25% en todas las propuestas de la red de alcantarillado, esto debido a la recomendación de (Campos, Introducción a la Hidrología Urbana, 2010). Pues se dificulta la medición y construcción de tuberías con pendientes inferiores a dicho valor.

Finalmente, para toda la red se obtuvo el diseño en flujo uniforme (Ver Apéndice 4). En las cuales

se verificó el cumplimiento con la normativa costarricense.

Flujo no permanente

Antes de analizar los valores obtenidos, debe considerarse la parametrización para el área de estudio.

Para la tormenta de diseño, se utilizaron los datos de las curvas IDF, junto a la Ec. 26 para obtener el hietograma necesario mediante el método de bloques alternos. Debe tomarse en cuenta, que según los cálculos de la ecuación de Kirpich (Ec. 5) y Témez (Ec. 6), el tiempo de concentración resultó ser de 39.13 minutos para una longitud aproximada de 1350 metros, pero por razones prácticas se redondeó a 40 minutos.

Respecto al ancho característico, coeficiente de rugosidad de Manning para superficies y el

almacenamiento en depresiones, se obtuvieron o mantuvieron constantes, tal y como se mencionó, para el porcentaje de área impermeable, si bien, algunos autores utilizan lo obtenido con el coeficiente de escorrentía, hay que tomar en cuenta que son distintos, dado que el coeficiente de escorrentía, incluso puede considerar otras variables, por ello, se calculó el porcentaje de área impermeable mediante la ponderación con la Ec. 28 y la Tabla 6.

A través del método de onda dinámica que considera las Ec. 16 y Ec. 17 de Saint – Vennant, se puede resaltar que posee valores de error de continuidad bajos y hay un gran volumen de escorrentía superficial que no se infiltra y, aunque leve, este pre-dimensionamiento posee pérdidas por inundación. Del reporte de SWMM, puede indicarse que se han presentado:

- 8 nodos entran en sobrecarga.
- 3 nodos presentan inundación, aunque sería para solo 0.001 10⁶ litros.
- 40 conductos presentan sobrecarga.

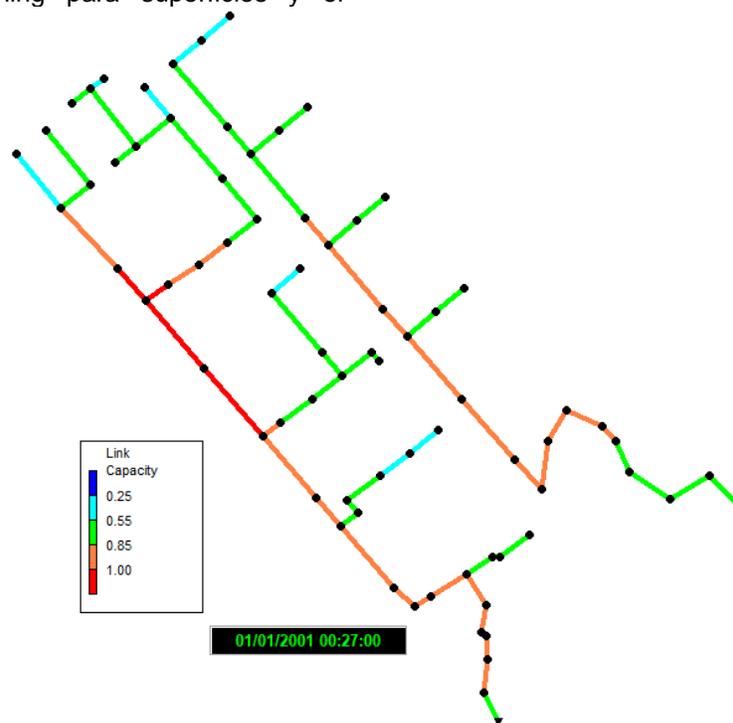


Figura 36. Capacidad de conductos, con el pre-dimensionamiento. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Por tanto, si se tiene presente que los colectores principales de ambas redes poseen relaciones de caudales superiores a 1 y relaciones de tirantes iguales o muy cercanos, no sería muy viable la

ejecución de dicha propuesta, a no ser que se puedan disminuir estas relaciones.

Análisis de sensibilidad I

De acuerdo con lo observado en la Tabla 17 y la Figura 33, que corresponde a la continuidad del flujo de escorrentía y de cálculo hidráulico, las variables que más influyen, o bien, son más sensibles en estos indicadores del modelo realizado son, para el flujo de escorrentía:

- El porcentaje de área impermeable.
- El ancho.
- El “n” de Manning superficial para ambas áreas y el número de curva.

Aunque el área impermeable y el número de curva son los que más destacan, principalmente para las pérdidas por infiltración, dado que, si es mayor la impermeabilidad, menores serían dichas pérdidas. Los que tienen una leve o baja sensibilidad en el flujo de escorrentía, consideran:

- Ambas profundidades de almacenamiento con depresiones.
- El porcentaje de área impermeable sin almacenamientos.
- El flujo entre subcuencas.
- El “n” de Manning para tubería, no tiene ninguna incidencia en la escorrentía superficial.

Respecto a las variables relacionadas con la continuidad del cálculo hidráulico, los de mayor influencia son:

- “n” de Manning para la tubería, incluso su error relativo en relación con las pérdidas por inundación no es visible en la Figura 33, este parámetro presentó mayor variabilidad conforme aumentaba su valor, principalmente para valores superiores a 0.012, el cual, se podría decir que superior a ello, sería cercano a una rugosidad de tuberías de concreto, siendo así, pone de manifiesto que, si en un futuro se prevé utilizar tuberías de concreto y no de PVC, deberá analizarse de forma minuciosa un posible rediseño que evite este comportamiento.
- Nuevamente el porcentaje de área impermeable, al menos en lo relacionado con las pérdidas por inundación.
- En menor medida debe considerarse el “n” de Manning superficial para ambas

áreas, pues su sensibilidad es baja en estos rubros.

Los que prácticamente no tienen variabilidad alguna son:

- La pendiente.
- Ambos parámetros de pérdidas por almacenamiento en depresiones.
- El porcentaje de área impermeable sin Almacenamientos por depresiones.
- El flujo entre subcuencas.
- El ancho característico.
- El número de curva.

No obstante, con la pendiente debe realizarse la observación, que pudo haber variado si los métodos, incluyendo criterios y algoritmos hubiesen sido distintos en el hidropcesamiento, esto incluye a la vez el software utilizado (SAGA, GRASS, ILWIS, entre otros); para mitigar una posible sensibilidad a considerar con este parámetro, se aconseja realizar un levantamiento aún más preciso, para no arrastrar errores que podrían acentuarse en el modelado.

Escenarios con SUDS

Inicialmente para la selección de los SUDS se consideraron las matrices propuestas por (Woods Ballard, y otros, 2007) y, a la vez se observaron posibles tipologías con representantes de la asociación de desarrollo de Juanito Mora y personal de la Municipalidad de Puntarenas. Inicialmente se coincidió únicamente en techos verdes o algún elemento de detención o de almacenamiento, no obstante, con este último no se contaba con ningún tipo de información relevante (topografía del sitio, estudios de suelo, entre otros) y su análisis se consideró fuera del alcance del presente proyecto. Sin embargo, para representar una técnica SUDS que utilice el espacio público, se decidió incluir los pavimentos permeables, que a la vez es una técnica con más recorrido en el país.

Tal como se mencionó antes del resultado mostrado en la Tabla 19 y Tabla 20, es necesario calcular el área impermeable dado que, para efectos de los SUDS, como lo es un techo verde, este debe colocarse sobre la superficie impermeable de un edificio, si fuese el caso que el techo verde iría a sustituir un jardín en la terraza, por ejemplo, bajo estas condiciones sí se debería

recalcular el área permeable, pero a efectos de este trabajo se ha proyectado que únicamente se colocaría sobre un 35% del área impermeable de los edificios y, en el caso de los pavimentos permeables, en su proyección si se consideró el 100% de las áreas de calles y avenidas; lo anterior considerando que incluso en diversas ciudades se solicita valores altos de conversión de áreas impermeables, o en estudios como el de (Versini, Gires, Tchiguirinskaia, & Schertzer, 2015) que

simuló la conversión para el 100% del área de techos en una localización de París, también en otros casos como el de (Randall, Sun, Zhang, & Jensen, 2019) se propuso simular un 30% sobre la superficie impermeable de los edificios.

A continuación, se puede observar la variación de las áreas impermeables, donde con los pavimentos permeables se obtuvo la mayor reducción.

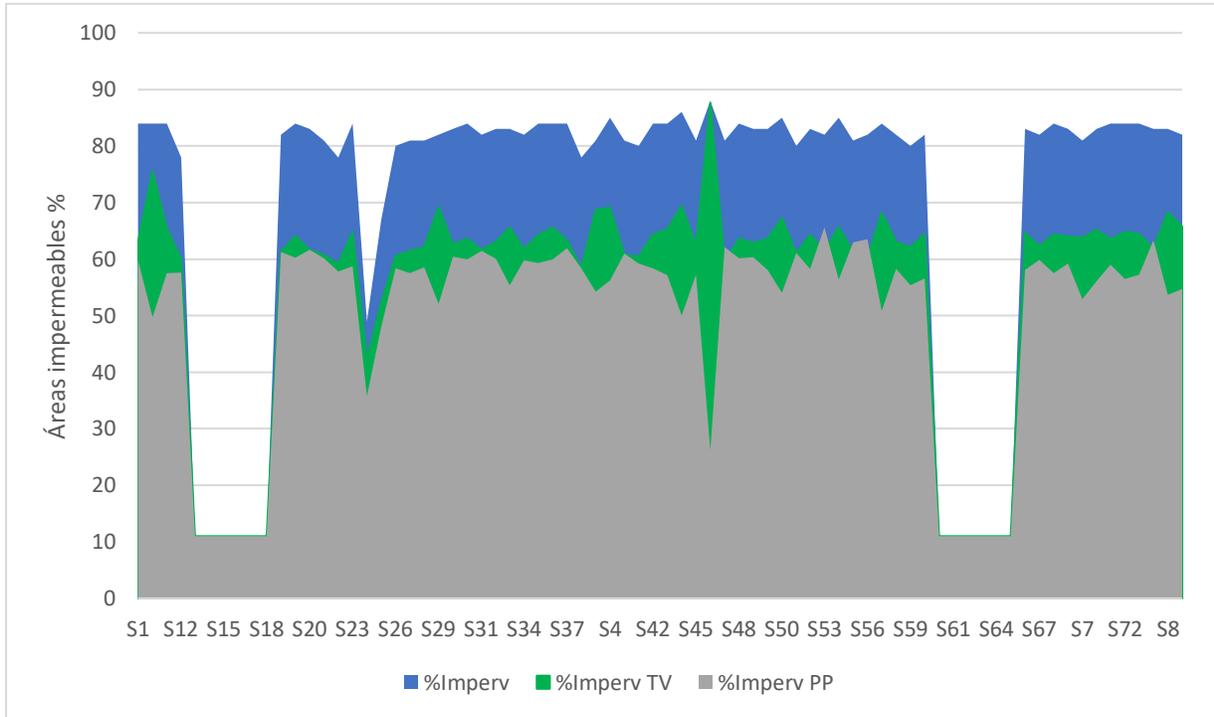


Figura 37. Variación de áreas impermeables de la red, sin SUDS y con techos verdes, y pavimentos permeables. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para la Tabla 21 se presentan los cuatro escenarios con SUDS, tomando en cuenta que el escenario cuatro y cinco poseen la misma reducción de diámetros en los colectores principales. A nivel general resalta el aumento en las pérdidas por infiltración, así como la reducción total de pérdidas por inundación (aunque ya eran bajas en el pre-dimensionamiento) y, en el caso de los techos verdes aparece un nuevo rubro de

Drenaje, en el cual se logró captar un volumen de 0.22 ha m.

Para evidenciar este cambio, principalmente en la escorrentía superficial, a continuación se muestra la variación en cada subcuenca, siendo los pavimentos permeables los que lograron mayor infiltración y reducción en la escorrentía superficial.

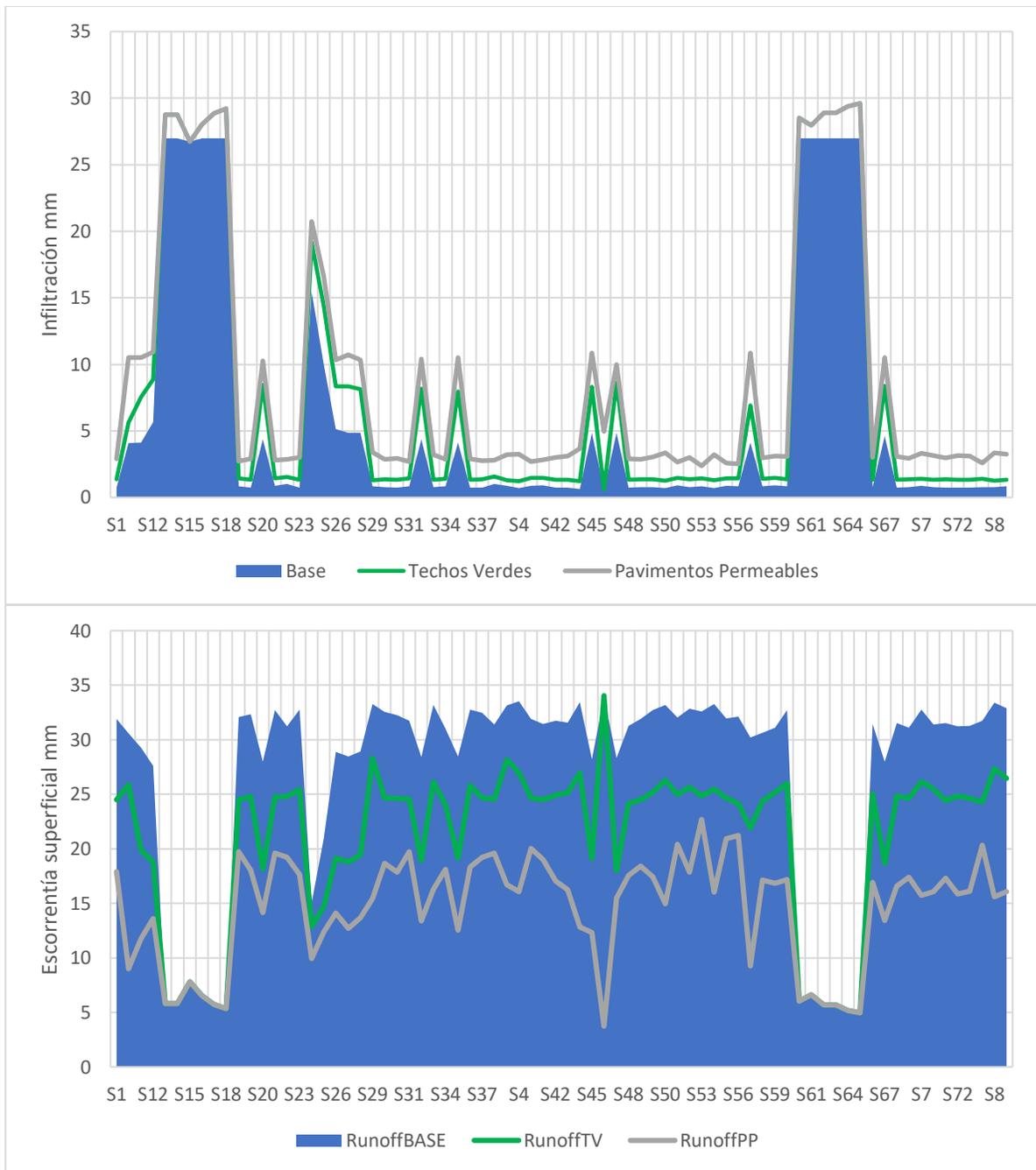


Figura 38. Variación de infiltración y escorrentía superficial para cada subcuenca.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Además, con los cambios por infiltración y escorrentía, esto repercute en una reducción en el flujo en las tuberías, lo que impacta notablemente la capacidad de estas, dado que a diferencia de

los tramos sin SUDS, ahora ninguno supera el valor de 0.85.

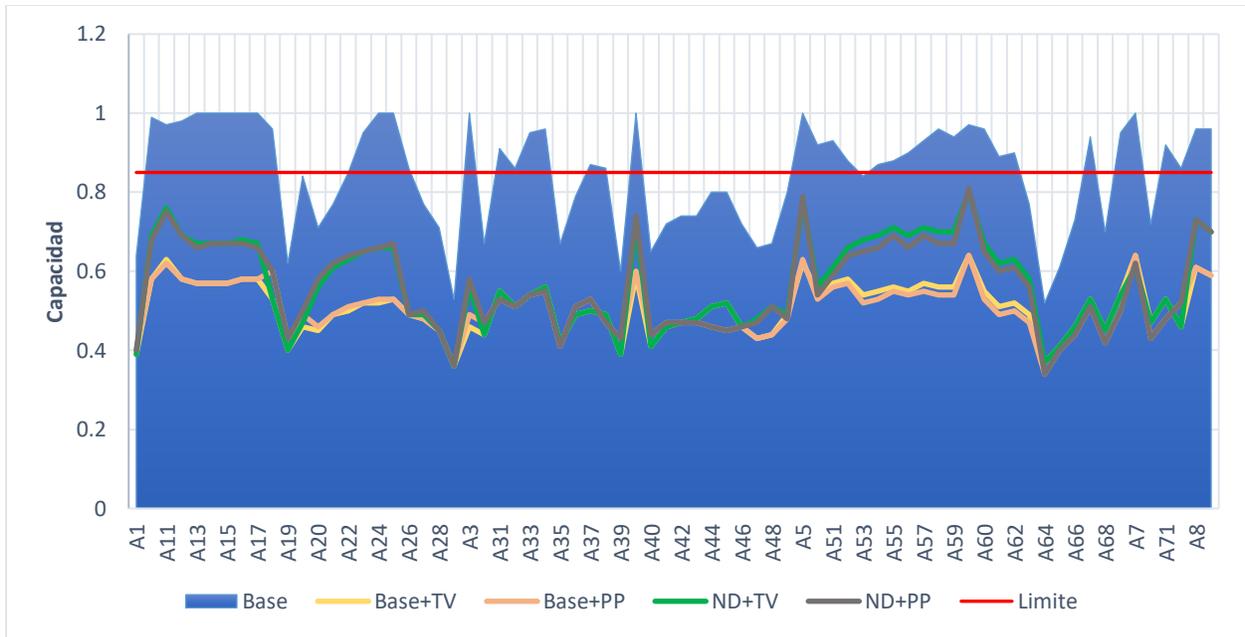


Figura 39. Variación en la capacidad de las tuberías.
Fuente: Elaboración propia, 2020.

Para continuar ilustrando los beneficios en el comportamiento hidráulico, para los tramos de tubería, se ha disminuido las velocidades y, en los puntos en donde es más notable, es en los tramos finales; incluso ahora, no hay tramo que supere los

5 m/s, así como tampoco se presenta alguno con velocidad inferior a 0.6 m/s, según lo establece la normativa vigente del AyA.

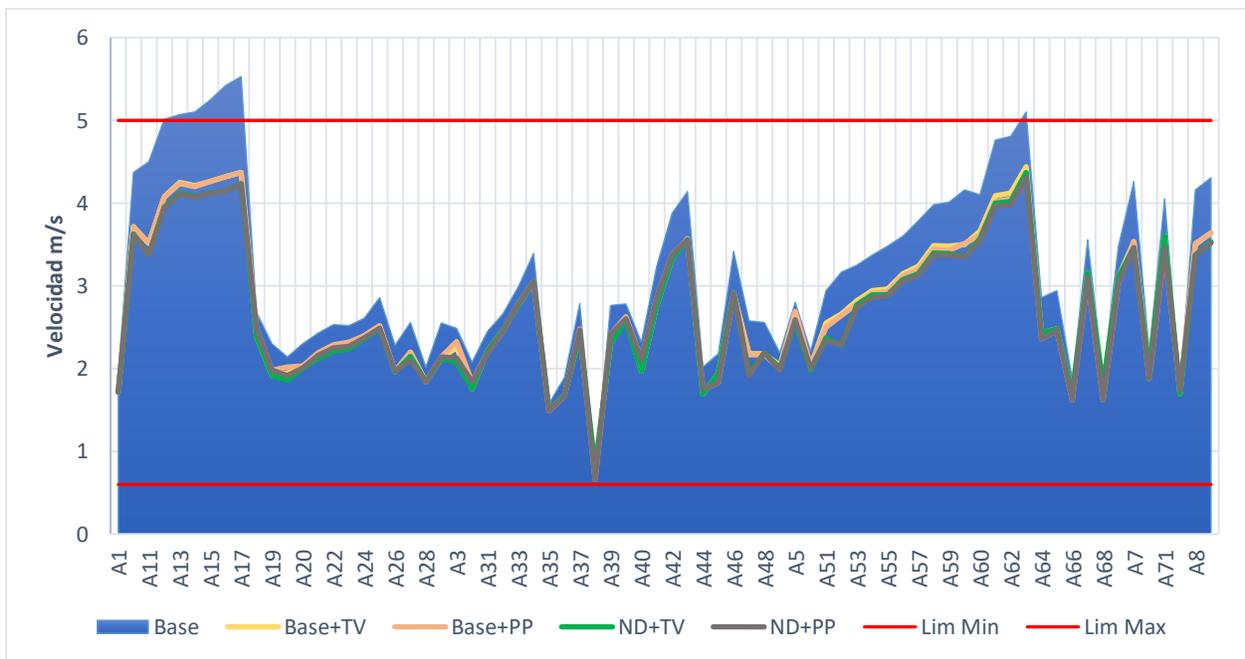


Figura 40. Variación de las velocidades en las tuberías. Fuente: Elaboración propia, 2020

Otro aspecto a tomar en cuenta, y que posteriormente se verá su impacto en los costos, es que la colocación de SUDS también permitió

una reducción de los diámetros, aunque estas modificaciones se concentraron en los colectores, donde se presentaron inicialmente diámetros de

1350 mm y de 1200 mm, siendo reducidos a 1050 mm o 910 mm inclusive.

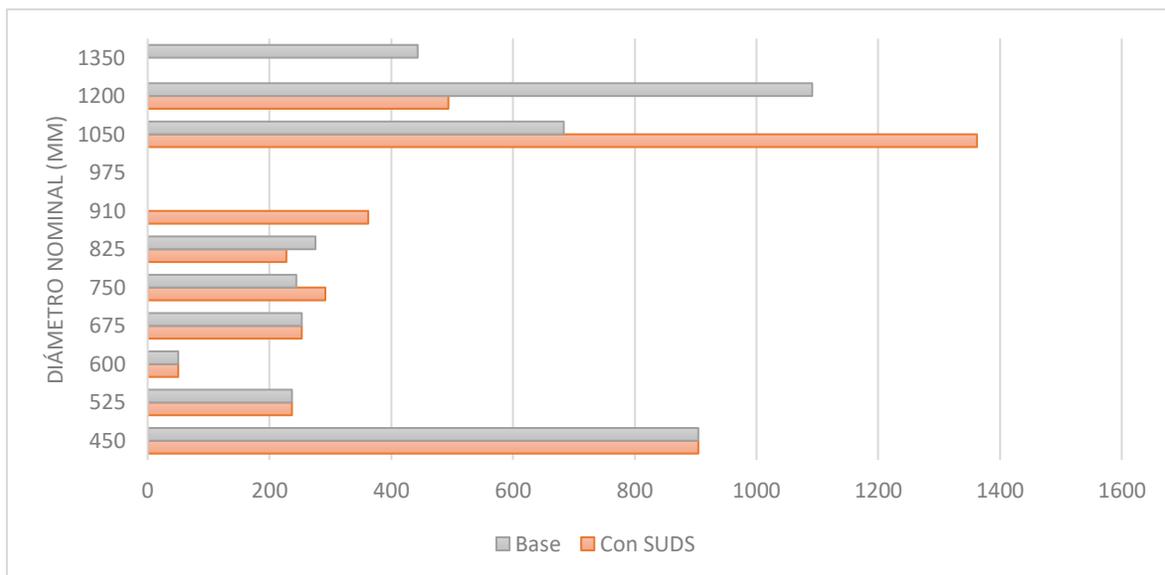


Figura 41. Variación en la distribución de tubería al reducir diámetros. Fuente: elaboración propia, 2020.

En relación al caudal pico, se ha desplazado un par de minutos, de 27 min a 30 min y se observa que al menos en el caso de los pavimentos permeables el agotamiento se mantiene, sin embargo, para los techos verdes se presentan dos picos, en esto cabe destacar que un hidrograma puede presentar múltiples picos y, en este se

puede dar en particular por una no sincronización de los componentes del flujo, o debido a que, los techos verdes no lograron contener más escorrentía (por saturación del sustrato por ejemplo) y esta ingresa al sistema.

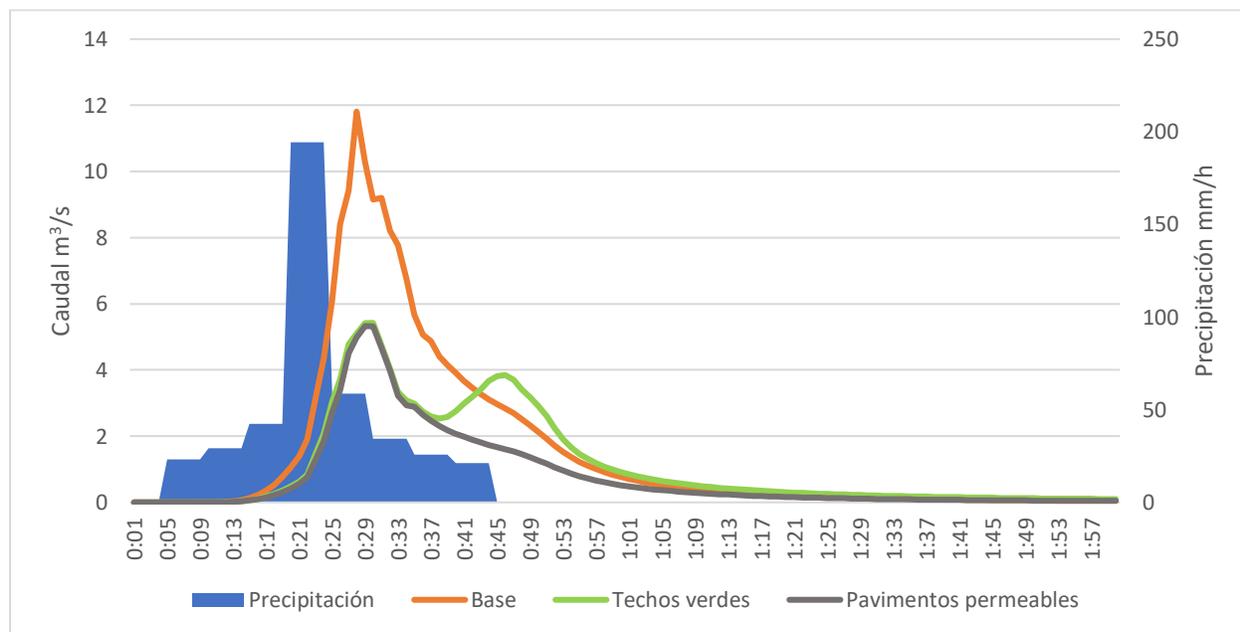


Figura 42. Variación del hidrograma del sistema sin/con SUDS. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Finalmente, a continuación se aprecia, a modo resumen, la variación de ciertos parámetros e

indicadores hidráulicos e hidrológicos para cada escenario de la red pluvial. Aunque si deberá de

tomarse en cuenta para un futuro, que la capacidad de soporte de las viviendas se podría ver afectada, y por ello, es necesario que se compruebe previo cualquier instalación de techos

verdes, de forma similar, deberá diseñarse el pavimento permeable para que se garantice el tránsito en la zona.

Tabla 28. Variación e indicadores para cada escenario de la red pluvial.

Criterios		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
¿Pozos sobrecargados?		8.00	0.00	0.00	0.00	0.00
¿Pozos inundados?		3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Caudal en desfogues (m ³ /s)	Red 8	7.91	3.71	3.69	3.38	3.34
	Red 3	4.68	2.41	2.27	2.29	2.17
Variación caudales	Red 8	-	113%	114%	134%	137%
	Red 3	-	94%	106%	104%	116%
Velocidad en desfogues (m/s)	Red 8	5.53	4.37	4.37	4.24	4.23
	Red 3	5.10	4.44	4.37	4.37	4.31
Variación velocidades	Red 8	-	27%	27%	30%	31%
	Red 3	-	15%	17%	17%	18%
¿Tramos sobrecargados?		40.00	0.00	0.00	0.00	0.00
¿Tramos con capacidad >0.85?		42.00	0.00	0.00	0.00	0.00
¿Cumple Vmin?		Si	Si	Si	Si	Si
¿Cumple Vmax?		No, en 7	Si	Si	Si	Si
Variación escorrentía superficial		-	81%	85%	81%	85%
Variación de infiltración		-	49%	107%	49%	107%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

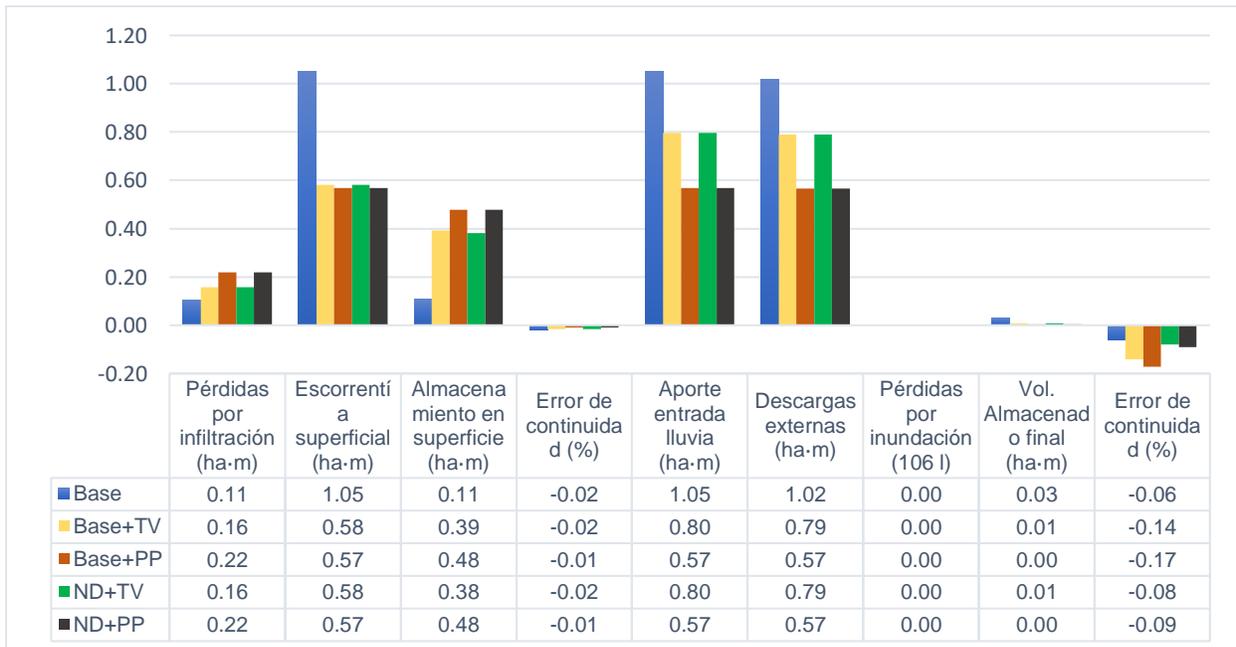


Figura 43. Variación de parámetros por escenario en la red pluvial. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Análisis de sensibilidad II

En la Tabla 22 y Tabla 23, y en la Figura 34, se puede identificar el análisis de sensibilidad para ciertos parámetros de los techos verdes, que tanto el espesor, como la porosidad son variables sensibles en los rubros de escorrentía superficial, y en menor medida la berma, esto puede considerarse que cumple con la literatura dado que el espesor del sustrato tendrá gran influencia en el drenaje y almacenamiento de la escorrentía, el resto de parámetros prácticamente tienen poca sensibilidad pero debe tomarse en cuenta que los datos utilizados son similares a una arena y, estos podrían variar para el sustrato. Estos valores también deben tenerse en cuenta que son una propiedad derivada y propia del tipo de sustrato a utilizar, por lo cual, generalmente no se utiliza como parámetro a analizar, dado que se pueden obtener datos fiables en laboratorio. Finalmente, el parámetro de capacidad podría considerarse sin sensibilidad alguna para el flujo de escorrentía.

Con relación al cálculo hidráulico, no se encontrará que varíen o indiquen una gran sensibilidad, el que destaca más, es el espesor del sustrato nuevamente y, la berma, junto a la conductividad hidráulica se mantiene con la sensibilidad más baja. La porosidad por su cuenta es otra variable que dependerá del sustrato, ya usualmente se considera un 50%, como si fuese de un suelo ideal, por ello, posee un comportamiento de que a mayor incremento su porcentaje, más disminuye el aporte y las descargas.

De lo observado se puede afirmar que estos parámetros poseen sensibilidades entre bajas y medias para el cálculo hidráulico.

Para la Tabla 24 y Tabla 25 y, la Figura 34, se puede identificar el análisis de sensibilidad para ciertos parámetros de pavimentos permeables. En este caso, sólo se decidió evaluar la permeabilidad y la tasa de infiltración del sustrato, se considera que el resto pueden representar más importancia en cuanto a la capacidad de carga, pero eso no se incluye en el alcance del presente proyecto.

Entre ambos parámetros, únicamente la tasa de infiltración del sustrato es la que presenta realmente una sensibilidad a considerar, máxime para las pérdidas por infiltración, por lo cual, este parámetro será vital al analizar el sustrato,

mientras que la permeabilidad posee una baja sensibilidad en relación con la escorrentía y, con el cálculo hidráulico, aunque de implementarse un pavimento permeable debe tenerse presente el mantenimiento y no afectar la permeabilidad del mismo, dado que si bien, hay pavimentos permeables que son capaces de tener una permeabilidad de hasta 36.000 mm/h (TARMAC, 2020), la intrusión en los poros, con limos por ejemplo, pueden incidir en una baja de la permeabilidad llegando a valores incluso de 150 mm/h.

Finalmente, debe considerarse que el análisis brindado y los resultados obtenidos, se presentan de una forma independiente, es decir, se simuló uno a uno, razón por la que no se contempla la interacción y la sensibilidad que puede presentarse entre múltiples variables de forma simultánea, por lo cual, se recomendaría desarrollar un próximo análisis, abarcando cambios de varias variables de esta forma.

Componente socioeconómico

Las más de 1200 familias del barrio Juanito Mora, se verán beneficiadas con la construcción del alcantarillado pluvial, propuesto en el presente proyecto, tanto con techos verdes, o con pavimentos permeables, como soluciones innovadoras en infraestructuras verdes, que promuevan la sostenibilidad ambiental, dado que se mejora la calidad de vida de las personas y sus condiciones de salubridad, pues se evitarían brotes de infecciones o de enfermedades, además, se evitan daños a viviendas, producto de las inundaciones.

Además, con los techos verdes, incluso implicaría un positivo y notable impacto socioeconómico y ambiental. Con dicha implementación del SUDS de techos verdes, si se pudiese contar con el área propuesta o incluso puede ser un área aún menor (pero focalizada en zonas con alto porcentaje de impermeabilidad) que garantice la eficiencia del sistema como se ha explicado en este proyecto, esto podría traducirse en la reducción de escorrentía superficial, incluso ayudarían al control de contaminantes -aunque eso no fue objeto de estudio en este proyecto- y, dependiendo del sustrato y del componente vegetal, se podrían tener horticultura urbana, o bien, un techo verde

con otros cultivos para consumo propio. También implicaría una reducción de la isla de calor y, las viviendas podrían tener mejores condiciones termohigrométricas, siendo este, un importante factor para una zona tan calurosa, además, la descarga al cauce del río Barranca sería reducida y presentaría menos contaminantes. Estas ventajas mencionadas, se verían reflejadas en su gran mayoría con los pavimentos permeables, pues incluso ambos comparten un doble uso del espacio, por lo que no implican mayor problema de ocupación; aunque tal vez el aspecto paisajístico no se compartiría de igual forma con los techos verdes, o la probabilidad de siembra y reducción de la isla de calor.

En el aspecto económico, al utilizar técnicas SUDS se logró reducir un 15% los costos sólo de tubería, aunque los mismos pueden ser aún menores, si se considera una modificación mayor de la red; sin embargo, al incluir los costos de referencia para techos verdes y pavimentos permeables, se dispara el costo total. Con el escenario de techos verdes se aumentó un 64% y con los pavimentos permeables, hasta un 41% en relación con el costo inicial. Pero es importante tomar en cuenta los

valores agregados de las técnicas SUDS, desde el punto de vista paisajístico y ambiental.

Debe considerarse que para la ejecución de este proyecto, podría planificarse en etapas y a la vez buscar diversos tipos de financiamiento, por ejemplo, contar con cierta donación de material, o incluir el apoyo de expertos o transferencia de tecnología. Incluso se puede contemplar el financiamiento o ayuda económica, por parte de actores de la sociedad civil, de instituciones nacionales, fondos de financiamientos no reembolsables o de cooperación internacional y, en este último se pueden considerar los fondos "climáticos o verdes".

También es importante mencionar que el barrio de Juanito Mora ya ha gestionado bonos colectivos con el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH) y, con cualquiera de las dos técnicas SUDS presentadas, podría evaluarse la posibilidad de una nueva solicitud del bono colectivo, dado que el objetivo de este "permite mejorar las condiciones de vida de sus habitantes con el desarrollo de obras de infraestructura verde y servicios básicos, tales como: agua potable, zonas verdes, alcantarillado e hidrantes, entre otros." (MIVAH, 2014).

Conclusiones

El proceso de toma de decisiones apoyado en el sistema de información geográfica de QGIS ha resultado eficiente, especialmente en la caracterización de la zona.

Se obtuvo la ecuación de intensidad para la estación 78027 de Puntarenas, se tabularon valores para distintos períodos de retorno y duraciones de lluvia, además, se presentaron las curvas IDF correspondientes.

El área de estudio posee bajas pendientes, pero se aprovecharon las pendientes transversales de la zona, para la configuración de las redes secundarias, estas descargan únicamente a dos colectores principales, que se ubican a lo largo de la avenida 8 y 3.

El pre-dimensionamiento en flujo uniforme demostró cierta simplicidad de cálculo y, al realizar las simulaciones en la herramienta computacional SWMM, se concluye que resulta inapropiado para indicar de una forma más cercana, a la realidad, el comportamiento, tanto en los pozos como de las tuberías; a raíz de esto, incluso la red podría verse afectada por sobrecargas, falta de capacidad en la conducción, velocidades no aptas, entre otros, si únicamente se realizará el diseño con el flujo uniforme y no se viera como un método más de prediseño o pre-dimensionamiento.

De los resultados obtenidos por la simulación en el SWMM, se puede observar que la localidad de Juanito Mora no sufriría inundaciones debido a lluvias ordinarias al contemplar techos verdes o pavimentos permeables. Se considera que alrededor de 1200 familias de la localidad de Juanito Mora se verán beneficiadas con la construcción del alcantarillado pluvial propuesto en el presente proyecto, utilizando SUDS, dado que se mejora la calidad de vida de las personas y sus condiciones de salud, ya que se evitarían brotes de infecciones o de enfermedades,

además, se evitan daños a la infraestructura de las viviendas, a raíz de las inundaciones. De igual forma, habría un positivo y notable impacto socioeconómico y ambiental con la colocación de techos verdes o pavimentos permeables.

En relación con el análisis de sensibilidad I, para los parámetros generales de la red, el modelador debe prestar especial atención al área impermeable y, al número de curva, lo que a la vez implica, que es importante que realice una buena caracterización del área. En menor forma, deberá considerar el ancho, el "n" superficial de Manning para ambas áreas. Y, la pendiente, así como, ambos parámetros de pérdidas por almacenamiento en depresiones se pueden considerar con una sensibilidad muy baja, por lo cual, podría ahorrar tiempo y trabajo en futuras simulaciones y calibraciones.

Del análisis de sensibilidad para los SUDS, se puede mencionar que para los techos verdes, ciertos parámetros están estrechamente relacionados a la escogencia del sustrato, se pudo analizar el comportamiento y su variación en la red, los que deben tener mayor atención son: la porosidad y el espesor y, en una menor forma el parámetro de conductividad y la berma. El resto de los parámetros realmente tuvo una influencia y sensibilidad mínima. Y respecto a los pavimentos permeables, prácticamente sólo la tasa de infiltración presentó una sensibilidad a considerar.

De esta manera, quedó demostrado que con el cambio de la superficie de pavimento por uno permeable, y con un 35% de colocación de SUDS para el área impermeable de los edificios, se logró disminuir en ambos escenarios más del 50% la escorrentía superficial, lo que evitó problemas en la red ligados a sobrecargas, inundación, capacidad y altas velocidades, permitiendo incluso una reducción considerable de diámetros y del costo.

Recomendaciones

Para mejorar la Ec. 31 de intensidad de la estación 78027, se recomendaría establecer coeficientes de lluvia – duración acorde a la zona de Puntarenas, mediante estudios de lluvia de una hora de duración con pluviógrafos en la zona.

Se recomienda a la Municipalidad de Puntarenas corroborar el levantamiento topográfico de la localidad, previo a la construcción del sistema, con mayor énfasis en los tramos finales en las zonas de descarga y, en los puntos que presentan una considerable cobertura o pozos profundos.

Se puede considerar una caracterización de las áreas, con zonas de control respecto de las fuentes de información espacial; o bien, utilizar clasificación supervisada de imágenes satelitales.

La misma Municipalidad debe establecer un mayor control de los asentamientos informales o invasiones territoriales que se han generado en dicha localidad, además, se debe concienciar a dicha población sobre el peligro que representa estar tan cerca al cauce del Río Barranca.

Para evitar cualquier tipo de obstrucción en el sistema y, garantizar un desempeño óptimo del mismo, se deben promover acciones de mantenimiento preventivo y correctivo.

A pesar de que el marco normativo se modificó recientemente para el diseño de alcantarillado pluvial, aún debe actualizarse más, no sólo no contempla o insta al diseñador a realizar verificaciones en flujo no permanente, sino que tampoco posee ninguna referencia sobre SUDS, ya sea de forma estructural, o no; en dicho sentido, se insta a los profesionales del área e instituciones relacionadas, a promover un cambio hacia técnicas de desarrollo sostenible y aplicación de infraestructura verde.

Hay múltiples desafíos de desarrollo sostenible entorno al agua y el saneamiento a nivel municipal, se insta por eso a la Municipalidad de Puntarenas a considerar este proyecto como

piloto y adaptarlo a futuros desarrollos, a su vez, que sirva para promover objetivos de sostenibilidad ambiental, tanto, entre sus funcionarios, como con la comunidad y desarrolladores, a través, de talleres que pueden realizarse con alianzas interinstitucionales o del ámbito público – privado. E inclusive valorar opciones de financiamiento que fomenten la construcción de este tipo u otras obras de infraestructura verde.

Se recomienda realizar capacitaciones al personal técnico para que sea capaz de utilizar diversos SIG y programas de simulación como SWMM.

Podría contemplarse para futuras investigaciones, llevar a cabo un análisis de sensibilidad, aún más robusto, contemplando más parámetros de forma simultánea, para evaluar el comportamiento de la red en esa situación. Y en este mismo sentido, efectuar un análisis estructural en las viviendas que quieran optar por la colocación de techos verdes, así como, los respectivos estudios para el pavimento permeable.

Apéndice

A continuación, se presenta la lista de anexos adjuntos en el documento, seguido de cada uno de ellos, según corresponde.

- I. Completación de datos.
- II. Análisis de frecuencia.
- III. Distribución y valores característicos de la red pluvial.
- IV. Resultados del diseño en flujo uniforme para la red pluvial.

Apéndice 1. Completación de datos

A continuación, se muestra la tabla con los valores de precipitación máxima en 24 horas de forma mensual que proporcionó el Instituto Meteorológico Nacional IMN, para la estación 78027, de la ciudad de Puntarenas.

La cual se ubica a 3 m.s.n.m., y sus coordenadas geográficas son:

- Latitud norte: 09° 58' 20"
- Longitud oeste: 84° 49' 51.44"

Tabla AP - 1. Registro de datos sin completar, precipitación máxima en 24 h, mensual.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	39.1	27.9	54.2	49.5	69.8	41.3	69.1
2002	4.3	0.0	0.0	10.1	72.9	44.4	32.6	30.5	31.8	26.5	29.9	0.1
2003	-	0.0	7.1	28.1	67.9	98.6	44.7	13.2	39.0	39.2	19.7	3.2
2004	21.4	0.0	0.0	11.3	50.7	88.0	28.7	24.4	121.1	54.0	37.2	1.8
2005	0.0	0.1	2.3	39.4	45.8	68.7	-	37.2	132.1	97.4	13.2	14.3
2006	6.7	4.8	1.2	2.4	9.4	30.5	11.2	88.9	75.7	49.9	34.3	3.9
2007	0.1	0.0	0.3	29.3	60.8	26.9	26.4	56.7	76.6	68.3	35.3	2.9
2008	0.1	5.3	0.3	11.0	92.1	48.6	75.5	106.2	47.3	144.6	70.8	1.7
2009	0.0	0.1	0.0	0.1	52.5	59.6	32.8	24.2	27.7	52.1	18.6	28.7
2010	0.0	16.7	0.0	54.6	79.6	72.4	60.2	88.9	52.6	16.8	97.7	17.8
2011	1.6	0.0	-	6.5	25.5	97.4	76.7	40.2	60.2	111.4	2.0	-
2012	0.0	0.0	0.0	27.9	11.2	16.6	43.6	39.1	45.9	38.7	26.4	57.3
2013	0.0	0.0	4.2	5.0	15.9	-	44.5	55.1	47.4	57.4	19.4	4.4
2014	0.8	0.0	1.0	12.8	61.2	37.8	7.0	33.1	36.7	88.3	45.4	8.3
2015	0.0	4.3	0.0	0.0	11.3	67.8	64.7	19.5	28.2	89.8	76.7	5.1
2016	3.8	-	0.0	11.9	40.5	27.9	30.7	6.4	-	-	-	90.7
2017	0.4	0.1	0.0	8.6	65.0	34.5	56.7	22.3	55.3	114.9	38.0	0.0
2018	-	-	0.3	0.4	45.5	19.2	14.6	14.5	67.2	272.8	69.7	2.0
2019	0.0	0.0	0.0	2.6	126.6	11.1	18.2	80.8	55.9	68.0	9.7	0.4

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2020.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos a través del método racional deductivo para la completación del registro de datos, estos se indican sombreados y resaltados.

Tabla AP- 2. Registro de datos completados al realizar el método racional deductivo.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	39.1	27.9	54.2	49.5	69.8	41.3	69.1
2002	4.3	0.0	0.0	10.1	72.9	44.4	32.6	30.5	31.8	26.5	29.9	0.1
2003	2.5	0.0	7.1	28.1	67.9	98.6	44.7	13.2	39.0	39.2	19.7	3.2
2004	21.4	0.0	0.0	11.3	50.7	88.0	28.7	24.4	121.1	54.0	37.2	1.8
2005	0.0	0.1	2.3	39.4	45.8	68.7	47.1	37.2	132.1	97.4	13.2	14.3
2006	6.7	4.8	1.2	2.4	9.4	30.5	11.2	88.9	75.7	49.9	34.3	3.9
2007	0.1	0.0	0.3	29.3	60.8	26.9	26.4	56.7	76.6	68.3	35.3	2.9
2008	0.1	5.3	0.3	11.0	92.1	48.6	75.5	106.2	47.3	144.6	70.8	1.7
2009	0.0	0.1	0.0	0.1	52.5	59.6	32.8	24.2	27.7	52.1	18.6	28.7
2010	0.0	16.7	0.0	54.6	79.6	72.4	60.2	88.9	52.6	16.8	97.7	17.8
2011	1.6	0.0	0.3	6.5	25.5	97.4	76.7	40.2	60.2	111.4	2.0	18.9
2012	0.0	0.0	0.0	27.9	11.2	16.6	43.6	39.1	45.9	38.7	26.4	57.3
2013	0.0	0.0	4.2	5.0	15.9	33.1	44.5	55.1	47.4	57.4	19.4	4.4
2014	0.8	0.0	1.0	12.8	61.2	37.8	7.0	33.1	36.7	88.3	45.4	8.3
2015	0.0	4.3	0.0	0.0	11.3	67.8	64.7	19.5	28.2	89.8	76.7	5.1
2016	3.8	1.9	0.0	11.9	40.5	27.9	30.7	6.4	52.7	65.3	40.2	90.7
2017	0.4	0.1	0.0	8.6	65.0	34.5	56.7	22.3	55.3	114.9	38.0	0.0
2018	3.5	2.6	0.3	0.4	45.5	19.2	14.6	14.5	67.2	0.0	69.7	2.0
2019	0.0	0.0	0.0	2.6	126.6	11.1	18.2	80.8	55.9	68.0	9.7	0.4
MAX	21.40	16.70	7.10	54.60	126.60	98.60	76.70	106.20	132.10	144.60	97.70	90.70

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Una vez obtenida la estimación completa de los datos de precipitación para la estación 78027, se procede con la extracción de los valores máximos mensuales por cada período de registro:

Tabla AP - 3. Valores máximos de precipitación (mm) por año de registro.

Nº	Año	Ppmax (mm)
1	2001	69.8
2	2002	72.9
3	2003	98.6
4	2004	121.1
5	2005	132.1
6	2006	88.9
7	2007	76.6
8	2008	144.6
9	2009	59.6
10	2010	97.7
11	2011	111.4
12	2012	57.3
13	2013	57.4
14	2014	88.3
15	2015	89.8
16	2016	90.7
17	2017	114.9
18	2018	69.7
19	2019	126.6

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 2. Análisis de frecuencia

Con valores máximos de precipitación se evaluó el ajuste a las distintas distribuciones, siendo para Log Pearson tipo III la única distribución para la cual no se ajustaron para el nivel de significancia de 5%.

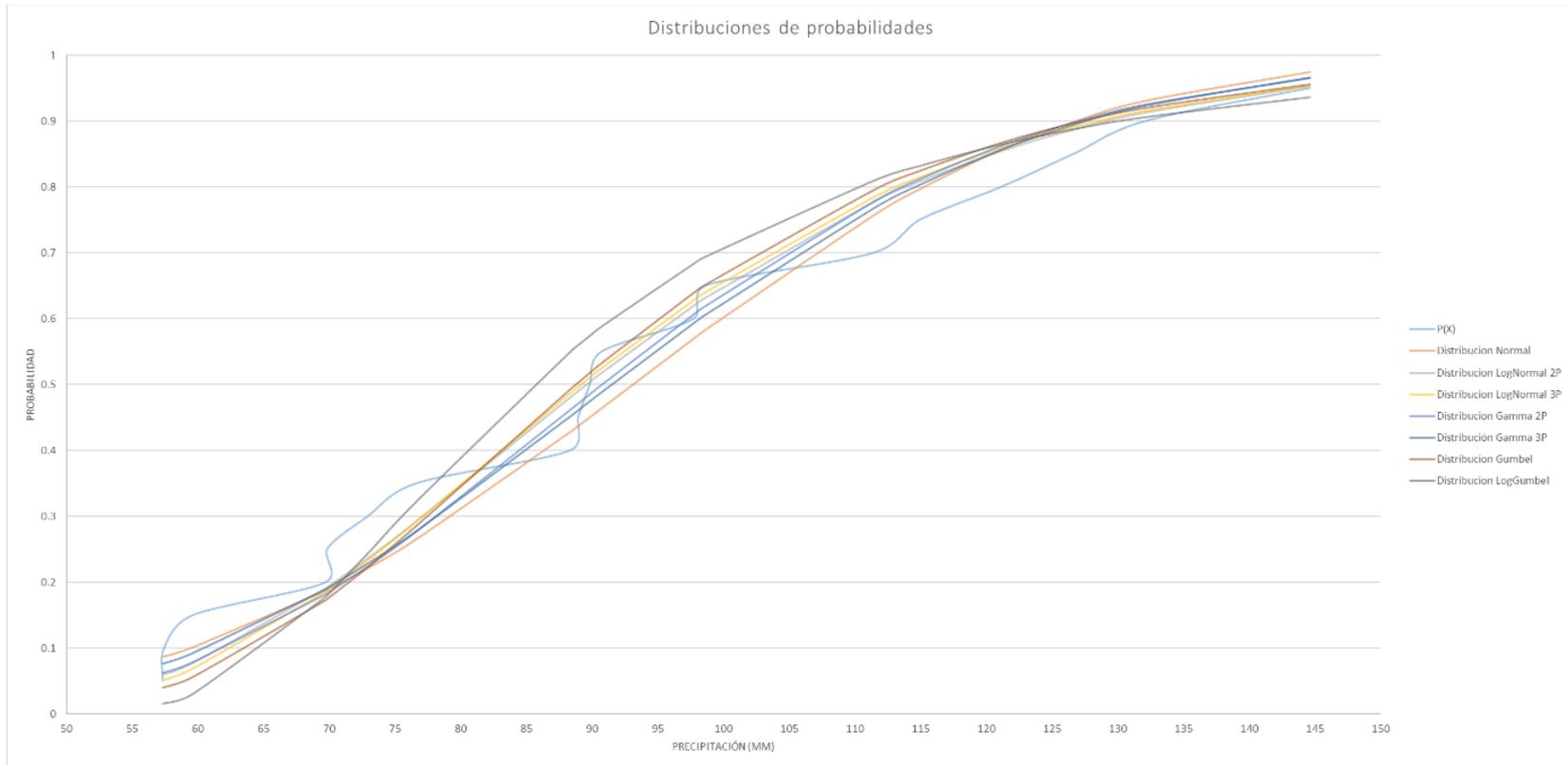


Figura AP- 1. Distribuciones de probabilidades para los valores máximos de precipitación. Fuente: Elaboración propia, 2020.

Con el resto de las distribuciones, se estableció la prueba de bondad de ajuste, mediante la ejecución de las ecuaciones: Ec. 21 y Ec. 22.

Tabla AP- 4. Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov.

Δ Tabular	Normal	Δ teórico					
		Log normal 2 parámetros	Log normal 3 parámetros	Gamma 2 parámetros	Gamma 3 parámetros	Gumbel	Log Gumbel
0.312	0.086	0.080	0.087	0.078	0.072	0.095	0.150
Mínimo Δ				0.072			

Fuente: Elaboración propia, 2020.

La distribución que mejor se ajusta es la de Gamma 3 parámetros y, con esta distribución se obtiene la precipitación máxima para diversos períodos de retorno. Y a la vez, se considera el factor de corrección del 13%.

Tabla AP - 5. Precipitaciones máximas corregidas, para diferentes períodos de retorno.

Período de retorno (años)	Factor de frecuencia (mm)	P	Corrección (mm)
2	91.46	0.500	103.35
5	114.59	0.200	129.49
10	127.60	0.100	144.19
25	142.20	0.040	160.69
50	152.02	0.020	171.78
100	161.11	0.010	182.05
500	180.14	0.002	203.56

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Apéndice 3. Distribución y valores característicos de la red pluvial.

Tabla AP - 6. Distribución de la red que recorre la avenida 3.

Redes	Tramo	Pozos		Área drenaje	
		De	A		
3.4	70	72	73	72	
	71	73	54	73	
3.3	68	70	71	70	
	69	71	52	71	
3.2	66	68	69	68	
	67	69	50	69	
3.1	64	66	67	66	
	65	67	48	67	
RED Av 3	47	48	49	48	
	48	49	50	49	
	49	50	51	50	
	50	51	52	51	
	51	52	53	52	
	52	53	54	53	
	53	54	55	54	
	54	55	56	55	
	3	55	56	57	56
	56	57	58	57	
	57	58	59	58	
	58	59	60	59	
	59	60	61	60	
60	61	62	61		
61	62	63	62		
62	63	64	63		
63	64	65	64, 65		

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 7. Distribución de la red que recorre la avenida 8.

Redes	Tramo	Pozos		Área drenaje
		De	A	
8.5	44	45	46	45
	45	46	47	46
	46	47	12	47
8.4	39	40	41	40
	40	41	42	41
	41	42	43	42
	42	43	44	43
	43	44	8	44
8.3.1	35	36	37	36
	36	37	38	37
	37	38	33	38
8.3	38	39	32	39
	31	32	33	32
	32	33	34	33
	33	34	35	34
	34	35	6	35
8.2.1.1.b	30	31	29	31
8.2.1.1.a	29	30	29	30
8.2.1.1	28	29	28	29
8.2.1	26	27	28	27
	27	28	21	28
8.2	19	20	21	20
	20	21	22	21
	21	22	23	22
	22	23	24	23
	23	24	25	24
	24	25	26	25
	25	26	4	26
	72	74	19	74
8.1	18	19	2	19
	1	1	2	1
8	2	2	3	2
	3	3	4	3
	4	4	5	4
	5	5	6	5
	6	6	7	6
	7	7	8	7
	8	8	9	8
	9	9	10	9
	10	10	11	10
	11	11	12	11
	12	12	13	12
	13	13	14	13
	14	14	15	14
	15	15	16	15
	16	16	17	16
17	17	18	17, 18	

Fuente: Elaboración propia, 2020

Tabla AP - 8. Características de las áreas de drenaje, y valores de tiempos de concentración, intensidad y caudal máximo para cada área de la red para la red 3.

Área	A (ha)	Long (m)	Ster (%)	AEdif (ha)	APav (ha)	AVeg (ha)	A2Veg (ha)	Coef Prom	Tc (min)	Intensidad (mm/h)	Q (m ³ /s)
48	0.76	140.38	1.00	0.57	0.19	0.00	0.00	0.82	9.16	126.54	0.65
49	0.53	106.04	1.20	0.40	0.13	0.01	0.00	0.82	12.20	111.91	0.70
50	0.35	80.01	1.18	0.23	0.11	0.00	0.00	0.82	13.76	103.88	1.07
51	0.44	90.27	1.20	0.33	0.09	0.02	0.00	0.80	16.37	93.27	1.03
52	0.58	105.06	1.18	0.42	0.15	0.01	0.00	0.81	18.07	87.73	1.37
53	0.36	79.39	1.18	0.29	0.06	0.01	0.00	0.82	20.33	81.56	1.35
54	0.37	82.66	1.36	0.26	0.11	0.00	0.00	0.82	21.85	78.02	1.66
55	0.48	95.54	1.14	0.38	0.09	0.02	0.00	0.81	24.46	72.75	1.60
56	0.57	107.19	1.26	0.45	0.10	0.02	0.00	0.81	27.11	68.27	1.59
57	0.39	89.87	2.25	0.24	0.13	0.01	0.00	0.81	28.58	66.06	1.58
58	1.00	176.03	1.23	0.72	0.25	0.03	0.00	0.81	32.20	61.37	1.61
59	0.82	159.27	1.47	0.55	0.21	0.06	0.00	0.79	35.25	58.03	1.59
60	0.10	45.35	1.66	0.00	0.00	0.10	0.00	0.37	36.29	56.99	0.74
61	0.08	38.86	5.16	0.00	0.00	0.00	0.08	0.38	37.04	56.28	0.75
62	0.13	49.61	4.66	0.00	0.00	0.00	0.13	0.38	38.17	55.24	0.75
63	0.19	65.40	6.59	0.00	0.00	0.00	0.19	0.38	39.39	54.17	0.74
64	0.16	62.97	4.22	0.00	0.00	0.00	0.16	0.38	40.75	53.05	0.74
65	0.09	52.69	3.92	0.00	0.00	0.00	0.09	0.38	1.18	126.54	0.01
66	0.65	135.91	1.59	0.47	0.17	0.01	0.00	0.82	2.72	126.54	0.18
67	0.86	144.35	1.32	0.64	0.19	0.03	0.00	0.81	5.95	126.54	0.42
68	0.63	133.00	1.46	0.45	0.17	0.01	0.00	0.82	2.73	126.54	0.18
69	0.81	140.30	1.28	0.60	0.20	0.01	0.00	0.82	5.95	126.54	0.41
70	0.62	132.19	1.23	0.43	0.17	0.02	0.00	0.81	2.71	126.54	0.17
71	0.78	138.66	1.32	0.57	0.20	0.01	0.00	0.82	5.75	126.54	0.40
72	0.77	154.39	1.08	0.54	0.21	0.02	0.00	0.81	2.89	126.54	0.22
73	0.87	159.33	1.20	0.62	0.24	0.01	0.00	0.82	6.09	126.54	0.47

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 9. Características de las áreas de drenaje, y valores de tiempos de concentración, intensidad y caudal máximo para cada área de la red para la red 8.

Área	A (ha)	Long (m)	Ster (%)	AEdif (ha)	APav (ha)	AVeg (ha)	A2Veg (ha)	Coef Prom	Tc (min)	Intensidad (mm/h)	Q (m ³ /s)
1	0.53	127.08	0.84	0.39	0.13	0.01	0.00	0.82	2.37	126.54	0.15
2	0.41	96.10	0.77	0.31	0.10	0.00	0.00	0.83	7.98	126.54	0.69
3	0.46	110.76	1.58	0.35	0.11	0.01	0.00	0.82	10.69	121.40	0.79
4	0.22	57.82	2.71	0.16	0.07	0.00	0.00	0.82	19.29	84.26	1.95
5	0.43	119.18	2.39	0.31	0.11	0.01	0.00	0.81	21.80	78.11	1.86
6	0.41	119.49	2.77	0.29	0.11	0.02	0.00	0.81	24.26	73.11	2.43
7	0.35	108.02	2.92	0.23	0.10	0.02	0.00	0.79	26.43	69.34	2.32
8	0.16	51.30	2.60	0.11	0.05	0.01	0.00	0.81	27.62	67.48	2.78

9	0.36	109.54	3.23	0.24	0.10	0.02	0.00	0.80	29.76	64.44	2.69
10	0.14	34.39	4.01	0.09	0.05	0.01	0.00	0.81	30.56	63.39	2.67
11	0.57	136.26	1.19	0.41	0.16	0.00	0.00	0.82	32.99	60.45	2.67
12	0.79	139.55	1.38	0.55	0.17	0.07	0.00	0.78	35.57	57.70	2.73
13	0.09	39.42	1.83	0.00	0.00	0.09	0.00	0.37	36.60	56.69	1.27
14	0.08	43.27	2.18	0.00	0.00	0.00	0.08	0.38	37.60	55.75	1.29
15	0.02	12.46	3.36	0.00	0.00	0.00	0.02	0.38	37.94	55.45	1.28
16	0.05	35.16	3.33	0.00	0.00	0.00	0.05	0.38	38.73	54.74	1.27
17	0.07	44.43	2.10	0.00	0.00	0.00	0.07	0.38	39.78	53.84	1.26
18	0.07	47.73	1.64	0.00	0.00	0.07	0.00	0.37	0.97	126.54	0.01
19	0.82	95.74	0.76	0.62	0.17	0.03	0.00	0.81	5.20	126.54	0.41
20	0.74	167.04	0.63	0.57	0.16	0.02	0.00	0.82	3.12	126.54	0.21
21	0.35	58.91	0.83	0.26	0.08	0.01	0.00	0.81	6.82	126.54	1.12
22	0.64	108.95	0.71	0.45	0.13	0.06	0.00	0.78	9.76	126.54	1.27
23	0.44	75.29	0.85	0.32	0.11	0.01	0.00	0.82	11.84	113.98	1.31
24	0.53	73.80	0.71	0.17	0.07	0.29	0.00	0.58	13.83	103.55	0.92
25	0.81	92.93	0.64	0.43	0.16	0.22	0.00	0.70	16.15	94.07	1.17
26	0.63	64.41	0.92	0.45	0.14	0.05	0.00	0.79	17.87	88.35	1.36
27	0.85	99.97	0.68	0.60	0.21	0.04	0.00	0.80	2.07	126.54	0.24
28	0.71	67.02	0.66	0.51	0.16	0.04	0.00	0.80	5.07	126.54	0.81
29	0.19	26.81	0.59	0.12	0.06	0.01	0.00	0.80	3.22	126.54	0.37
30	0.52	120.96	1.08	0.39	0.13	0.00	0.00	0.82	2.16	126.54	0.15
31	0.60	121.30	0.85	0.46	0.12	0.02	0.00	0.81	2.29	126.54	0.17
32	0.79	144.48	0.70	0.59	0.18	0.02	0.00	0.81	3.76	126.54	0.28
33	0.33	44.30	0.90	0.23	0.10	0.01	0.00	0.81	5.20	126.54	0.74
34	0.70	142.27	0.64	0.52	0.16	0.02	0.00	0.81	8.27	126.54	0.94
35	0.61	143.99	0.57	0.45	0.15	0.01	0.00	0.82	11.43	116.48	1.04
36	0.40	80.74	0.96	0.30	0.10	0.00	0.00	0.82	1.63	126.54	0.11
37	0.41	81.47	0.67	0.31	0.09	0.00	0.00	0.83	3.94	126.54	0.23
38	0.49	103.75	0.76	0.35	0.10	0.05	0.00	0.78	6.97	126.54	0.36
39	0.19	29.38	0.57	0.13	0.05	0.01	0.00	0.80	0.85	126.54	0.05
40	0.66	93.99	0.70	0.50	0.13	0.03	0.00	0.80	1.97	126.54	0.19
41	0.72	110.11	0.69	0.53	0.16	0.04	0.00	0.80	4.52	126.54	0.39
42	0.87	135.88	0.85	0.63	0.22	0.01	0.00	0.82	7.32	126.54	0.65
43	0.58	137.63	0.75	0.41	0.16	0.01	0.00	0.82	10.21	124.92	0.80
44	0.15	30.23	0.43	0.09	0.05	0.00	0.00	0.82	11.23	117.74	0.80
45	0.76	146.62	1.08	0.53	0.19	0.04	0.00	0.80	2.50	126.54	0.21
46	0.05	26.90	1.65	0.02	0.03	0.00	0.00	0.79	3.59	126.54	0.22
47	0.74	142.77	1.18	0.57	0.14	0.03	0.00	0.81	6.07	126.54	0.44
74	0.64	124.99	0.79	0.50	0.13	0.01	0.00	0.82	2.38	126.54	0.18

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 10. Cotas de terreno, de rasante, de cobertura y de desnivel entre la tubería y la base del pozo final, para la red 3.

RED	Tramo	De	C.T _{inicial} m	C.R _{inicial} m	COB _{inicial} m	A	C.T _{final} m	C.R _{inicial} m	COB _{final} m	Desnivel m
3.4	70	72	14.55	13.00	1.10	73	14.06	12.49	1.12	0.00
	71	73	14.06	12.49	1.12	54	13.50	11.58	1.47	1.53
3.3	68	70	14.81	13.26	1.10	71	14.27	12.70	1.12	0.00

	69	71	14.27	12.70	1.12	52	13.88	12.03	1.40	1.35
3.2	66	68	14.81	13.26	1.10	69	14.40	12.83	1.12	0.00
	67	69	14.40	12.83	1.12	50	13.93	12.14	1.34	0.99
	64	66	14.86	13.31	1.10	67	14.23	12.73	1.05	0.15
3.1	65	67	14.23	12.58	1.05	48	13.83	12.20	1.03	0.15
	47	48	13.83	12.05	1.03	49	13.98	11.61	1.62	0.07
	48	49	13.98	11.53	1.62	50	13.93	11.37	1.74	0.23
	49	50	13.93	11.14	1.74	51	14.05	10.83	2.17	0.00
	50	51	14.05	10.83	2.17	52	13.88	10.68	2.14	0.00
	51	52	13.88	10.68	2.14	53	13.50	10.35	2.10	0.00
	52	53	13.50	10.35	2.10	54	13.50	10.20	2.25	0.15
	53	54	13.50	10.05	2.25	55	13.55	9.72	2.62	0.20
3	54	55	13.55	9.52	2.82	56	13.37	9.18	2.99	0.20
	55	56	13.37	8.98	3.19	57	12.26	8.81	2.25	0.50
	56	57	12.26	8.31	2.75	58	12.69	8.08	3.41	0.50
	57	58	12.69	7.58	3.91	59	13.10	7.40	4.50	0.50
	58	59	13.10	6.90	5.00	60	11.99	6.67	4.12	0.50
	59	60	11.99	6.17	4.62	61	10.99	6.05	3.75	0.50
	60	61	10.99	5.55	4.25	62	10.16	5.32	3.64	0.50
	61	62	10.16	4.82	4.14	63	7.74	4.41	2.13	0.50
	62	63	7.74	3.91	2.63	64	5.85	3.51	1.14	0.50
	63	64	5.85	3.01	1.64	65	4.26	2.55	0.51	0.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP- 11. Cotas de terreno, de rasante, de cobertura y de desnivel entre la tubería y la base del pozo final, para la red 8.

RED	Tramo	De	C.T.inicial m	C.R.inicial m	COB.inicial m	A	C.T.final m	C.R.inicial m	COB.final m	Desnivel m
8.5	44	45	11.60	10.05	1.10	46	11.38	9.81	1.12	0.00
	45	46	11.38	9.81	1.12	47	11.35	9.76	1.14	0.07
	46	47	11.35	9.68	1.14	12	10.98	9.22	1.23	4.39
8.4	39	40	13.04	11.49	1.10	41	12.73	11.00	1.27	0.23
	40	41	12.73	10.78	1.27	42	12.22	10.48	1.07	0.00
	41	42	12.22	10.48	1.07	43	12.22	10.05	1.50	0.00
	42	43	12.22	10.05	1.50	44	12.16	9.83	1.65	0.00
	43	44	12.16	9.83	1.65	8	11.33	9.49	1.16	2.43
8.3.1	35	36	13.37	11.82	1.10	37	13.15	11.63	1.07	0.07
	36	37	13.15	11.55	1.07	38	13.41	11.14	1.74	0.00
	37	38	13.41	11.14	1.74	33	13.04	10.85	1.67	0.16
8.3	38	39	12.93	11.38	1.10	32	13.09	11.32	1.32	0.00
	31	32	13.09	11.32	1.32	33	13.04	10.99	1.60	0.30
	32	33	13.04	10.69	1.60	34	12.77	10.43	1.60	0.00
	33	34	12.77	10.43	1.60	35	12.52	10.09	1.68	0.00
	34	35	12.52	10.09	1.68	6	11.80	9.90	1.14	1.65
8.2.1.1.b	30	31	13.10	11.55	1.10	29	13.10	11.39	1.26	0.23
8.2.1.1.a	29	30	13.29	11.74	1.10	29	13.10	11.54	1.11	0.38
8.2.1.1	28	29	13.10	11.16	1.26	28	12.97	10.85	1.44	0.15
8.2.1	26	27	12.99	11.44	1.10	28	12.97	11.23	1.28	0.53
	27	28	12.97	10.70	1.44	21	13.40	10.51	2.06	0.23
8.2	19	20	13.50	11.95	1.10	21	13.40	11.60	1.35	1.31
	20	21	13.40	10.29	2.06	22	13.39	9.99	2.35	0.00

	21	22	13.39	9.99	2.35	23	13.61	9.79	2.76	0.00
	22	23	13.61	9.79	2.76	24	13.06	9.65	2.36	0.00
	23	24	13.06	9.65	2.36	25	12.62	9.52	2.05	0.00
	24	25	12.62	9.52	2.05	26	12.48	9.37	2.06	0.00
	25	26	12.48	9.37	2.06	4	11.99	9.27	1.67	0.29
8.1	72	74	12.61	11.06	1.10	19	12.66	10.60	1.61	0.07
	18	19	12.66	10.53	1.61	2	12.05	10.21	1.32	0.30
	1	1	12.24	10.69	1.10	2	12.05	10.19	1.42	0.28
	2	2	12.05	9.91	1.32	3	12.08	9.57	1.68	0.00
	3	3	12.08	9.57	1.68	4	11.99	9.36	1.80	0.38
	4	4	11.99	8.99	1.80	5	12.18	8.62	2.35	0.00
	5	5	12.18	8.62	2.35	6	11.80	8.26	2.34	0.00
	6	6	11.80	8.26	2.34	7	11.78	7.82	2.76	0.20
	7	7	11.78	7.62	2.96	8	11.33	7.41	2.72	0.35
8	8	8	11.33	7.06	2.92	9	11.73	6.68	3.70	0.20
	9	9	11.73	6.48	3.90	10	10.87	6.33	3.19	0.50
	10	10	10.87	5.83	3.69	11	10.61	5.73	3.53	0.20
	11	11	10.61	5.53	3.73	12	10.98	5.33	4.30	0.50
	12	12	10.98	4.83	4.80	13	9.77	4.58	3.84	0.30
	13	13	9.77	4.28	4.14	14	8.47	4.08	3.05	0.30
	14	14	8.47	3.78	3.35	15	7.85	3.73	2.78	0.30
	15	15	7.85	3.43	3.08	16	6.63	3.25	2.03	0.30
	16	16	6.63	2.95	2.33	17	5.33	2.71	1.27	0.30
	17	17	5.33	2.41	1.57	18	4.09	2.14	0.60	0.00

Fuente: Elaboración propia, 2020

Apéndice 4. Diseño en flujo uniforme para la red

Tabla AP - 12. Diseño en flujo uniforme de la subred 3.4.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II}	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D	f
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s	<1	Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s	<0.85	1.1 < f < 0.9
70	0.22	50.10	1.01	0.45	0.41	2.60	0.53	0.23	3.21	0.18	0.08	0.72	0.11	1.16	2.64	0.52	1.96
71	0.47	49.93	1.83	0.45	0.56	3.50	0.84	0.32	3.97	0.29	0.12	0.89	0.13	2.44	3.92	0.70	2.33

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 13. Diseño en flujo uniforme de la subred 3.3.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II}	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D	f
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s	<1	Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s	<0.85	1.1 < f < 0.9
68	0.17	49.45	1.13	0.45	0.44	2.75	0.40	0.20	2.90	0.15	0.07	0.65	0.10	1.16	2.60	0.44	2.14
69	0.40	50.11	1.34	0.45	0.48	3.00	0.84	0.31	3.96	0.29	0.12	0.89	0.13	1.79	3.36	0.70	2.00

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 14. Diseño en flujo uniforme de la subred 3.2.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II}	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D	f
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s	<1	Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s	<0.85	1.1 < f < 0.9
66	0.18	49.84	0.86	0.45	0.38	2.40	0.47	0.22	3.07	0.17	0.08	0.69	0.11	0.94	2.36	0.48	1.84
67	0.41	49.67	1.40	0.45	0.49	3.07	0.84	0.32	3.98	0.29	0.12	0.89	0.13	1.87	3.44	0.70	2.04

Tabla AP - 15. Diseño en flujo uniforme de la subred 3.1.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II}	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D	f
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s	<1	Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s	<0.85	1.1 < f < 0.9
64	0.18	49.51	1.17	0.45	0.45	2.80	0.41	0.20	2.93	0.15	0.07	0.66	0.10	1.22	2.66	0.45	2.17
65	0.42	50.15	0.74	0.60	0.76	2.70	0.56	0.32	3.27	0.26	0.15	0.98	0.16	1.16	2.77	0.53	1.75

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 16. Diseño en flujo uniforme de la red 3.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)					F. ζ	V _{real}	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0	
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s		Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s		
47	0.65	111.58	0.40	0.75	1.02	2.30	0.64	0.44	3.47	0.36	0.27	1.30	0.20	0.82	2.44	0.58	1.30
48	0.70	47.70	0.35	0.83	1.23	2.30	0.57	0.45	3.31	0.36	0.30	1.37	0.22	0.76	2.38	0.54	1.26
49	1.07	112.11	0.28	1.05	2.08	2.40	0.52	0.53	3.18	0.42	0.44	1.67	0.27	0.74	2.42	0.51	1.19
50	1.03	48.72	0.30	1.05	2.16	2.50	0.48	0.51	3.09	0.40	0.42	1.62	0.26	0.78	2.47	0.49	1.25
51	1.37	111.32	0.30	1.05	2.16	2.50	0.64	0.61	3.46	0.50	0.52	1.82	0.29	0.86	2.65	0.58	1.19
52	1.35	48.99	0.30	1.05	2.16	2.50	0.62	0.60	3.43	0.49	0.51	1.80	0.28	0.86	2.64	0.57	1.20
53	1.66	110.86	0.29	1.20	3.05	2.70	0.54	0.63	3.24	0.50	0.60	1.94	0.31	0.91	2.76	0.52	1.24
54	1.60	108.68	0.32	1.20	3.17	2.80	0.51	0.60	3.15	0.48	0.57	1.89	0.30	0.95	2.81	0.50	1.30
55	1.59	53.31	0.32	1.20	3.17	2.80	0.50	0.60	3.15	0.47	0.57	1.89	0.30	0.95	2.80	0.50	1.30
56	1.58	64.22	0.36	1.20	3.39	3.00	0.47	0.58	3.06	0.45	0.54	1.84	0.29	1.06	2.95	0.48	1.41
57	1.61	48.60	0.38	1.20	3.45	3.05	0.47	0.58	3.07	0.45	0.54	1.84	0.29	1.10	3.00	0.48	1.43
58	1.59	52.43	0.44	1.20	3.73	3.30	0.43	0.55	2.97	0.42	0.50	1.78	0.28	1.24	3.17	0.46	1.56
59	0.74	27.44	0.44	1.20	3.73	3.30	0.20	0.36	2.33	0.26	0.29	1.40	0.21	0.90	2.57	0.30	1.61
60	0.75	45.01	0.49	1.20	3.96	3.50	0.19	0.35	2.30	0.26	0.28	1.38	0.20	1.00	2.69	0.30	1.70
61	0.75	64.37	0.65	1.20	4.52	4.00	0.17	0.33	2.21	0.24	0.25	1.32	0.19	1.23	2.96	0.27	1.94
62	0.74	61.23	0.65	1.20	4.52	4.00	0.16	0.33	2.20	0.24	0.25	1.32	0.19	1.23	2.95	0.27	1.94
63	0.74	57.29	0.82	1.20	5.09	4.50	0.15	0.31	2.13	0.22	0.23	1.28	0.18	1.48	3.21	0.26	2.18

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP- 17. Diseño en flujo uniforme de la subred 8.5.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)					F. ζ	V _{real}	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0	
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s		Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s		
44	0.21	49.85	0.48	0.45	0.29	1.80	0.75	0.29	3.73	0.25	0.11	0.84	0.13	0.62	1.97	0.64	1.26
45	0.22	9.49	0.54	0.45	0.30	1.90	0.74	0.29	3.72	0.25	0.11	0.84	0.13	0.69	2.08	0.64	1.33
46	0.44	42.30	1.09	0.53	0.65	2.99	0.68	0.32	3.56	0.27	0.14	0.93	0.15	1.59	3.21	0.60	1.99

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 18. Diseño en flujo uniforme de la subred 8.4.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s		Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s		
39	0.19	49.94	0.97	0.45	0.41	2.55	0.46	0.21	3.05	0.17	0.08	0.69	0.11	1.06	2.50	0.48	1.95
40	0.39	49.36	0.61	0.68	0.95	2.65	0.41	0.30	2.93	0.23	0.15	0.99	0.16	0.95	2.52	0.45	1.68
41	0.65	54.23	0.78	0.68	1.07	3.00	0.60	0.38	3.39	0.31	0.21	1.14	0.18	1.41	3.14	0.56	1.81
42	0.80	21.00	1.06	0.68	1.25	3.50	0.64	0.39	3.47	0.33	0.22	1.17	0.18	1.96	3.72	0.58	2.08
43	0.80	29.66	1.13	0.68	1.29	3.60	0.62	0.38	3.42	0.31	0.21	1.15	0.18	2.05	3.79	0.57	2.16

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 19. Diseño en flujo uniforme de la subred 8.3.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s		Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s		
35	0.11	50.24	0.38	0.45	0.25	1.60	0.45	0.21	3.02	0.16	0.07	0.68	0.11	0.41	1.56	0.47	1.23
36	0.23	103.48	0.40	0.53	0.39	1.82	0.59	0.29	3.35	0.24	0.12	0.88	0.14	0.56	1.89	0.55	1.25
37	0.36	41.38	0.70	0.53	0.52	2.40	0.68	0.32	3.58	0.27	0.14	0.94	0.15	1.03	2.58	0.61	1.59
38	0.05	15.82	0.34	0.45	0.24	1.50	0.22	0.14	2.41	0.10	0.04	0.54	0.08	0.27	1.21	0.32	1.19
31	0.28	50.50	0.66	0.45	0.33	2.10	0.84	0.32	3.97	0.29	0.12	0.89	0.13	0.88	2.35	0.70	1.40
32	0.74	50.15	0.53	0.75	1.17	2.65	0.64	0.43	3.46	0.36	0.26	1.30	0.20	1.08	2.81	0.58	1.50
33	0.94	53.19	0.63	0.75	1.28	2.90	0.74	0.48	3.70	0.41	0.30	1.39	0.21	1.36	3.17	0.64	1.58
34	1.04	29.14	0.63	0.75	1.28	2.90	0.81	0.51	3.89	0.46	0.32	1.46	0.22	1.40	3.23	0.68	1.52

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 20. Diseño en flujo uniforme de la subred 8.2.

Tramo	Q	Long. Tubería	Pend.	D _{escogido}	Q _{II}	V _{II} <5	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)						F. ζ	V _{real}	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0
	m ³ /s	m	%	m	m ³ /s	m/s		Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.	R. H.	kg/m ²	m/s		
30	0.17	31.50	0.51	0.45	0.29	1.85	0.58	0.25	3.33	0.20	0.09	0.75	0.12	0.61	1.92	0.55	1.37
29	0.15	21.92	0.90	0.45	0.39	2.46	0.39	0.19	2.87	0.15	0.07	0.65	0.10	0.92	2.30	0.43	1.91
28	0.37	98.82	0.31	0.68	0.68	1.90	0.54	0.35	3.24	0.28	0.19	1.09	0.17	0.54	1.94	0.52	1.17

26	0.24	36.36	0.57	0.45	0.31	1.95	0.77	0.30	3.79	0.26	0.11	0.85	0.13	0.74	2.15	0.66	1.34
27	0.81	58.87	0.32	0.83	1.18	2.20	0.69	0.50	3.58	0.42	0.34	1.48	0.23	0.74	2.37	0.61	1.16
19	0.21	53.49	0.66	0.45	0.33	2.10	0.64	0.26	3.47	0.22	0.10	0.78	0.12	0.81	2.23	0.58	1.53
20	1.12	107.13	0.28	1.05	2.08	2.40	0.54	0.55	3.24	0.44	0.46	1.70	0.27	0.75	2.45	0.52	1.18
21	1.27	70.72	0.28	1.05	2.08	2.40	0.61	0.59	3.40	0.48	0.50	1.78	0.28	0.78	2.52	0.56	1.16
22	1.31	51.10	0.28	1.05	2.08	2.40	0.63	0.60	3.44	0.50	0.52	1.81	0.29	0.79	2.54	0.58	1.15
23	0.92	48.06	0.28	1.05	2.08	2.40	0.44	0.49	3.01	0.38	0.40	1.58	0.25	0.70	2.33	0.47	1.21
24	1.17	49.55	0.29	1.05	2.12	2.45	0.55	0.56	3.26	0.45	0.47	1.71	0.27	0.79	2.51	0.53	1.20
25	1.36	35.69	0.29	1.05	2.12	2.45	0.64	0.61	3.48	0.51	0.52	1.83	0.29	0.83	2.60	0.58	1.17

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 21. Diseño en flujo uniforme de la subred 8.1.

Tramo	Q m ³ /s	Long. Tubería m	Pend. %	D _{escogido} m	Q _{II} m ³ /s	V _{II} <5 m/s	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)					F. ζ kg/m ²	V _{real} m/s	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0.9	
								Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.					R. H.
72	0.18	93.48	0.48	0.45	0.29	1.80	0.64	0.26	3.47	0.22	0.10	0.78	0.12	0.59	1.91	0.58	1.31
18	0.41	49.81	0.64	0.53	0.50	2.30	0.83	0.37	3.95	0.33	0.16	1.04	0.16	1.00	2.57	0.70	1.42

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla AP - 22. Diseño en flujo uniforme de la red 8.

Tramo	Q m ³ /s	Long. Tubería m	Pend. %	D _{escogido} m	Q _{II} m ³ /s	V _{II} <5 m/s	Q/Q _{II} <1	Propiedades Hidráulicas (m)					F. ζ kg/m ²	V _{real} m/s	Y/D <0.85	$\frac{f}{9}$ 1.1 < f < 0.9	
								Y	Ang. θ°	P. H.	A. H.	Per.					R. H.
1	0.15	93.26	0.54	0.45	0.30	1.90	0.50	0.23	3.15	0.18	0.08	0.71	0.11	0.61	1.90	0.50	1.44
2	0.69	111.01	0.31	0.83	1.15	2.15	0.60	0.46	3.39	0.38	0.31	1.40	0.22	0.68	2.25	0.56	1.17
3	0.79	57.93	0.36	0.83	1.24	2.32	0.64	0.48	3.46	0.39	0.32	1.43	0.22	0.80	2.46	0.58	1.25
4	1.95	119.24	0.31	1.20	3.11	2.75	0.63	0.69	3.44	0.56	0.67	2.06	0.33	0.99	2.90	0.57	1.23
5	1.86	119.52	0.31	1.20	3.11	2.75	0.60	0.67	3.37	0.54	0.65	2.02	0.32	0.98	2.87	0.56	1.24
6	2.43	108.89	0.40	1.20	3.56	3.15	0.68	0.73	3.57	0.61	0.72	2.14	0.33	1.34	3.39	0.61	1.38
7	2.32	50.52	0.41	1.20	3.62	3.20	0.64	0.70	3.47	0.58	0.68	2.08	0.33	1.35	3.40	0.58	1.43
8	2.78	108.97	0.35	1.35	4.58	3.20	0.61	0.76	3.39	0.62	0.83	2.29	0.36	1.28	3.35	0.56	1.36
9	2.69	36.74	0.40	1.35	4.87	3.40	0.55	0.72	3.27	0.57	0.77	2.20	0.35	1.40	3.49	0.53	1.47
10	2.67	24.95	0.42	1.35	5.01	3.50	0.53	0.70	3.22	0.56	0.75	2.17	0.35	1.46	3.56	0.52	1.52
11	2.67	56.68	0.35	1.35	4.58	3.20	0.58	0.74	3.34	0.60	0.80	2.25	0.36	1.26	3.32	0.55	1.37

12	2.73	49.37	0.50	1.35	5.44	3.80	0.50	0.68	3.15	0.53	0.72	2.12	0.34	1.68	3.80	0.50	1.67
13	1.27	36.82	0.55	1.35	5.73	4.00	0.22	0.43	2.41	0.31	0.40	1.62	0.24	1.34	3.22	0.32	1.83
14	1.29	9.36	0.55	1.35	5.73	4.00	0.23	0.44	2.42	0.32	0.40	1.63	0.24	1.35	3.23	0.32	1.83
15	1.28	31.87	0.55	1.35	5.73	4.00	0.22	0.43	2.41	0.32	0.40	1.63	0.24	1.35	3.22	0.32	1.83
16	1.27	43.68	0.55	1.35	5.73	4.00	0.22	0.43	2.40	0.31	0.39	1.62	0.24	1.34	3.22	0.32	1.83
17	1.26	45.01	0.59	1.35	5.94	4.15	0.21	0.42	2.37	0.31	0.38	1.60	0.24	1.42	3.29	0.31	1.90

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Anexos

A continuación, se presenta la lista de anexos adjuntos en el documento, seguido de cada uno de ellos correspondientemente.

- I. Levantamiento topográfico de la localidad de Juanito Mora, facilitado por la Municipalidad de Puntarenas. Archivo dwg.
- II. Coeficiente "KN" para datos dudosos.
- III. Fórmulas de distribuciones de probabilidad.
- IV. Valores críticos para la prueba Smirnov – Kolmogorov.
- V. Coeficientes de duración para precipitaciones de 24 horas.
- VI. Matrices de selección para SUDS.

Anexo 1. Levantamiento topográfico.



Levantamiento_JM.
dwg

Anexo 2. Coeficiente “KN” para datos dudosos.

Tabla A - 1. Coeficiente “KN” para datos dudosos.

Tamaño de muestra n	Valor de Kn						
10	2.04	24	2.47	38	2.66	60	2.84
11	2.09	25	2.49	39	2.67	65	2.87
12	2.13	26	2.5	40	2.68	70	2.89
13	2.18	27	2.52	41	2.69	75	2.92
14	2.21	28	2.53	42	2.7	80	2.94
15	2.25	29	2.55	43	2.71	85	2.96
16	2.28	30	2.56	44	2.72	90	2.98
17	2.31	31	2.58	45	2.73	95	3
18	2.34	32	2.59	46	2.74	100	3.11
19	2.361	33	2.6	47	2.74	110	3.05
20	2.39	34	2.62	48	2.75	120	3.08
21	2.41	35	2.63	49	2.76	130	3.1
22	2.43	36	2.64	50	2.77	140	3.13
23	2.25	37	2.65	55	2.8	-	-

Fuente: (USWRC, 1981).

Anexo 3. Fórmulas de distribuciones de probabilidad.

Tabla A - 2. Distribuciones de probabilidad.

Distribución	Fórmula	Parámetros
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{X}}{S} \right)^2 \right]$ Ec. 32	donde: $f(x)$ = función densidad normal de la variable x x = variable independiente \bar{X} = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x EXP = función exponencial con base e , de los logaritmos neperianos.
Log normal 2 parámetros	$ff(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2}$ Para $0 < x < \infty$ Ec. 33	Donde μ_y , σ_y , son la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de x , es decir de $\ln x$, y representan respectivamente, el parámetro de escala y el parámetro de forma de la distribución.
Log normal 3 parámetros	$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2}$ Ec. 34	donde: x_0 : parámetro de posición en el dominio x μ_y : parámetro de escala en el dominio x σ_y : parámetro de forma en el dominio x
Gamma 2 parámetros	$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \tau(\gamma)}$ Ec. 35	siendo: γ = parámetro de forma (+) β = parámetro de escala (+) $\Gamma(\gamma)$ = función gamma completa, definida como: $\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} x^{\gamma-1} e^{-x} dx$ que converge si $\gamma > 0$
Gamma 3 parámetros	$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \tau(\gamma)}$ Ec. 36	x = variable aleatoria gamma de 3 parámetros o Pearson tipo III x_0 = origen de la variable x , parámetro de posición β = parámetro de escala γ = parámetro de forma $\Gamma(\gamma)$ = función gamma completa
Log Pearson tipo III	$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x \beta^{\gamma} \tau(\gamma)}$ Ec. 37	x_0 = parámetro de posición β = parámetro de escala γ = parámetro de forma
Gumbel	$f(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}}$ Ec. 38	donde: $0 < \alpha < \infty$, es el parámetro de escala $-\infty < \mu < \infty$, es el parámetro de posición, llamado también valor central o moda
Log Gumbel	$G(y) = \text{EXP}(-\text{EXP}(-y)) = e^{-e^{-y}}$ Ec. 39	donde: $0 < \alpha < \infty$, es el parámetro de escala $-\infty < \mu < \infty$, es el parámetro de posición, llamado también valor central o moda

Fuente: (Villón, Hidroesta 2: Cálculos Hidrológicos, 2012)

Anexo 4. Valores críticos de Smirnov – Kolmogorov.

Tabla A - 3. Valores de Smirnov – Kolmogorov para diversos niveles de significancia y de muestra.

Tamaño muestral N	Nivel de significancia α				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
n>35	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: (Villón, Hidrología Estadística, 2006).

Anexo 5. Coeficientes de duración.

Tabla A - 4. Coeficientes de duración para precipitaciones de 24 horas.

Duraciones (hr)									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Fuente: (Campos, Procesos del Ciclo Hidrológico, 1998).

Anexo 6. Matrices de selección para SUDS.

Tabla A - 5. Matriz de selección en función de las características físicas del lugar.

Grupo SUDS	Técnica	Suelo		Área de drenaje para cada técnica independiente		Profundidad del nivel freático		Pendiente		Carga hidráulica		Espacio disponible	
		Permeable	Impermeable	0-2 ha	> 2ha	0-1 ha	>1m	0-5 %	>5%	0-1 m	1-2 m	Poco	Elevado
Retención	Estanque de retención	Sí	Sí*	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Almacenamiento subsuperficial	Sí	Sí	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Humedal	Humedal poco profundo	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque de detención extendido	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque/ Humedal	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal pequeño	Sí*	Sí*	No	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
	Humedales con gravas sumergidas	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal en canal	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
Infiltración	Zanjas de infiltración	No	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
	Estanques de infiltración	No	Sí	Sí	NR	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
	Pozos de infiltración	No	Sí	Sí	NR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Filtración	Filtros de arena superficiales	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	No	Sí	No	Sí
	Filtros de arena subsuperficiales	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
	Filtros de arena perimetrales	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
	Biorretención	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
	Zanjas filtrantes	Sí	Sí*	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Detención	Estanques de detención	Sí	Sí*	Sí	NR	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí
Canales abiertos	Cunetas	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
	Cunetas secas	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
	Cunetas húmedas	Sí*	Sí*	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No**	Sí	No	No	Sí
Control en fuente	Techo Verde	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Recolección de agua de precipitación	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	-	-	-
	Pavimento permeable	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: (Woods Ballard, y otros, 2007).

*: Requiere de alguna instalación adicional o condición determinada para su correcto funcionamiento.

** : A menos que siga la pendiente natural del terreno que alcanza ese valor.

NR: Posible, pero no recomendable.

Tabla A - 6. Matriz de selección en función del uso del suelo.

Grupo SUDS	Técnica	Baja densidad	Zona Residencial	Carreteras locales	Zona comercial	Zonas en construcción	Zonas industriales
Retención	Estanque de retención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Almacenamiento subsuperficial	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Humedal	Humedal poco profundo	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque de detención extendido	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanque/Humedal	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal pequeño	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedales con gravas sumergidas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Humedal en canal	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Infiltración	Zanjas de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Estanques de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Pozos de infiltración	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Filtración	Filtros de arena superficiales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Filtros de arena subsuperficiales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Filtros de arena perimetrales	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí
	Biorretención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Zanjas filtrantes	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Detención	Estanques de detención	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Canales abiertos	Cunetas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Cunetas secas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Cunetas húmedas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Control en fuente	Techo verde	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Recolección de agua de precipitación	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Pavimento permeable	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí

Fuente: (Woods Ballard, y otros, 2007).

Tabla A - 7. Matriz en función del rendimiento de control de cantidad y calidad del agua.

Grupo SUDS	Técnica	Tratamiento potencial de la calidad del agua					Control hidráulico			
		Eliminación de los sólidos suspendidos totales	Eliminación de metales pesados	Eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno)	Eliminación de microorganismos	Capacidad para eliminar sólidos disueltos y en suspensión	Reducción del volumen de escorrentía	Idoneidad del control para tormentas de diferente período de retorno		
								0,5 años	10-30 años	100 años
Retención	Estanque de retención	A	M	M	M	A	B	A	A	A
	Almacenamiento subsuperficial	B	B	B	B	B	B	A	A	A
Humedal	Humedal poco profundo	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Estanque de detención extendido	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Estanque/Humedal	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedal pequeño	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedales con gravas sumergidas	A	M	A	M	A	B	A	M	B
	Humedal en canal	A	M	A	M	A	B	A	M	B
Infiltración	Zanjas de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	B
	Estanques de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	A
	Pozos de infiltración	A	A	A	M	A	A	A	A	B
Filtración	Filtros de arena superficiales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Filtros de arena subsuperficiales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Filtros de arena perimetrales	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Biorretención	A	A	A	M	A	B	A	M	B
	Zanjas filtrantes	A	A	A	M	A	B	A	A	B
Detención	Estanques de detención	M	M	B	B	B	B	A	A	A
Canales abiertos	Cunetas	A	A	A	M	A	M	A	A	A
	Cunetas húmedas	A	A	M	A	A	B	A	A	A
	Cunetas secas	A	A	A	M	A	M	A	A	A
Control en fuente	Techo verde	S/A	S/A	S/A	S/A	A	A	A	A	B
	Recolección de agua de precipitación	M	B	B	B	S/A	M	M	A	B
	Pavimento permeable	A	A	A	A	A	A	A	A	B

Fuente: (Woods Ballard, y otros, 2007).

A: Alto potencial

M: Medio potencial

B: Bajo potencial

S/A: Sin aplicación

Tabla A - 8. Matriz de selección en función de factores ambientales y sociales.

Grupo SUDS	Técnica	Mantenimiento	Aceptación de la comunidad	Coste	Potencial de creación de hábitats
Retención	Estanque de retención	M	A	M	A
	Almacenamiento	B	A	M	B
Humedal	Humedal poco profundo	A	A	A	A
	Estanque de detención	A	A	A	A
	Estanque/ Humedal	A	A	A	A
	Humedal pequeño	A	M	A	A
	Humedales con gravas	M	B	A	M
	Humedal en canal	A	A	A	A
Infiltración	Zanjas de infiltración	B	M	B	B
	Estanques de infiltración	M	A	B	M
	Pozos de infiltración	B	M	M	B
Filtración	Filtros de arena	M	B	A	M
	Filtros de arena	M	B	A	M
	Filtros de arena	M	B	A	M
	Biorretención	A	A	M	A
	Zanjas filtrantes	M	M	M	B
Detención	Estanques de detención	B	A	B	M
Canales abiertos	Cunetas	B	M	M	M
	Cunetas húmedas	M	M	M	A
	Cunetas secas	B	M	M	M
Control en fuente	Techo verde	A	A	A	A
	Recolección de agua de	A	M	A	B
	Pavimento permeable	M	M	M	B

Fuente: (Woods Ballard, y otros, 2007).

A: Alto potencial

M: Medio potencial

B: Bajo potencial

S/A: Sin aplicación

Bibliografía

- MSC Agua. (2020). *Aguas pluviales*. Obtenido de <http://www.msc-agua.com/aguas-pluviales>
- USEPA. (2004). *Stormwater Best Management Practice Design Guide EPA/600/R-04/121*. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C.: Office of Research and Development.
- Abellán García, A. (2013). *Sistemas de drenaje urbano sostenible: Aplicación práctica a un tramo de la diagonal de Barcelona*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Abellán, A., Martín, L., & Otaño, J. (2020). *Guía técnica para el diseño de SUDS en el AMSS*. Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Agredo, G. (2013). *La cuenca urbana como unidad territorial para la planificación del desarrollo sostenible en ciudades de media montaña del trópico andino*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Aparicio, M. (2006). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Editorial Limusa.
- Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R., Heidarzadeh, H., & Mahabadi, N. A. (2020). Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Autodesk. (2017). *Storm and Sanitary Analysis User Guide*.
- AyA. (2017). *Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José.
- Bárcena Pasamontes, A. (2017). *Propuesta de diseño de un paquete de tejado verde para un edificio de Barcelona*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Bell, F. (1969). Generalized Rainfall-duration-frequency relationships. *Journal Of Hyd Div*, Vol. 95.
- Bernard, M. (1932). Formulas for rainfall intensities of long durations. *ASCE*, Vol. 95.
- BID. (2016). *Plan de Acción San Jose Capital: de la Acción Local a la Sostenibilidad Metropolitana*. San Jose.
- Brown, S., Schall, J., Morris, J., Doherty, C., Stein, S., & Warner, J. (2009). *Urban Drainage Design Manual. Hydraulic Engineering Circular 22*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Calabuig Belda, A. (2016). *Desarrollo de un modelo matemático de cubierta vegetada en la universidad de bolonia y aplicación a un caso real con tecnologías de drenaje sostenible*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Camacho, M. (2018). *Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en el comportamiento hidrológico de un techo verde extensivo*. San Jose: Universidad de Costa Rica.
- Campos, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosi: Editorial Universitaria Potosina.
- Campos, D. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana*. San Luis Potosi: Editorial Universitaria Potosina.
- Carvalho Aceves, M., & Fuamba, M. (2016). *Methodology for Selecting Best*

- Management Practices Integrating Multiple Stakeholders and Criteria. Part 2: Case Study. *Water*, 8(2).
- CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-opportunidad-america-latina-caribe>
- Chapra, S. (1997). *Surface water-quality modeling*. New York: McGraw-Hill.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogota: McGraw-Hill.
- CNPU. (2018). *Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018 - 2030*. Obtenido de Consejo Nacional de Planificación Urbana: <https://www.mivah.go.cr/PNDU.shtml>
- CONAGUA, C. n. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Obtenido de Alcantarillado Pluvial: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/01AlcantarilladoPluvial.pdf>
- CRRH-IMN. (2008). *Clima, Variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. 75p.
- DesInventar. (2019). *DesInventar*. (C. OSSO, Productor) Obtenido de Inventario histórico de desastres: Base de datos Costa Rica: <https://www.desinventar.org/es/database>
- DiGiano, F. D. (1977). *Short Course Proceedings – Applications of Stormwater Management Models*. 1976. Cincinnati,.
- Espildora, B. (1971). *Estimacion de curvas de Intensidad-Duracion-Frecuencia mediante coeficientes generalizados*. Santiago: Sociedad Chilena de Ingenieria Hidraulica.
- García Haba, E. (2011). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: Aplicación en climas mediterráneos*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gironás, J., Roesner, L., & Davis, J. (2009). *STORM WATER MANAGEMENT MODEL*. Cincinnati,.
- Gomez, M. (2007). *Perdidas de precipitación y transformación lluvia-caudal en SWMM 5.0*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Goswami, A. (1973). *Short duration rainfall depth-duration-frequency map of India*. Colorado: Waters Resources Publication.
- INDER. (2015). *Caracterización del territorio: Puntarenas, Montes de Oro, Monteverde*. Obtenido de Instituto de Desarrollo Rural: <https://www.inder.go.cr/terpumm/Caracterizacion-Puntarenas-Montes-de-Oro-Monte-Verde.pdf>
- INVU. (2020). *Reglamento de Fraccionamiento y Urbanizaciones*. Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo, San José.
- Liang, C., Zhang, X., Xia, J., & She, D. (2020). The Effect of Sponge City Construction for Reducing Directly Connected Impervious Areas on Hydrological Responses at the Urban Catchment Scale. *Advances of Low Impact Development Practices in Urban Watershed*.
- López, R. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Macor, J. (Abril-Junio de 2002). Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo RUNOFF-SWMM. *Ingeniería hidráulica en México*, XVII(2), 17-26.
- Mah, D., Putuhena, F., & Rosli, N. (2016). Environmental Technology: Potential of Merging Road Pavement with Stormwater Detention. *Journal of Applied Science & Process Engineering*. doi:10.33736/jaspe.155.2014
- MIDEPLAN. (2019). *Plan nacional de desarrollo y de inversión pública del bicentenario 2019-2022*. Obtenido de Ministerio de Planificación Nacional y Política

- Económica:
https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/ka113rCgRbC_BylVRHGgrA
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <http://ods.cr/17-objetivos-de-desarrollo-sostenible>
- MIVAH. (2014). *Política Nacional de Vivienda y Asentamientos Humanos 2013 a 2030 y su Plan de Acción*. Obtenido de Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos: https://www.mivah.go.cr/Documentos/politicas_directrices_planes/PNVAH_2013-2030.pdf
- MIVAH. (2018). *Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030 y su Plan de Acción 2018-2022*. Obtenido de Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos: https://www.mivah.go.cr/Biblioteca_Politicas_Politica_y_Plan_Nacional_Desarrollo_Urbano.shtml
- Montalvo, A. (2014). Analisis experimental de un techo verde en Costa Rica. *Proyecto de Graduacion*. San Jose: Universidad de Costa Rica.
- Nelson Ulloa, J. (2016). *Techos con plantas reducen el calor y embellecen el paisaje*. Obtenido de <https://www.nacion.com/el-mundo/interes-humano/techos-con-plantas-reducen-el-calor-y-embellecen-el-paisaje/GCSTAZ6NRJEA3C6MRCC27NIUO4/story/>
- Ortiz, E. (2014). *Atlas de Costa Rica 2014*. Instituto tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería forestal, Cartago.
- Otaño, J. (2018). *Los SuDS, regeneradores urbanos en entornos vulnerables: El caso de Bella Vista, República Dominicana*. Trabajo fin de grado, Universidad politécnica de Madrid.
- Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361-368.
- Perales Momparker, S., & Doménech, I. (2008). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. *Técnica de Medio Ambiente*, 22(124), 92-104.
- PNUD. (2017). *Agenda 2030, 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de
- PNUMA. (2014). *Infraestructuras verdes: Guía para el manejo del agua con un enfoque ecosistémico*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: <https://www.unenvironment.org/resources/publication/green-infrastructure-guide-water-management>
- Productor Agropecuario. (Julio de 2016). *¿Se puede tener un jardín en el techo?* Obtenido de <https://revistaproagro.com/se-puede-tener-un-jardin-en-el-techo/>
- Qin, H.-P., Li, Z.-X., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585.
- Randall, M., Sun, F., Zhang, Y., & Jensen, M. B. (2019). Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM. *Journal of Environmental Management*, 246, 745-757.
- Redondo, R. (2019). *Curso online: Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible y Gestión Integral de Aguas Pluviales*. (Academia INGNova) Obtenido de <https://academia.ingnova.es/>
- Rodríguez Arbelo, A. M. (2017). *S.U.D.S. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Hacia una gestión del ciclo urbano del agua*. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, J. G.-U. (2009). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible. SUDS*. Universidad de Cantabria. Santander: Grupo de investigación de Tecnología de la Construcción.
- Rossmann, L. (2015). *Stormwater Management Model Users Manual Version 5.1*. Cincinnati, United States of America: Environmental Protection Agency of United States of America.

- Rossmann, L., & Huber, W. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual* (Vols. I-Hydrology). Cincinnati, United States of America: United States Environmental Protection Agency.
- Saltelli, A. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *PubMed*, 579-590.
- Serrano, A. (2017). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible*. San Jose: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.
- TARMAC. (2020). *Topmix Permeable: Fast Draining Concrete*. Obtenido de <http://www.tarmac.com/solutions/readymix/topmix-permeable/>
- Temprano, J., Arango, O., Cagiao, J., Suarez, J., & Tejero, I. (2006). *Stormwater quality calibration by SWMM: a case of study in Northern Spain*. Spain: Water SA.
- Umaña, B. (2018). *Diagnostico y propuesta de soluciones en la red de alcantarillado pluvial del campus central del Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Uni-Bell PVC Pipe Association. (2001). *The Handbook of PVC Pipe: Design and Construction*. Dallas: Uni-Bell PVC Pipe Association.
- USEPA. (2016). *Soak Up the Rain: Green Infrastructure Poster*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/soakuptherain/soak-rain-green-infrastructure-poster>
- USWRC. (1981). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. United States Water Resources Council. Washington, D.C.: Hydrology Committee Bulletin.
- Vahrson, W., & Alfaro, M. (1992). *Intensidades Máximas para Costa Rica: principales centros urbanos*. San Jose.
- Vaillancourt, C., Duchesne, S., & Pelletier, G. (2019). Hydrologic Performance of Permeable Pavement as an Adaptive Measure in Urban Areas: Case Studies near Montreal, Canada. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(8).
- Versini, P.-A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., & Schertzer, D. (2015). Performance of Green roof in stormwater management regarding high-resolution precipitation fields. *Urban Drainage Modelling*. Mont-Saint-Anne, Canada.
- Villón, M. (2004). *Hidrologia*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2006). *Hidrologia Estadística*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2012). *Hidroesta 2: Cálculos Hidrológicos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago: Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDMB).
- Wanielista, P. (1990). *Hydrology and Water Quality Control*. New York: John Wiley and Sons.
- Woods Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SuDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA.