

**Estudios y avances Ingenieriles basados en el Drenaje Superficial: Contribuciones
Significativas a la Gestión Sostenible del Agua**

Autor

Hawar Alexis Gaucha Sandoval

Monografía para Optar Título de Ingeniero Civil

Tutora

Alba Yajaira Sánchez

Msc en Ingeniería con Énfasis en Transporte

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería Civil

Pamplona, Norte de Santander

Febrero, 2024

Índice

Introducción	6
Capítulo 1. Programas computacionales de modelación, para predicción y mitigación de inundaciones	8
Estudio Hidrodinámico Distribuido Para Procesos Hidrológicos e Hidráulicos de Inundaciones Urbanas	8
Simulación Hidrológica de Sistemas de Drenaje con SWMM	14
Modelamiento hidrológico en HEC HMS para analizar eventos de inundaciones.	18
Análisis global de los estudios e investigaciones basadas en los programas computacionales utilizados para la predicción y mitigación de inundaciones.	22
Capítulo 2. Estudios y Avances Basados en Infraestructuras Para la Gestión de Flujo Hídrico Superficial.....	24
Estudios y Avances de Pavimentos Permeables.....	24
Estudio Integral de Infraestructuras de Drenaje	28
Análisis Global de Estudios y Avances Basados en Infraestructuras Para la Gestión de Flujo Hídrico Superficial.....	37
Capítulo 3. Enfoques Naturales como Drenajes Superficiales para Mitigar y Gestionar Inundaciones	39
Estrategias Innovadoras de Drenaje Superficial Mediante la Adopción SUDS.....	39
Ciudades Esponjas como Estrategias Innovadoras para una Gestión Sostenible del Agua Urbana	44

Análisis Global de los Estudios e Investigaciones Basadas en los Enfoques Naturales como Drenajes superficiales	46
Capítulo 4. Discusión Global de Estudios y avances Ingenieriles basados en el Drenaje Superficial: Contribuciones Significativas a la Gestión Sostenible del Agua	47
Conclusiones	49
Referencias Bibliografías	51

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Datos del terreno, uso del suelo de cuenca y tuberías de drenaje.	9
Ilustración 2. Altura del agua durante el periodo de mayor flujo con drenaje por método de capacidad promedio. B método propuesto (HD).. C Diferencia entre métodos	10
Ilustración 3. Posición geográfica, área de investigación y uso de cobertura.	12
Ilustración 4. Variaciones del uso de los suelos y modelo de elevación digital del área de estudio	12
Ilustración 5. Configuración del terreno en las ubicaciones donde se realiza el monitoreo a nivel del agua.	13
Ilustración 6. Zonas modeladas junto las descargas de cuenca.	15
Ilustración 7. Red colapsada de acuerdo a simulación en SWMM.....	17
Ilustración 8. Red corregida.....	18
Ilustración 9. Mapa de inundaciones a un periodo de retorno de 10.000 años.....	20
Ilustración 10 Área de estudio municipio de San Gil	21
Ilustración 11. Diseño final de sección de cunetas	22
Ilustración 12. Disposición estándar de Una estructura de pavimento permeable.	24
Ilustración 13. Evaluación de como diversas configuraciones del pavimento impactan en el proceso de drenaje.	26
Ilustración 14. Imagen de límites entre las partículas de agregados para distintas distribuciones de tamaños.....	27
Ilustración 15. Mapas de dirección de drenaje con rutas claras.....	31
Ilustración 16. Comparación entre la red de canal fluvial CAMREX (representada por líneas continuas) y la red de canal HYDRO1k (indicada por líneas discontinuas)	32

Ilustración 17. Dimensionamiento propuesto para sección transversal del canal.....	34
Ilustración 18. Diseño Software H canales Tramo 1.....	36
Ilustración 19. Cuneta de infiltración y estanques de contención.....	40
Ilustración 20. ubicación de cuneta de infiltración y estanques de contencion.....	41
Ilustración 21. Implementación de Alcorques	42
Ilustración 22. Diseño de pavimento poroso	43
Ilustración 23. Zona a aplicar alcorques inundables	44

Introducción

La comprensión detallada de cómo se distribuye el agua en una cuenca, especialmente aquella que proviene de eventos de lluvia, es esencial en las investigaciones hidrológicas. El objetivo principal de estas investigaciones es cuantificar la cantidad de lluvia que se distribuye a lo largo de la superficie terrestre. Esta tarea cobra una gran relevancia durante eventos climáticos extremos, ya que pueden tener impactos significativos en la administración del agua.(Fischer et al., 2022).

En este contexto, la administración efectiva de los recursos hídricos y la anticipación y reducción de los impactos ambientales. Son áreas cruciales en el ámbito ingenieril y la planificación de zonas urbanas, resaltando la importancia de la modelación hidrológica, la cual desempeña un papel fundamental para comprender adecuadamente los cauces de agua, brindando la oportunidad de evaluar las condiciones hidrológicas, simular diferentes escenarios y considerar factores externos.

De acuerdo a estos eventos producidos a través de los años se han producido investigaciones y estudios en donde se permitan obtener soluciones, como tácticas innovadoras para abordar desafíos asociados con el manejo del agua para sistemas de drenajes superficiales, el cual juegan un papel esencial al proporcionar soluciones específicas para la gestión y el control de flujos, brindando soluciones como sistemas de drenaje urbanos sostenibles con la oportunidad de integrar buenas prácticas con el medio ambiente y la buena ambientación paisajística de las zonas en donde son implementados, siendo integrados junto a las soluciones de infraestructuras de drenaje superficial para garantizar un entorno funcional y sostenible, ayudando con problemas de inundación, erosión o deterioros de las infraestructuras.

La monografía está organizada en cuatro secciones principales, con el propósito de explorar y analizar los estudios e investigaciones relacionados con el tema de drenajes superficiales. El primer capítulo tiene como objetivo establecer la importancia de los estudios previos antes de la construcción o sección de una obra de drenaje. En este capítulo, se abordan los avances y estudios en el campo de la hidrología, con un enfoque comparativo entre los avances encontrados en Latinoamérica y otras regiones. La segunda sección se centra en presentar nuevas alternativas para la implementación de la gestión hídrica, considerando especialmente la envergadura de una administración sostenible del agua. Se exploran en detalle diversas estrategias y enfoques que buscan mejorar la eficiencia y la sustentabilidad en la gestión de los recursos hídricos. En el tercer capítulo se examinan las diferentes obras de drenaje utilizadas en estudios y proyectos relacionados. Se analizan las características, ventajas y desventajas de diversas infraestructuras de drenaje, con el propósito de ofrecer una perspectiva de las opciones disponibles y sus aplicaciones prácticas. Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta un punto de vista global y un análisis integral de todos los temas abordados en la monografía. Se sintetizan las conclusiones clave, se analizan las consecuencias de los descubrimientos y se plantean posibles áreas para futuras investigaciones y desarrollo en el campo de los drenajes superficiales.

Capítulo 1. Programas computacionales de modelación, para predicción y mitigación de inundaciones

Estudio Hidrodinámico Distribuido Para Procesos Hidrológicos e Hidráulicos de Inundaciones Urbanas

Hoy en día, la simulación efectiva de inundaciones urbanas es representada como un desafío significativo, debido a que en su mayoría de situaciones los datos de las redes de tuberías son limitados o en su mayoría escasos. Es por tal razón en donde se identifica la necesidad de desarrollar soluciones eficientes que contribuyen a gestionar los peligros derivados de las inundaciones en áreas urbanas.

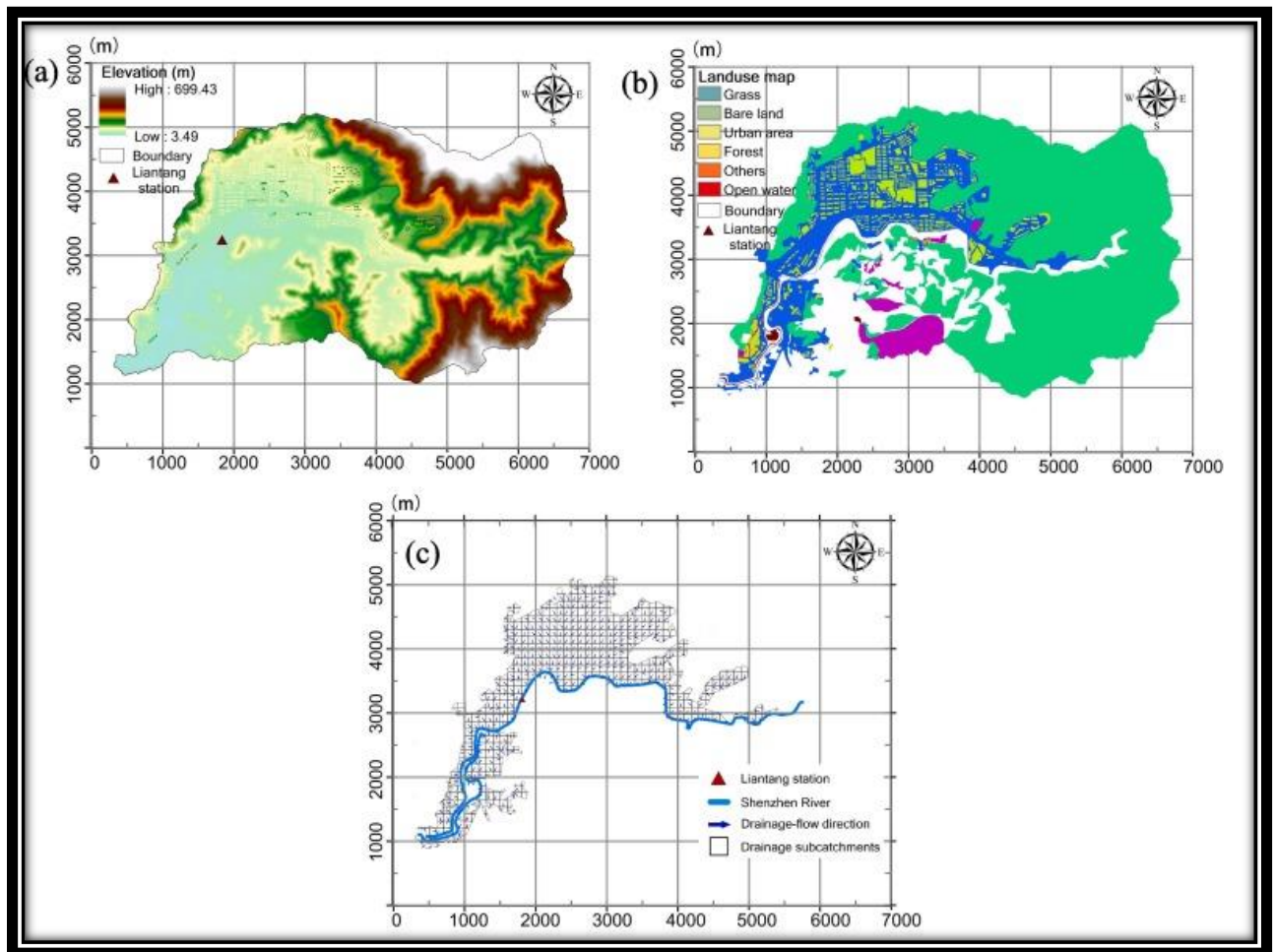
Las inundaciones en los entornos urbanos están aumentando con frecuencia y gravedad, atribuibles al cambio climático que hoy en día se está sometiendo el mundo y al crecimiento de las áreas que cada vez están más urbanizadas (Arias et al., 2021). Es por esto que este incremento conlleva típicamente a la sucesión acelerada de transformación en el uso y la capa del suelo dando como resultado el aumento de volúmenes de caudales al momento de presentarse los eventos de lluvia, contribuyendo esto a la disminución de tiempo para alcanzar caudales pico, mayor frecuencia a inundaciones y sumándole la gravedad a estos eventos (Shao et al., 2020)

Guo et al., (2023) plantea el estudio un modelo hidrodinámico en el cual se integran los procesos hidrológicos e hidráulicos donde se tiene en cuenta los eventos de inundaciones urbanas, en donde se presentan tres enfoques para medir las descargas que presentan los drenajes y el retardo en el tiempo, teniendo en cuenta la hidrología y las inundaciones que se presentan en la superficie de la zona estudiada, esto siendo simulados y estudiados mediante algoritmos y sistemas inteligentes de computación que permitan aplicar modelamientos en situaciones

correspondientes al mundo. Un método paralelo directo utilizando OpenMPI de manera sencilla, proponiendo esta simulación en la cuenca del Río Shenzhen abarcando áreas rurales y urbanas, como se muestra en ilustración 1 la zona de estudio y los datos a necesitar para hacer el respectivo análisis.

Es por esto, que para la presente investigación se tuvo en cuenta tres aspectos fundamentales incorporando en ellos, la perspectiva hidrológica, la capacidad de desagüe y la planificación de los sistemas de tuberías (Xu et al., 2023)

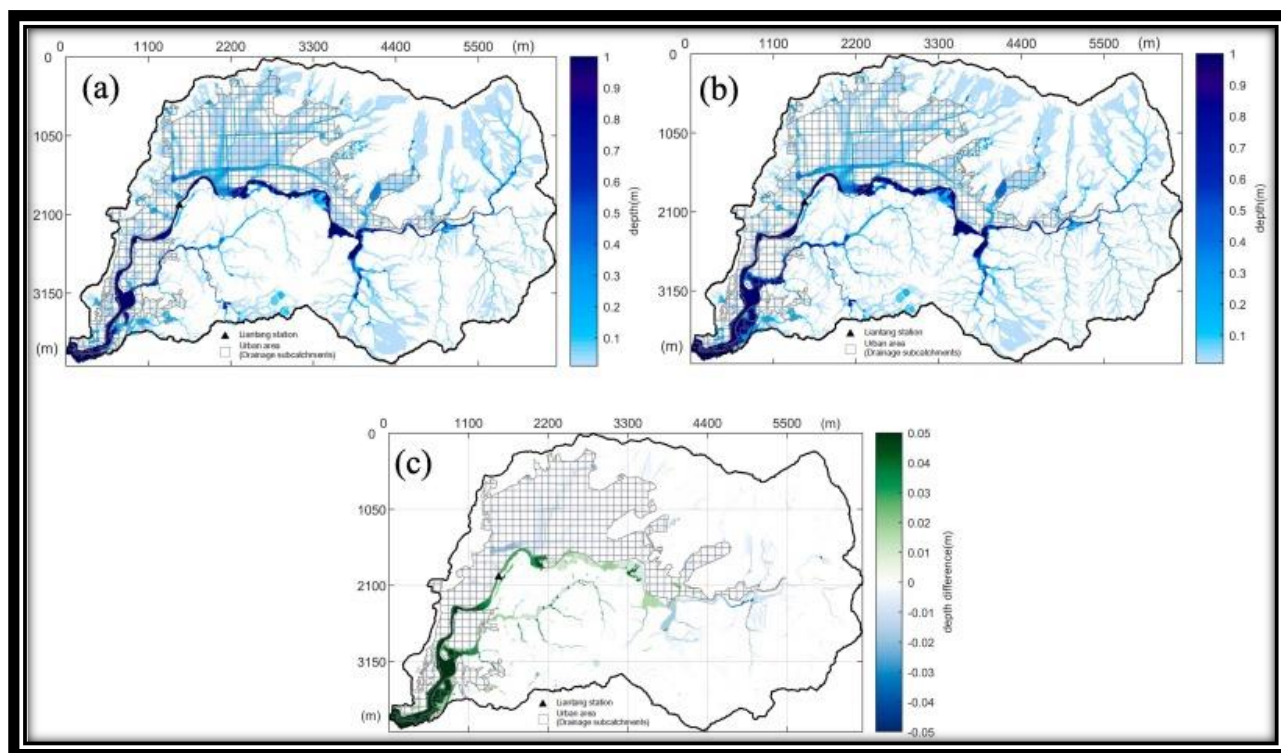
Ilustración 1. Datos del terreno, uso del suelo de cuenca y tuberías de drenaje.



Tomado de (Guo et al., 2023)

Es así, como al notar Guo et al., (2023) la falta de información de las tuberías del tramo estudiado mostrado en la ilustración 1, se implementa el enfoque hidrológico propuesto, con el fin de simular los flujos de drenaje. No obstante, el enfoque hidrológico propuesto proporciona una evaluación precisa de los flujos de drenaje, resaltando en esto los niveles de inundaciones más bajos en la zona urbana ya que el método logra representar de manera más exacta los niveles de inundación más realistas, en base a la aproximación de capacidad de drenaje diseñada para esta zona.

Ilustración 2. *Altura del agua durante el periodo de mayor flujo con drenaje por método de capacidad promedio. B método propuesto (HD).. C Diferencia entre métodos*



Tomado de (Guo et al., 2023)

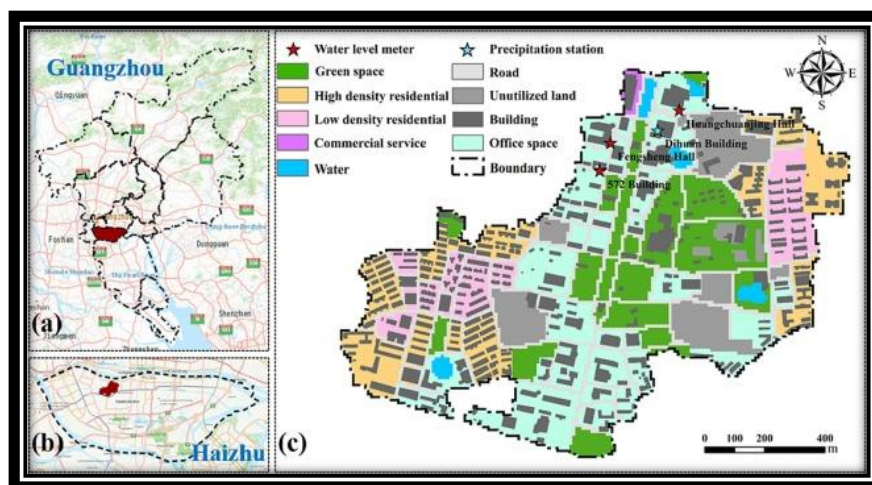
Donde la sección a fue sometida a el método de capacidad media, el cual este método se basa en la capacidad promedio del sistema de drenaje para manejar el flujo de agua durante condiciones de máxima demanda. Para la sección b fue evaluado por medio el método del modelo Hidrológico propuesto (HD) para cuantificar el hidrograma de flujo de drenaje en donde

se destaca la habilidad para simular los procesos hidrológicos e hidráulicos asociados con inundaciones en cuencas urbanas y rurales, a través de la aplicación de un método sencillo pero eficaz de manejo del flujo de drenaje basado en principios hidrológicos, y por último la sección c determina la diferencia que se encontró en ambos métodos el cual el método produce profundidades de inundación más pequeñas en el área urbana mapeada debido a su capacidad para cuantificar con mayor precisión los flujos de drenaje en comparación con el uso de la capacidad de drenaje de diseño. Esto sugiere que el enfoque propuesto es más efectivo para representar cómo los sistemas de drenaje afectan las inundaciones urbanas, lo que resulta en estimaciones más precisas de las profundidades de inundación en comparación con métodos más simplificados que solo consideran la capacidad de drenaje de diseño.

Una vez establecidos los resultados mostrados en la Ilustración 2, (Guo et al., 2023) resalta la importancia de este modelo computacional para posibilitar agilizar y realizar los cálculos de los procesos de escorrentía que son generados por las lluvias con el fin de conocer las áreas más propensas a inundaciones, aun así cuando se carecen de datos detallados de las tuberías existentes en las zonas.

Asimismo Xu et al., (2023) hace estudios dándole como prioridad a el desarrollo de modelos en donde se logre simular las inundaciones que se presentan en las zonas urbanas en donde las áreas presentan datos limitados, calibrando la capacidad de drenaje del sistema de las tuberías mediante la información combinada de los datos satelitales y el uso de los suelos presentes en el área, asignando parámetros específicos con el fin de ser utilizados para modelar la escorrentía y trazar la convergencia de los flujos que se pueden presentar en los entornos urbanos. Este estudio fue aplicado en el distrito de Haizhu, Guangzhou, China en el año 2023, a continuación, se presenta la zona de estudio en la ilustración 3.

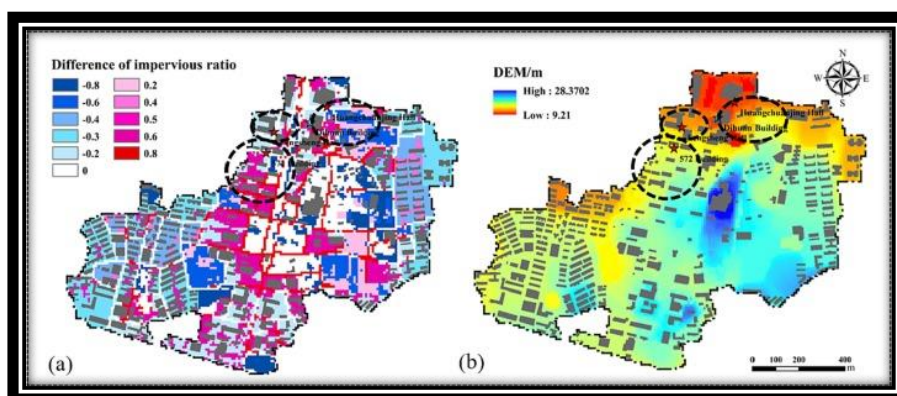
Ilustración 3. Posición geográfica, área de investigación y uso de cobertura.



Tomado de (Xu et al., 2023)

Para llevar a cabo este modelo hidrológico y estudios de drenaje, se hizo el modelo de elevación de la zona a estudiar, sometiéndose así este, a varios procesos de inundación para diferentes escenarios de capacidad de drenaje en donde se implementaba el intercambio de uso y cobertura de los suelos construyendo con esto un mapeo que se plasma a continuación en la ilustración 4.

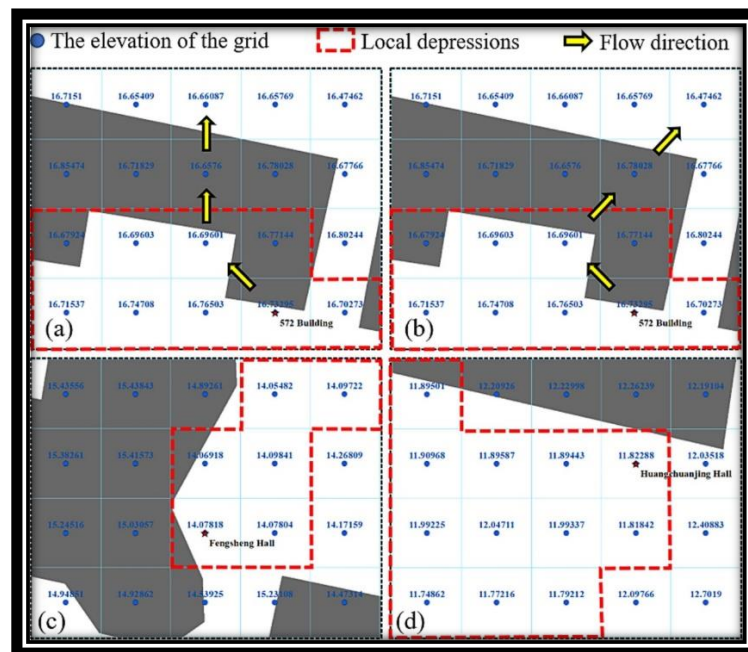
Ilustración 4. Variaciones del uso de los suelos y modelo de elevación digital del área de estudio



Tomado de (Xu et al., 2023)

Simulando entonces procesos de inundación utilizando diferentes métodos, teniéndose en cuenta las áreas impermeables generando así un análisis de las zonas presentadas a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) el cual fue evidente la información básica del terreno sin considerar la altura en donde se presentaban edificios, notándose con esto que la presencia de la estructura modifica el patrón que presenta el flujo del agua, generando así el impedimento de la acumulación del agua en esta zona, atribuyendo con esto la mejor comprensión a los procesos de inundaciones urbanas y proporcionando información para la toma de decisiones en la gestión de riesgo de inundaciones de la área estudiada donde se presenta la limitación de datos, igualmente resaltando le importancia de los efectos que causan los edificaciones al momento de simular inundaciones, ya que estos presentan un cambio con la topografía que se le da el terreno a estudiar.

Ilustración 5. Configuración del terreno en las ubicaciones donde se realiza el monitoreo a nivel del agua.



Tomado de (Xu et al., 2023)

Teniendo en cuenta se evaluó para la figura a no se tuvo en cuenta la existencia del edificio 572 por el cual el estudio podría no reflejar con precisión la topografía real del área estudiada y se podría la omisión de la elevación de los edificios en el modelo puede conducir a una representación inexacta de la distribución del flujo de agua y la profundidad del agua en el área estudiada. Para la sección b se consideran los factores como la impermeabilidad de los edificios, la escala de la red de vigas y las características topográficas locales, al modelar el flujo de agua. Por último para la sección c y d se considero además la resistencia que tiene en cuenta la restricción del flujo de agua causada por la presencia de edificios para así simular de manera más precisa cómo la presencia de edificios afecta el flujo de agua y cómo esto influye en los niveles de agua durante eventos de lluvia.

Simulación Hidrológica de Sistemas de Drenaje con SWMM

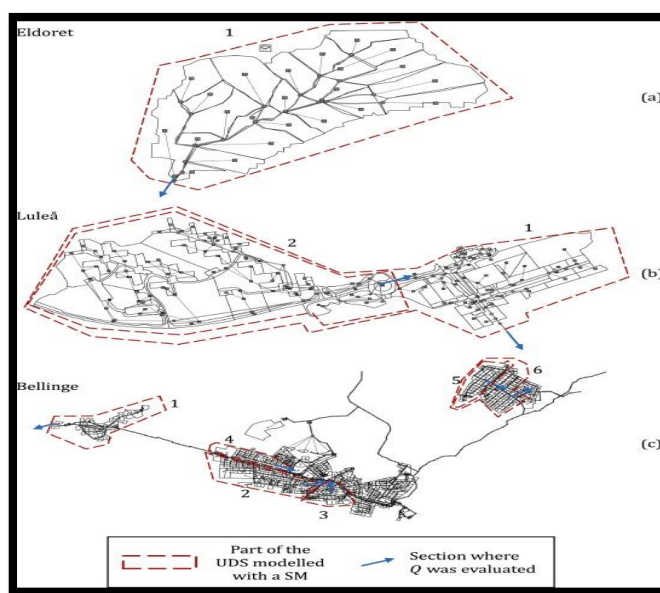
El software Storm Water Management Model (SWMM) desarrollado por la US-EPA dando sus inicios desde el año 1969, utilizado para modelar sistemas completos de saneamiento y drenaje en entornos urbanos. Esta herramienta permite la simulación de procesos hidrológicos e hidráulicos, así como la generación y movilización de contaminantes en estos sistemas. Aunque su capacidad de modelado de la contaminación es limitada y sus resultados pueden ser inciertos en este aspecto, SWMM es ampliamente reconocido y utilizado para analizar y diseñar redes de drenaje urbano debido a su enfoque en la hidráulica y la hidrología (Anta Álvarez et al., 2019).

Según (Butler et al., 2018), los sistemas de drenaje presentan una complejidad notable debido a la amplitud que presentan estas infraestructuras en el espacio, la interacción con otros sistemas, la variabilidad en las condiciones y la abundancia que presenta de partes conectadas a estos sistemas, es por esto que resulta crucial contar con modelos y simulaciones donde permitan

anticipar el comportamiento del sistema en diversas cuando es sometido a diversas condiciones y ubicaciones.

Farina et al., (2023) Plantea un estudio en donde se presenta de una manera práctica y metodológica la creación de modelos simplificados cuyos parámetros pueden estimarse a partir de los datos cartográficos que el área estudiada tenga. Asignando así para probar este modelo para varios casos en donde se caracterizaba las zonas de estudio con características morfológicas y topológicas distintas, utilizando el software SWMM, llevando a cabo simulaciones en donde se propuso varios casos de estudios para los sistemas de drenaje urbano, junto con esto apoyado con los parámetros de las características de las zonas obtenidas por mapas o sistemas de información geográfica.

Ilustración 6. Zonas modeladas junto las descargas de cuenca.



(Farina et al., 2023)

En base a los resultados del modelo simplificado (SM) propuesto, implica una notable reducción en la cantidad de datos de entrada necesarios. Esto se logra mediante la agrupación

espacial de las peculiaridades morfométricas de la cuenca urbana y la omisión de la modelización hidráulica de la red de alcantarillado. De esta manera, el enfoque destaca por su capacidad para proporcionar estimaciones rápidas de la escurrimiento en secciones específicas de los Sistemas de Drenaje Urbano (UDS). En donde fue notoria la efectividad del modelo simplificado al aplicarlo al módulo hidrológico del conocido software SWMM. Se evidenció que solo se requerían cinco parámetros el cual son área de la cuenca, longitud de las líneas del flujo, coeficiente de rugosidad, capacidad de almacenamiento y coeficiente de escurrimiento, para así estimar la escurrimiento en cuencas urbanas extensas. En resumen, esta propuesta proporciona una herramienta eficaz y rápida para llevar a cabo el modelado hidrológico, particularmente en contextos con restricciones en la disponibilidad de datos, debido a su característica del proceso de modelado, reducción la dependencia de datos específicos, las relaciones sólidas entre parámetros calibrados, las peculiaridades de la cuenca y la aplicabilidad de la herramienta para abordar una variedad de situaciones en la gestión de sistemas de drenaje urbano. Zhu et al., (2016) señala que los modelos en SWMM, se fundamentan en una técnica de registro de propulsión, empleado el método ordinario de Kriging y datos observados de lluvia y escurrimiento. Esto se realiza con el fin de tasar el riesgo de inundación de las estructuras de drenaje urbano actuales.

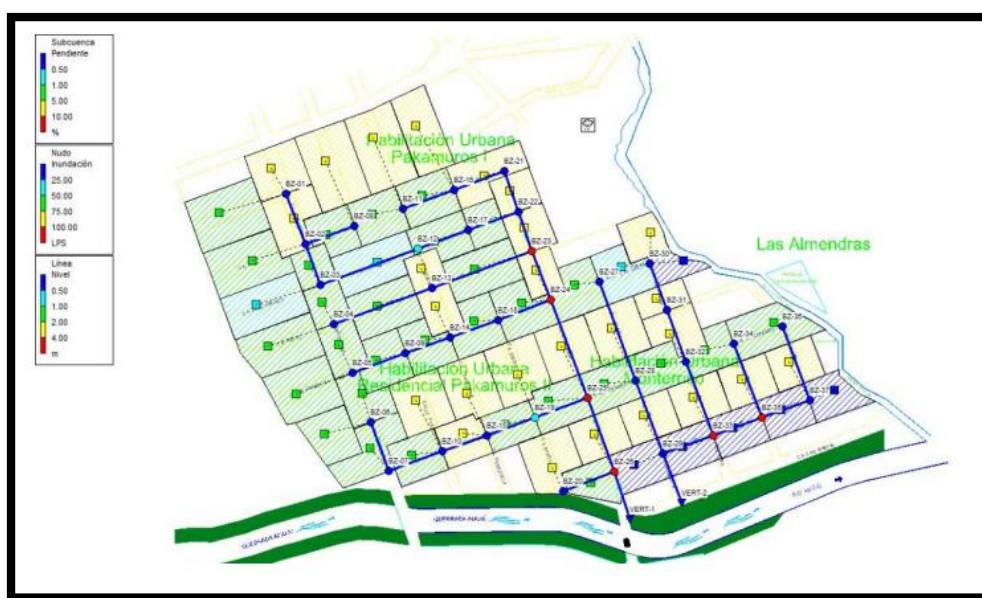
Zarate et al., (s. f.) Realiza un estudio con el software SWMM con el objetivo de realizar un modelado del drenaje pluvial para la ciudad de Jaén, en Cajamarca, con el fin de aplicar y describir dándole un enfoque experimental en busca de abordar aspectos cualitativos y cuantitativos para el sistema a diseñar, planteando junto con esto una comparación con el método racional con la finalidad de conocer la confiabilidad de ambos.

A raíz de la exigencia de realizar un sistema de drenaje pluvial optimizado el cual cuente con características óptimas para los eventos de lluvias asociadas con el fenómeno del niño.

Considerando en este modelo parámetros hidrológicos, topográficos y geológicos, para facilitar el boceto hidráulico y modelamiento hidrológico e hidráulico de la red de drenaje, a partir de la obtención de la comprensión de los escurrimientos del sistema, los mapas generados de inundación y con esto, garantizar el buen funcionamiento del sistema.

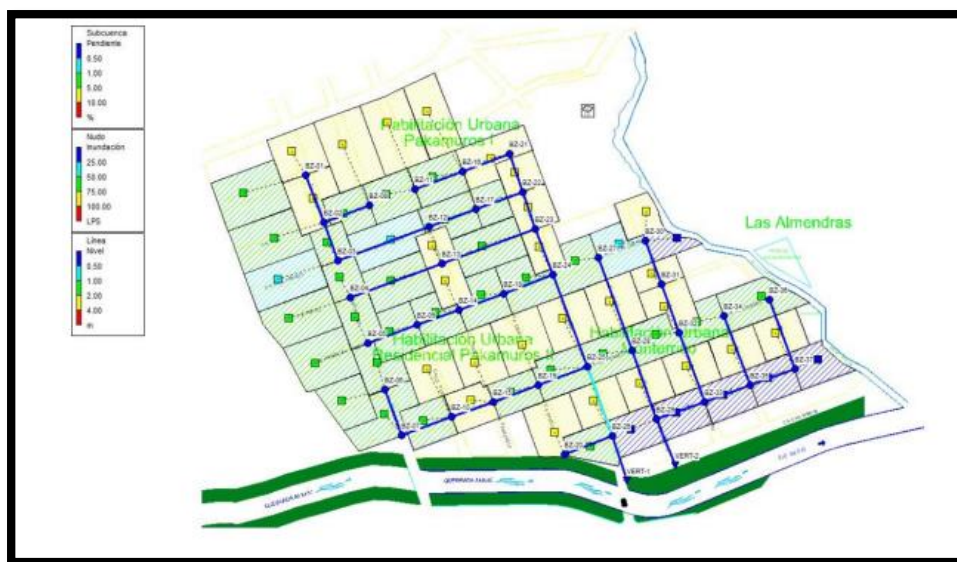
De acuerdo Zarate et al., (s. f.)Luego de la simulación por medio del software SWMM fue notorio el colapso de la red pluvial a raíz del análisis de las particularidades geomorfológicas de la cuenca estudiada como se muestra en la ilustración 7, dando paso a corregir el modelo en donde fuera notoria la buena circulación del flujo a través de la red ilustración 8.

Ilustración 7. Red colapsada de acuerdo a simulación en SWMM



Tomado de (Zarate et al., s. f.)

Ilustración 8. Red corregida



Tomada de (Zarate et al., s. f.)

Haciendo un análisis y resaltando la modalidad de diseño hidrológico e hidráulico que se da mediante el software SWMM ya que se percibe como una herramienta confiable en comparación a otros métodos, por sus resultados aproximados a la realidad, debido a que supera algunas limitaciones que ofrecen otros métodos siendo en su ámbito de estudio y aplicación más amplio al tener en cuenta los factores y menos limitaciones para el boceto más real de las estructuras de drenaje urbano.

Modelamiento hidrológico en HEC HMS para analizar eventos de inundaciones.

El modelo HEC-HMS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, es un sistema de modelado hidrológico diseñado para analizar eventos específicos de flujo de agua. vinculadas a la disponibilidad hídrica, el drenaje en entornos urbanos, la predicción de inundaciones, las repercusiones de la urbanización futura, el diseño de

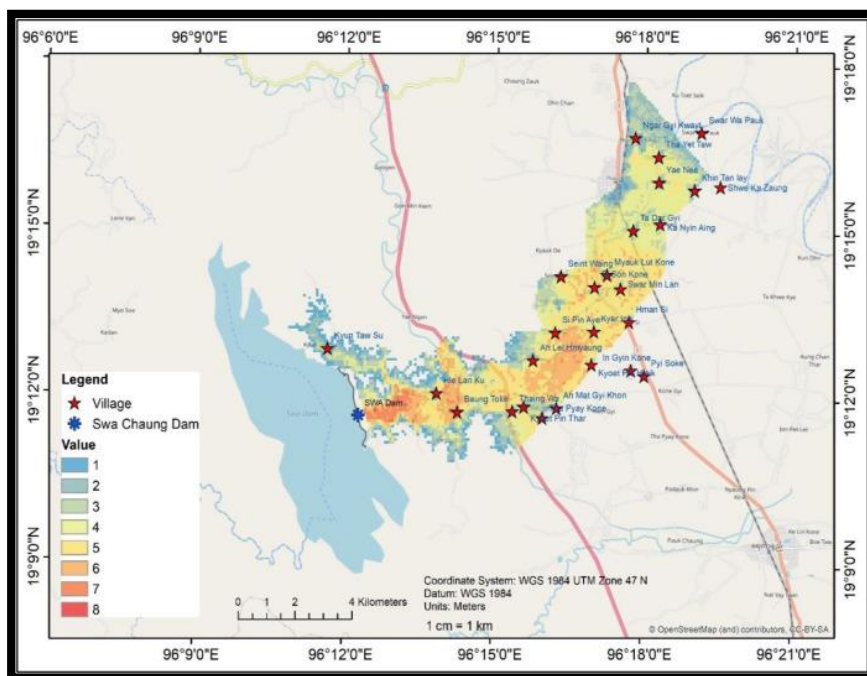
aliviaderos para embalses, la reducción de las afectaciones generadas por inundaciones, la normativa sobre áreas propensas a inundaciones y la gestión de sistemas hidráulicos(Rojas, s. f.).

En regiones propensas el cual se encuentran expuestas a peligros naturales como eventos de inundaciones y deslizamientos de tierra, surge la necesidad de desarrollar alertas tempranas para adaptarse a los cambios climáticos y proteger las comunidades cercanas a embalse. Es aquí en donde se ve la necesidad de producir hidrogramas resultantes de posibles rupturas y la elaboración de mapas en donde se perciban las zonas propensas a inundaciones, para así, establecer medidas preventivas que ayuden a mitigar los deterioros materiales y prevenir la pérdida de vidas, (Arias et al., 2021).

A juicio de Phyo et al., (2023) plantea un estudio donde tiene como objetivo central identificar las regiones propensas a inundaciones, en busca de analizar las circunstancias que podrían generar la ruptura de la presa Swa Chaung, ubicada en china, y el potencial riesgo que puede generar para las zonas que se encuentran habitadas alrededor de está.

Es aquí donde Phyo et al., (2023) realiza la recopilación de datos para iniciar el estudio característico de esta presa con ayuda del software computacional HEC-HMS realizando la adecuada preparación de datos y la precisión de las condiciones de los elementos para realizar las simulaciones, fundamentándose en situaciones hidrológicas e hidráulicas de la zonas. Teniendo en cuenta con esto, los datos de modelación digital del terreno, uso del suelo, mapa de suelos, datos climáticos, y parámetros de la presa de la zona, generando seguidamente la simulación de inundaciones y el análisis hidráulico para determinar las zonas que presentan un alto riesgo de inundación, conociéndose los pueblos cercanos a esta presa, que serían los afectados como se muestra en la ilustración 9.

Ilustración 9. Mapa de inundaciones a un periodo de retorno de 10.000 años

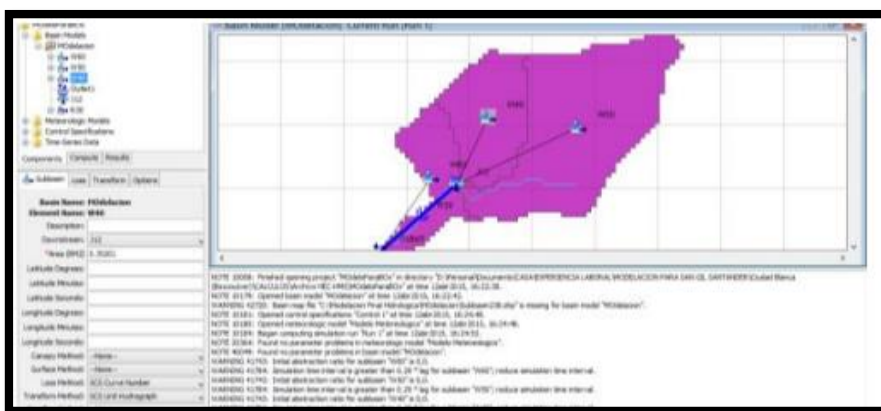


Tomado de (Phyo et al., 2023)

En referencia Higuera, (2015) hace un estudio en el municipio de San Gil, Bucaramanga, como se muestra en la ilustración 10, el cual hace el uso de la herramienta computacional HEC-HMS para presentar una descripción detallada a las características hidrológicas e hidráulicas del cauce de este municipio, ya que es evidente durante los eventos de lluvia el escurrimiento es generado hacia las viviendas que están en el municipio el cual, en situaciones la problemática se intensifica en una sección estrecha de control, donde se da el aumento de la velocidad y fondo del flujo siendo este escenario presenta un riesgo potencial para las áreas destinadas a la conservación del suelo en esa zona.

De esta manera Higuera, (2015) señala dividir el estudio en cuatro fases, compuestas por la recopilación de datos, procesamiento, modelación hidrológica e hidráulica y por último el diseño de canalización donde se contara con una buena eficiencia para el caudal.

Ilustración 10 Área de estudio municipio de San Gil



Tomado de (Higuera, 2015)

Mediante la aplicación del modelo HEC-HMS, se logró caracterizar de manera efectiva el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio. El modelo permitió obtener información crucial, incluyendo zonificación espacial de la lámina de escorrentía que se produce, así como los hidrogramas y el volumen producido, el cual fueron resultados evaluados para la condición actual como para escenarios de medidas propuestas, brindando una perspectiva ante los eventos de precipitación, permitiendo esta información lograr el diseño de canalización del cauce proponiendo cunetas en donde se mostrará una sección de máxima eficiencia, como se muestra en la ilustración 11.

Ilustración 11. *Diseño final de sección de cunetas*

Cálculo de tirante normal secciones: trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: Ciudad Blanca Proyecto: San Gil - BoxCoulver
Tramo: Calle 29 - Carrera 3 Revestimiento: Concreto

Datos:
Caudal (Q): 8.55 m³/s
Ancho de solera (b): 2 m
Talud (Z): 1
Rugosidad (n): 0.012
Pendiente (S): 0.0007 m/m

Resultados:
Tirante normal (y): 1.3601 m
Área hidráulica (A): 4.5702 m²
Espejo de agua (T): 4.7202 m
Número de Froude (F): 0.6070
Tipo de flujo: Subcrítico

Perímetro (p): 5.8470 m
Radio hidráulico (R): 0.7816 m
Velocidad (v): 1.8708 m/s
Energía específica (E): 1.5385 m·kg/kg

Calcular Limpiar Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

Ingresar el tipo de material del canal 12:43 p. m. 05/05/2015

Tomado de (Higuera, 2015)

Análisis global de los estudios e investigaciones basadas en los programas computacionales utilizados para la predicción y mitigación de inundaciones.

De acuerdo a lo investigado para este capítulo, se observó la cantidad de programas que existen teniendo como fin cada vez la efectividad y el acercamiento cada vez más a la realidad para el modelamiento hidrológico, mostrando con esto, la variedad de investigaciones como un elemento fundamental que ayuda a enriquecer y flexibilizar las herramientas para hacer los estudios y análisis de gestión del agua, promoviendo la innovación, la eficiencia y la precisión de las herramientas.

Seguidamente se hace un análisis a la variedad de estudios realizados en el continente asiático en donde en su mayoría son desarrollados teniendo en cuenta cada vez más variables y los efectos cambiantes del medio ambiente, haciendo con esto una manera de simular más acorde de la realidad incluyendo más la inteligencia artificial y simulaciones con programas computacionales de alto desarrollo, la aplicación de tecnologías avanzadas y modelos predictivos que contribuyen a mejorar la infraestructura hídrica y la resiliencia ante eventos extremos, a diferencia del continente latinoamericano (Investigaciones realizadas en el municipio de san gil) el cual en su mayoría de las investigaciones consultadas fueron desarrolladas por programas computacionales estandarizados, resaltando igualmente que este continente se enfoca más a la utilización de estos programas para el desarrollo de estudios de las zonas donde se requiere, que al desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis y estudio de la hidrología. Siendo notorio que para cada área estudiada en las investigaciones elegidas estos modelos se adaptaban a la necesidad de las condiciones específicas que se encontraban estas regiones, teniendo en cuenta las variaciones geográficas y climáticas.

Capítulo 2. Estudios y Avances Basados en Infraestructuras Para la Gestión de Flujo

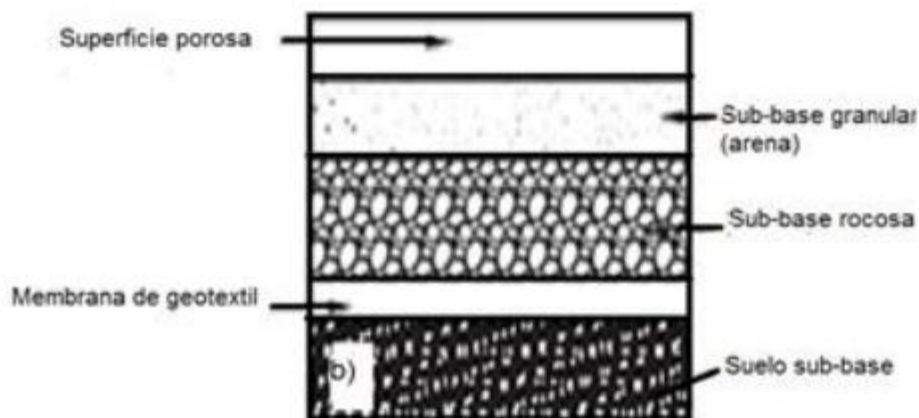
Hídrico Superficial

Estudios y Avances de Pavimentos Permeables

Los pavimentos permeables están diseñados para el paso de vehículos y suelen estar compuestos por múltiples capas de materiales de pavimentación que facilitan el flujo de agua a través de su estructura. Un elemento crucial en el diseño de pavimentos porosos es facilitar el drenaje del agua hacia el suelo, a través de las capas permeables y las juntas entre ellas, con el fin de preservar la estabilidad y resistencia de las capas base y sub-base (Lucke, 2013).

La disposición característica habitual de los pavimentos permeables y porosos incluye tres estratos: una capa superior que permite el flujo del agua y puede estar conformada por una variedad de materiales como asfalto y concreto (en pavimentos permeables); una capa intermedia de material granular fino, que facilita la correcta instalación de la capa superficial; y una capa inferior formada por una estructura de material granular de dimensiones considerables, o por módulos o geo-células plásticas, donde se almacena el agua (sub-base), (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013).

Ilustración 12. Disposición estándar de un sistema de pavimento permeable.

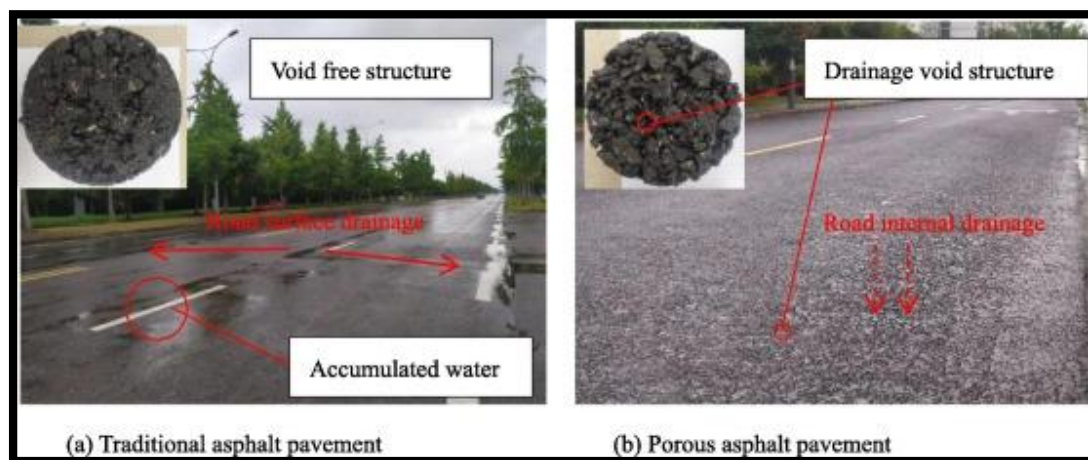


Tomado de (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013)

El pavimento Asfáltico poroso (PA) ofrece notables ventajas en cuanto al drenaje superficial facilitando la rápida eliminación del agua en la superficie, reduce el ruido y posee propiedades antideslizantes constituyendo esto, una medida fundamental para garantizar la seguridad de la conducción durante los eventos de lluvia, es por esto, que la variedad de estudios con el objetivo de potenciar y ampliar las capacidades de la carretera, el pavimento de asfalto poroso, ha ido adquiriendo progresivamente mayor atención en el ámbito ingenieril vial (Yu et al., 2020).

Yu et al., (2020) propone un estudio en Jiangsu, China en donde se emplea la dinámica moléculas para simular la interacción entre las moléculas de agua y la capa superficial del asfalto de los pavimentos asfálticos porosos. A nivel molecular, se detalla el mecanismo subyacente de la interacción entre el asfalto y el agua en diversas fases de envejecimiento, y se investiga cómo el proceso de envejecimiento afecta dicha interacción. A partir de esta premisa, se verifica la evolución de la interacción entre las moléculas de asfalto envejecido y el agua mediante técnicas como la observación de goteo y el uso del microscopio de fuerza atómica. Estableciendo mediante estos métodos, primero el impacto del envejecimiento que tiene el asfalto mediante la integración del agua ya que a medida que los asfaltos porosos envejecen, se presentan cambios en la cantidad del asfalteno que se presenta en la mezcla siendo esto desventajoso a medida del tiempo para el proceso del drenaje, como segundo la gran cantidad de espacios vacíos en el pavimento poroso proporciona una amplia área en donde el agua puede acumularse y drenar a través del pavimento, aunque se puedan dar cambios a través del tiempo a raíz del envejecimiento.

Ilustración 13. Evaluación de como diversas configuraciones del pavimento impactan en el proceso de drenaje.



Tomado de (Yu et al., 2020)

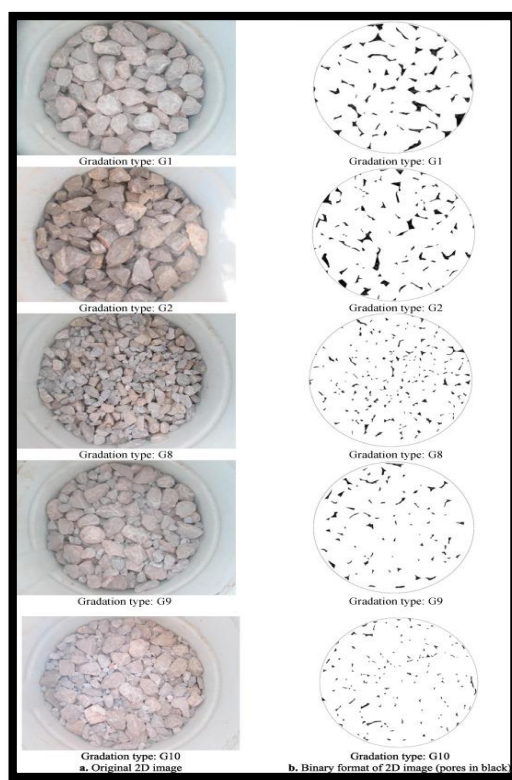
Hein & Schaus, (2016) argumenta sobre la aplicación del pavimento permeable el cual suele emplearse en áreas como estacionamientos, calles urbanas donde se presente poco tráfico, campos de golf rutas de bicicletas debido a la capacidad de carga inferior del pavimento permeable. Adicionalmente representa una opción constructiva favorable en las calles con bajos niveles de tráfico en áreas urbanas, con el propósito de ampliar el espacio útil del pavimento ya que este permite eliminar las zanjas laterales en algunos casos (Lebens & Troyer, 2012).

Desde un punto de vista Koohmishi & Shafabakhsh, (2018) establecen un estudio para pavimentos permeables donde se realiza la determinación experimental de la conductividad hidráulica de la capa en donde se evalúa la capacidad drenante considerando distintos tamaños para los agregados.

Con el propósito de realizar este objetivo, se realiza la prueba de permeabilidad de cabeza constante en los agregados, cubriendo con esto una variedad de gradaciones que incluyen diferentes tamaños de partículas. Debido a que las gradaciones están mayormente compuestas

por agregado grueso, se utiliza un equipo de prueba de permeabilidad de gran escala para determinar tanto la conductividad hidráulica como las condiciones del régimen de flujo a través de los medios porosos que constituyen la capa del yacimiento. Asimismo, se procede al análisis fundado en imágenes de secciones transversales obtenidas de las muestras sometidas a análisis y se calcula el área de poros entre las partículas para cada gradación específica evaluada como se muestra en la ilustración.

Ilustración 14. *Imagen de límites entre las partículas de agregados para distintas distribuciones de tamaños.*



Tomado de (Koohmishi & Shafabakhsh, 2018)

De acuerdo al análisis estableció que al tener amplias variaciones en el tamaño de las partículas en la mezcla de agregados afectara negativamente la capacidad del agua para moverse a través del sistema, dando así menor eficiencia de drenaje y una conductividad hidráulica

reducida, igualmente para cuando el diámetro de las partículas es pequeño. Asimismo, un agregado con clasificación homogénea y con partículas de mayor tamaño está asociado a la ampliación de la zona de los poros, por el cual resultara un mayor rendimiento en términos de drenaje.

Estudio Integral de Infraestructuras de Drenaje

Los sistemas de drenaje conformados por estrechas zanjas canalizadas, tienden a exhibir propiedades lineares y distribución regular, en su mayoría estas estructuras son el resultado de intervenciones humanas y se encuentran comúnmente en paisajes agrícolas con relieves inclinados. Estas estructuras de canalización artificial desempeñan un papel crucial al administrar de manera efectiva el movimiento del agua en áreas de menor altitud, ayudando a evitar posibles inundaciones y facilitando el manejo del flujo hídrico (Dollinger et al., 2015)

Este estudio fue realizado en la región superior de la cuenca del río Upper Choptank. Situado en el este de Estados Unidos, el cual es una zona se destaca por la existencia de numerosas áreas deprimidas con vegetación en un paisaje agrícola caracterizado por su topografía baja y la capacidad de los suelos para el drenaje han conllevado la transformación de las depresiones mediante la construcción de sistemas extensos de zanjas. Estas zanjas tienden a inundarse durante ciertas temporadas por lo que desempeñan un papel crucial como conductos para el buen flujo de agua, ya que están enlazadas con sistemas extensos de canales de drenaje.

De acuerdo con esta problemática Dollinger et al., (2015) propone una investigación donde se aplique metodologías avanzadas de aprendizaje para identificar zanjas de drenaje, utilizando datos obtenidos mediante la tecnología de detección de luz y alcance (LIDAR). Para esto, como primero se diseñó una red neuronal diseñada para clasificar las zanjas presentes en el entorno. Para lograr esto, se exploraron diversas combinaciones de características ópticas aéreas

y datos derivados de LIDAR. Estos datos incluyen información tanto topográfica como de intensidad de retorno. Seguidamente se hizo uso de la arquitectura U-Net, conocida por su capacidad para procesar eficientemente información espacial, siendo una herramienta instrumental en el proceso de identificación y clasificación de las zanjas, permitiendo así una evaluación detallada y precisa de la presencia de estas estructuras en el entorno estudiado y de esta forma mediante diferentes métodos de análisis de redes de drenaje se evaluaron y compararon la eficacia y precisión.

Finalmente Dollinger et al., (2015) ratifica el análisis evidencia la efectividad de las estrategias basadas en el aprendizaje profundo para la automatización de la identificación de redes de zanjas. Además, subraya la importancia significativa de los datos topográficos recabados a través de la tecnología LIDAR en la cartografía operativa de sistemas de drenaje a niveles locales y regionales, destacando el potencial de estas técnicas para respaldar futuras iniciativas de cartografía de redes de drenaje en una gran escala.

Como complemento a las investigaciones realizadas para las infraestructuras de obras de drenaje superficial Kröger et al., (2008) realiza un estudio en la cuenca del río Mississippi en donde se analizó las propiedades hidrológicas de las áreas de drenaje controlado que permiten retener la velocidad del agua permitiendo minimizar la erosión, mejorar la calidad del agua y gestionar el flujo superficial de manera eficiente. Teniendo en cuenta que se cuenta con un análisis de la parte química en donde se centra en entender cómo la retención y liberación de sustancias químicas en el agua están relacionadas con las características hidrológicas y la presencia de vertederos en las zanjas de drenaje superficial.

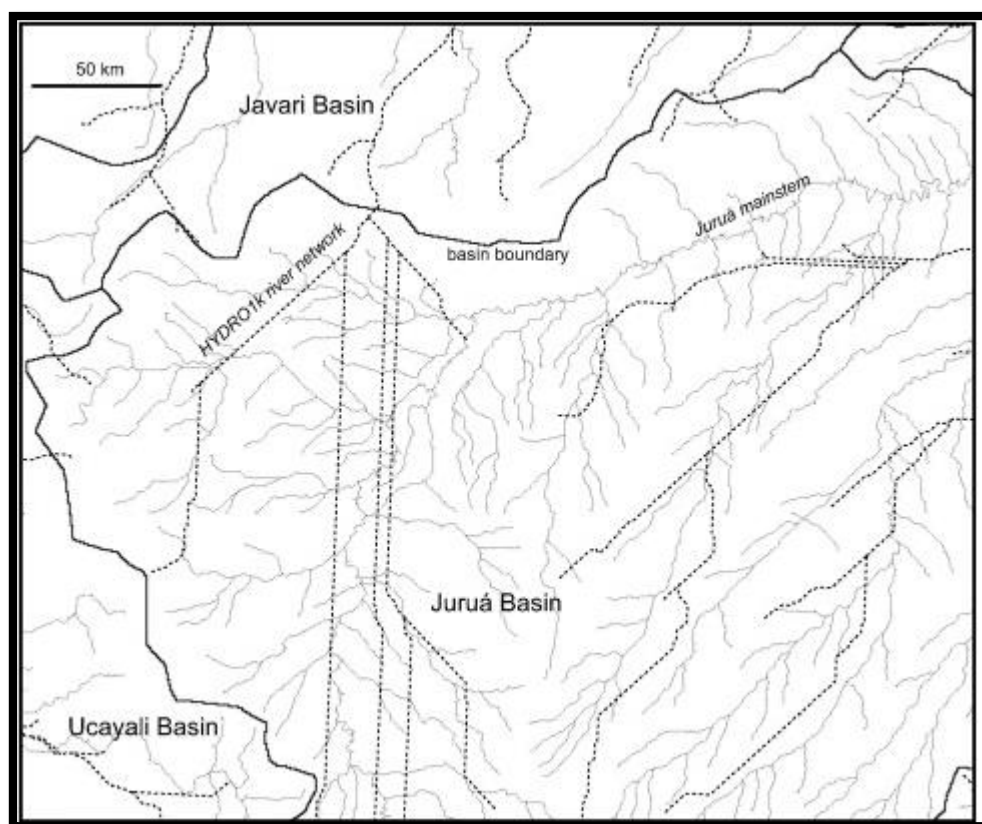
Se realizaron análisis comparativos utilizando quimógrafos replicados para evaluar como la presencia y la ausencia de vertederos junto a las condiciones específicas de vegetación

afectaron los tiempos de respuesta de las zanjas de drenaje, tanto en el tiempo hasta alcanzar el pico como el tiempo hasta la base de la zanja. Durante la investigación, se observó que las zanjas sin vegetación mostraron patrones usuales de aumento, pico y disminución en los quimiogramas de retención química, seguidamente fue notable la presencia de vertederos tuvo un impacto significativo en la prolongación del tiempo requerido para que las zanjas alcanzaran su capacidad máxima de retención química, al contrario la ausencia de vertederos tuvo un impacto considerable en la reducción del tiempo necesario para que las zanjas alcanzaran el punto más bajo en cuanto a la retención química. Es aquí donde a raíz de lo observado se insinúa que hay un incremento notable en el almacenamiento de agua en las zanjas. Además, la presencia de vertederos sugiere un aumento significativo en la recarga de las aguas subterráneas, lo que implica que más agua se está filtrando hacia el subsuelo. También se menciona un posible aumento en el nivel freático, que es el nivel subterráneo donde los poros del suelo o roca están completamente saturados de agua (Kröger et al., 2008).

De acuerdo con Lohmann et al., (1998) las redes de cursos fluviales juegan un papel esencial en la modelación del relieve terrestre al unir y consolidar áreas geográficas diversas y distantes mediante el transporte del agua, sedimentos y sustancias químicas. Entender la dinámica en una sección específica del cauce implica examinar de manera integral las características de la cuenca de drenaje correspondiente y la red fluvial aguas arriba. Establecer una conexión sistemática entre la superficie terrestre y sus canales de drenaje implica trazar las trayectorias de flujo desde cada elemento presente en la topografía hasta el segmento particular del cauce, y a lo largo de toda la red fluvial hasta su desembocadura. Este enfoque integral facilita una comprensión completa de la interacción entre la configuración del terreno, la

Con el fin de comprobar y valorar la eficacia del método propuesto, se realiza un análisis comparativo utilizando 224 medidores hidrográficos geográficamente registrados en la red que ha sido procesada. Siendo así comparada la información sobre las áreas de drenaje obtenidas con aquellas áreas ya publicadas. Destacando la variabilidad en la confiabilidad efectiva a lo largo de la cuenca, enfatizando la importancia de tener en cuenta diversos tamaños de las cuencas al implementar el método propuesto.

Ilustración 16. Comparación entre la red de canal fluvial CAMREX (representada por líneas continuas) y la red de canal HYDRO1k (indicada por líneas discontinuas)



Tomado de (Mayorga et al., 2005)

De acuerdo con la ilustración 16, se desarrolló un método innovador para generar mapas cuadriculados de dirección de drenaje de tierra y arroyos basados en una red fluvial vectorial

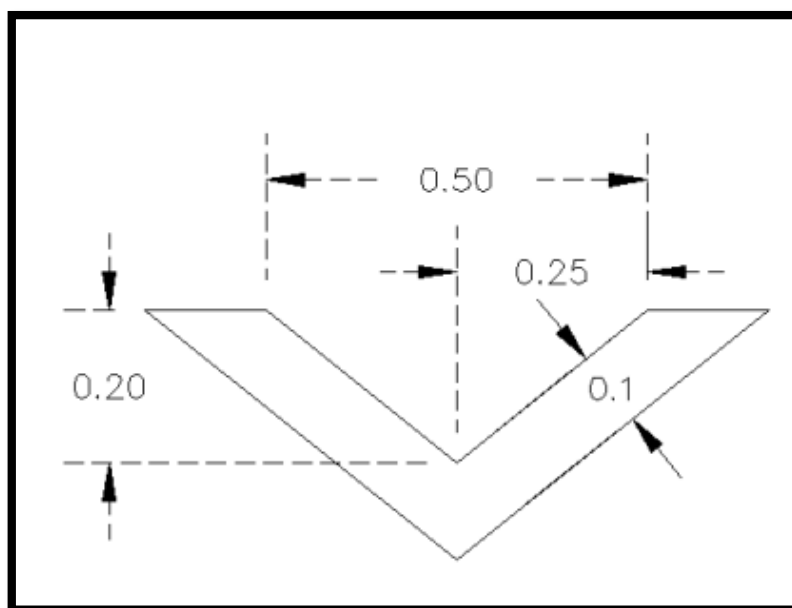
independiente de la topografía. Este método se basó en el uso de dos softwares y se llevó a cabo una comparación entre ellos, considerando varios factores como la región geográfica de interés, la calidad de los datos disponibles y el nivel de detalle requerido. En áreas donde el conjunto de datos HYDRO1k mostró limitaciones, como en la medición de áreas con relieve bajo y mala calidad de datos de elevación, se planteó que CAMREX podría ser una opción más confiable y precisa para la representación de la red de canales fluviales. Es importante señalar que una limitación evidente de este enfoque radica en su posible inconsistencia con los datos topográficos. Sin embargo, la capacidad de generar mapas de dirección de flujo a partir de redes vectoriales amplía las aplicaciones potenciales en modelos de transporte fluvial y extracción automática de cuencas.

Como estudio aplicativo ante el desarrollo hidráulico de obras de drenaje Otálvaro Barco, (2016) emplea el diseño y dimensionamiento de las obras de drenaje destinadas a carreteras con bajos niveles de tráfico en la pista ubicada en Urrao, Antioquia. Donde se presenta la propuesta para implementar una cuneta recubierta con sacos de suelo-cemento, distinguiendo la configuración triangular con una amplitud levemente menor a la recomendada por el Instituto Nacional de Vías.

Otálvaro Barco, (2016) Afirma el hecho de presentar una reducción en la cuneta de acuerdo a lo recomendado se asegura la capacidad hidráulica necesaria para gestionar los flujos de escorrentía típicos de la zonas montañosas de Antioquia. El cual fue evaluada su capacidad mediante la ecuación de manning, realizando una calibración en laboratorio para este coeficiente y con esto utilizando un montaje experimental que incorpora un canal construido en lamina de acero, con una longitud de dos metros y una pendiente variable, para así establecer los parámetros necesarios para garantizar el rendimiento hidráulico óptimo de la cuneta propuesta, el

cual luego de evaluar las alturas de los taludes y considerar la capacidad de drenaje de diferentes tipos de cunetas se llegó a la conclusión de la elección de una pendiente baja, ya que asegura que la cuneta pueda drenar adecuadamente el agua durante eventos de lluvia, y se prefiere mantener esta pendiente baja incluso si otras cunetas con pendientes más pronunciadas podrían tener una capacidad de drenaje mayor. Esto se debe a que una pendiente más baja proporciona una mayor seguridad y capacidad para evacuar el agua de manera efectiva, lo que es esencial para la gestión adecuada del agua y la prevención de problemas de drenaje en la carretera, en la ilustración 16 se muestra el dimensionamiento de la cuneta escogida.

Ilustración 17. *Dimensionamiento propuesto para sección transversal del canal*



Tomado de (Otálvaro Barco, 2016)

La propuesta de revestimiento se plantea con finalidad de prevenir el crecimiento de vegetación, disminuir los costos asociados al mantenimiento, prolongar la vida útil del canal y mitigar la infiltración, la cual podría comprometer la integridad estructural de la vía. Este tipo de recubrimiento ha sido empleado en situaciones de emergencia a lo largo de diques y arroyos

durante episodios de inundaciones, A pesar de que la mayoría de los sacos empleados son propensos a sufrir daños y eventual desgaste, tienen el potencial de proporcionar una protección duradera, siempre y cuando la preparación de la mezcla se realice de manera apropiada.

Díaz Mora et al., (2019) Manifiesta la grave falta de seguridad que se presentan en las zonas en donde la falta de vías en buen estado y la falta de obras de drenaje, el cual puede resultar peligroso en su mayoría en tiempos de precipitaciones, ya que esto puede generar desplomes en el terreno, disminuciones en la superficie de la carretera y acumulaciones de agua que obstaculizan el flujo normal de los vehículos.

La importancia de contar con un sistema de drenaje eficiente radica en preservar la calidad de las vías, permitiendo a los usuarios desplazarse de manera cómoda y segura. Debido a que el agua puede ocasionar daños que afectan las propiedades geomecánicas y los mecanismos de transferencia de cargas, así como aumentar la susceptibilidad a cambios volumétricos, su estancamiento se considera una de las causas más significativas del deterioro prematuro de la infraestructura vial (Romero Vanegas et al., 2017)

Siendo así, para este estudio realizado en municipio La Mesa Cundinamarca en donde se propone el diseño del drenaje vial que formula preservar las vías y ayudar a gestionar el flujo superficial de estas, debido a la afectación que se presenta del deterioramiento de las vías a causa del tránsito pesado que ha desgastado la estructura y con esto el poco mantenimiento que se realiza en el área de la zona estudiada, teniendo como alternativa el cálculo de los parámetros necesarios para la modelación mediante el uso del Software H, debido a su utilidad para el análisis y diseño de sistemas de drenaje.

Para el desarrollo y cálculo del dimensionamiento del sistema de drenaje primeramente se expuso las características topográficas y la condición actual de la carretera objeto de análisis una vez realizado se procedió a la recolección de datos donde se eligieron los textos más actualizados con temas relacionados al drenaje, estabilidad de pendientes, planificación de cunetas y el diseño de alcantarillado de la zona y por último se dio paso a el desarrollo del diseño del sistema de drenaje de la carretera que abarca desde San Joaquin hasta el Alto del tigre, dimensionando los canales de acuerdo a los estudios realizados, como se muestra en la ilustración 18.

Ilustración 18. Diseño Software H canales Tramo 1

Cálculo de tirante normal secciones: trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: **LA MESA CUNDINAMARCA** Proyecto: **DRENAJE VIAL**
Tramo: **SAN JOAQUIN-ALTO DEL TI** Revestimiento: **TRAMO 1**

Datos:

Caudal (Q): **0.05** m³/s
Ancho de solera (b): **0** m
Talud (Z): **2**
Rugosidad (n): **0.015**
Pendiente (S): **0.06** m/m



Resultados:

Tirante normal (y): **0.1076** m
Área hidráulica (A): **0.0231** m²
Espejo de agua (T): **0.4303** m
Número de Froude (F): **2.9737**
Tipo de flujo: **Supercrítico**

Perímetro (p): **0.4811** m
Radio hidráulico (R): **0.0481** m
Velocidad (v): **2.1601** m/s
Energía específica (E): **0.3454** m-Kg/Kg

Calcular Limpia Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

Tomado de (Romero Vanegas et al., 2017)

Luego de un exhaustivo análisis de los datos y la consideración meticulosa de los criterios de diseño, se ha propuesto un diseño de drenaje en cunetas con una sección triangular. Esta elección se fundamenta en la intención de simplificar el proceso de construcción, especialmente teniendo en cuenta las características topográficas del área en cuestión. Este diseño triangular ofrece una solución práctica y eficiente para gestionar el flujo de agua, adaptándose de manera óptima a las condiciones del terreno y facilitando la implementación del sistema de drenaje.

Análisis Global de Estudios y Avances Basados en Infraestructuras Para la Gestión de Flujo Hídrico Superficial

Considerando las diversas contribuciones de las investigaciones llevadas a cabo en diversos contextos es evidente la importancia que se le da al desarrollo de cada vez más alternativas sostenibles y sustentables donde se tiene como finalidad el buen flujo y manejo de las precipitaciones, dando a eso participación a los pavimentos permeables el cual son una parte integral de las acciones que se pueden implementar para cumplir con los requisitos de sostenibilidad ambiental en la construcción de infraestructuras de transporte, especialmente en lo que respecta a la preservación, el uso eficiente y la gestión de las aguas pluviales. (Universidad Autónoma del Estado de México et al., 2017). Posteriormente las obras de infraestructura para la gestión y manejo del agua como los canales, zanjas, cunetas y alcantarillas igualmente juegan un papel importante en cuanto a la mitigación de inundaciones debido a que este tiene como papel clave dirigir el agua de manera controlada y prevenir problemas asociados con la acumulación de aguas, erosión de los suelos, desbordamientos de ríos y arroyos, daños de infraestructuras e incluso la pérdida de biodiversidad.

Para esta investigación de los estudios, fue notorio la manera de desarrollo investigativo que se le da internacionalmente a los parámetros ya establecidos relacionados con los

pavimentos permeables planteando en su mayoría de las fuentes consultadas el mejoramiento, comparativa o desarrollo a mejores prospectos de los pavimentos permeables, caracterizando así por ejemplo en su medida el tipo de agregado que ayuda a drenar y de cierta manera a cumplir mejor el paso del flujo del agua a través de los pavimentos teniendo en cuenta la mayor preservación de estos a través del tiempo influyendo así un poco mantenimiento que conlleve a minimizar costos y otros parámetros.

En cuanto a el desarrollo de infraestructuras dedicadas a la gestión de los flujos fue notorio el desarrollo de modelos donde se busca simular cada vez mas de acuerdo a la realidad, para así desarrollar mayor confiabilidad de estos modelos de canales en donde se ven evaluadas áreas bastantes extensas, esas investigaciones son mayormente comunes a nivel internacional, en comparación a nivel nacional en su mayoría de estudios e investigaciones encontradas fueron llevadas a un ámbito aplicativo teniendo como fin diseñar obras, en su comparativa con las internacionales de tramos relativamente más pequeños y aplicarlas para llevar a cabo como solución final la construcción y evidentemente solución del problema.

En definitiva, el aporte financiero en el desarrollo de una infraestructura de drenaje que sea sostenible, flexible y respetuosa con el entorno no solo enfrenta los desafíos existentes, sino que también juega un papel crucial en fortalecer comunidades para hacer frente a los futuros desafíos climáticos y ambientales.

Capítulo 3. Enfoques Naturales como Drenajes Superficiales para Mitigar y Gestionar Inundaciones

Estrategias Innovadoras de Drenaje Superficial Mediante la Adopción SUDS

El uso del término inundación urbana ha estado en aumento en los últimos años debido a la conjunción de la urbanización, el cambio climático y las deficientes condiciones de drenaje de las zonas (Bouhennache et al., 2019). Se han vuelto un desafío crucial en todas las naciones en desarrollo, impactando de manera significativas las situaciones físicas, mentales y sociales de los habitantes (caprario et., al, 2019). Las inundaciones pueden surgir por diversas causas, entre estas están el diseño inapropiado de drenaje, episodios de lluvia intensa, incremento de la escorrentía total llenado de almacenamientos naturales como embalses y depresiones (Swain et al., 2022).

A juicio He et al., (2019) Manifiesta la comprobación de la inclusión de los elementos SUDS es un sistema de drenaje que no solo incrementa la manera efectiva de recuperación del sistema, sino que además fomenta la sostenibilidad de los recursos hídricos.

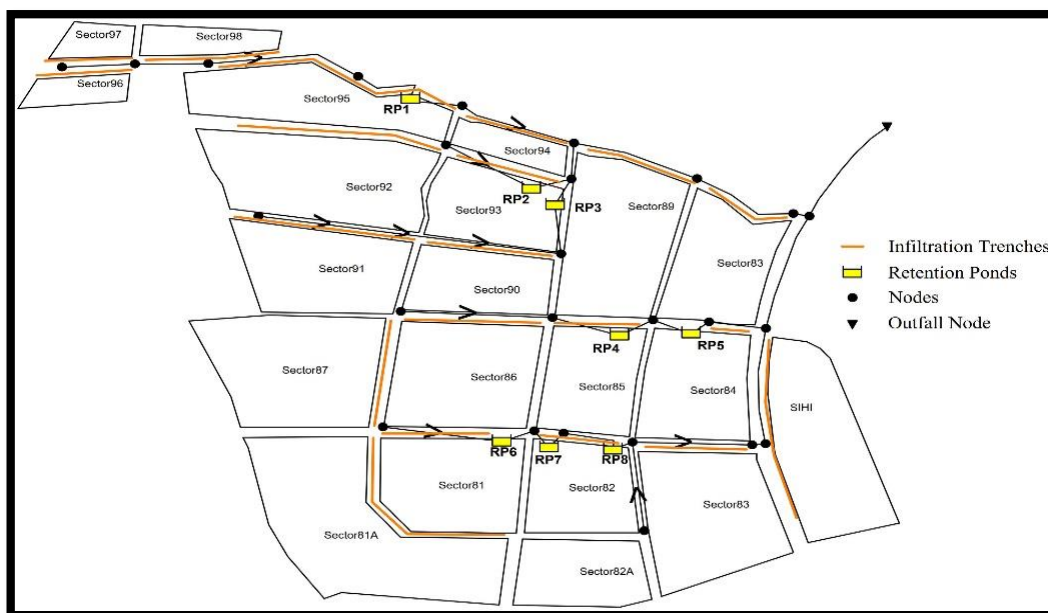
Guptha et al., (2022) realiza un estudio en Gurugram, India para llevar a cabo la simulación de inundaciones de esta área siendo necesario llevar la modelación para eventos extremos, con esto, teniendo en cuenta el tipo de suelo, elevación y la pendiente a la que se encontraba el área de estudio e igualmente los datos de los drenajes. Estableciendo así el diseño para la implementación de los sistemas de drenaje sostenibles para la gestión sostenible del entorno urbano evaluando dos componentes específicos como lo fue las zanjas de infiltración y los estanques de retención mostrados en la ilustración 18, diseñados para controlar la escorrentía y reducir de una manera significativa el flujo de agua.

Ilustración 19. *Zanjas de infiltración y estanques de retención*

Tomado de (Guptha et al., 2022)

Después de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles en puntos estratégicos de la zona se establecieron 3 diseños en donde se tienen en cuenta la el área solo con zanjas de infiltración, solo con estanques de retención y la implementación combinada de estos elementos, evaluando así el impacto de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles en comparación a las situaciones en donde no se implementaba este sistema. Señalando la notable mejora adquirida por la implementación de los SUDS en el contexto de mitigar inundaciones pluviales y mejorar la resiliencia del sistema de drenaje urbano (UDS), presentando sin duda un avance hacia el logro de los objetivos establecidos por el desarrollo sostenible en regiones urbanizadas.

Ilustración 20. ubicación de zanjas de infiltración y estanques de retención.



Tomado de (Guptha et al., 2022)

En Colombia, los factores climáticos y los fenómenos meteorológicos como de la niña y el niño, junto a la capacidad limitada de gestión de riesgos, ha causado consecuencias a causa de los impactos relacionados con las lluvias (Sedano-Cruz et al., 2013).

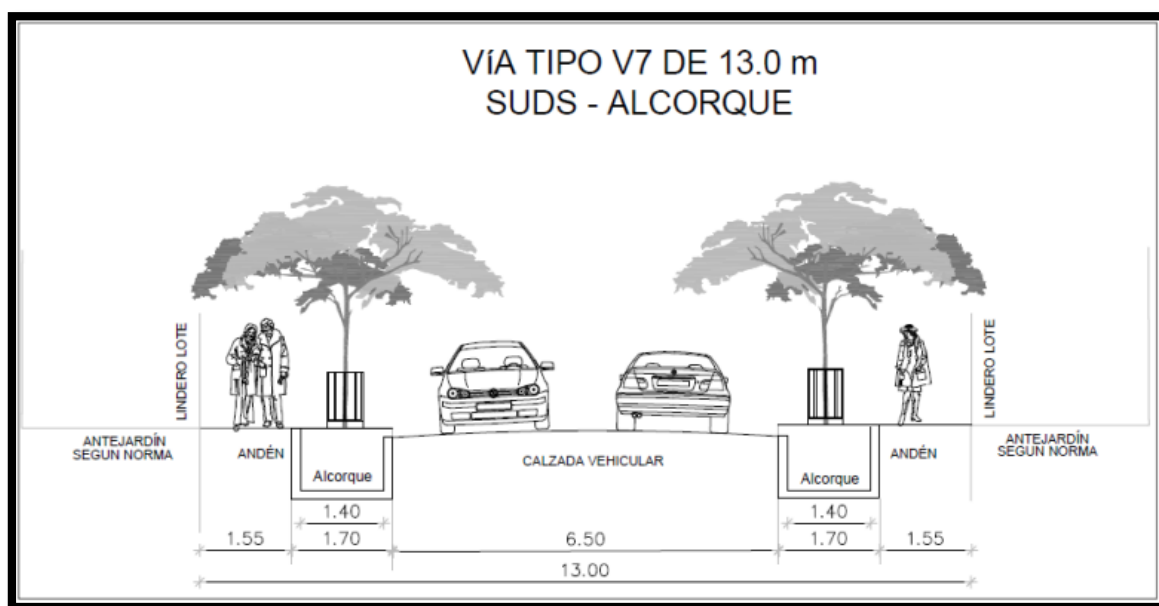
Ortega et al., (2023) argumenta sobre la introducción de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible abre una probabilidad para que los sectores de bajos ingresos experimenten entornos más saludables y agradables, con beneficios que abarcan el aumento de la biodiversidad y el bien estar de los habitantes de las áreas donde sean implementados.

Otra investigación que se ha desarrollado con base a la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Villavicencio, Colombia, citando a Villa Ruiz, (2018) para ser implementada la estructura más favorable para el caso de mitigación y prevención de inundaciones para esta área. Donde se propone analizar dos tipos de SUDS específicamente

alcorques y pavimentos porosos donde se determinará el comportamiento hidráulico que obtenga mejor eficiencia ante los eventos de precipitación, detallando la selección cuidadosa de estas tipologías en busca de adaptar los diseños a las condiciones físicas, hidráulicas y de armonía con el progreso urbanístico existente en la zona de investigación.

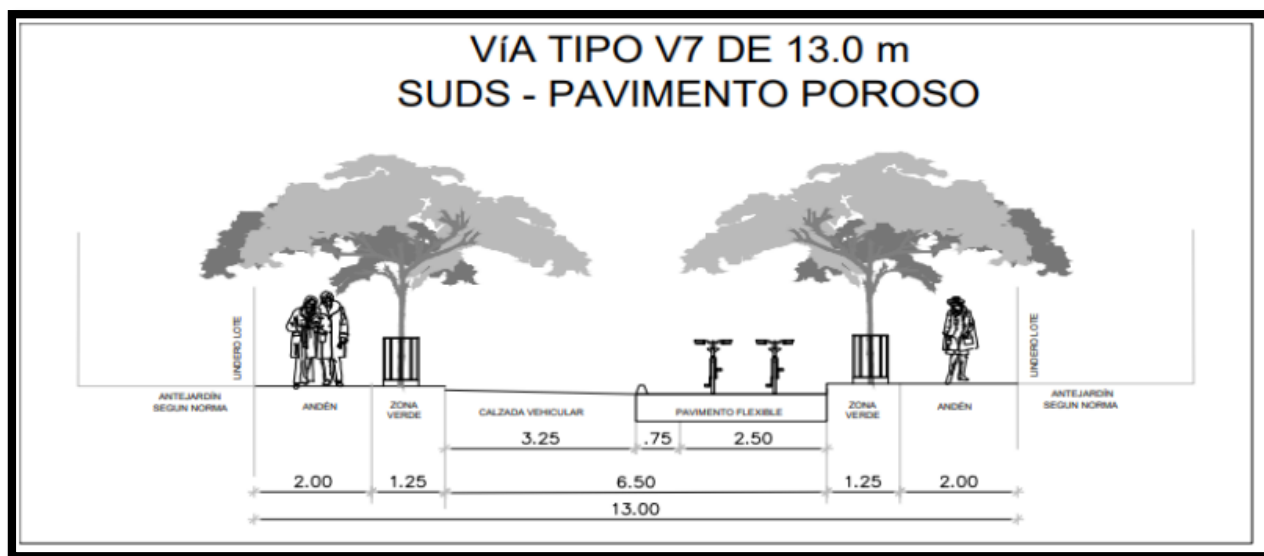
Villa Ruiz, (2018) Propone para esto, tres fases el cual se basan en la recolección y evaluación de datos vinculados a la zona de impacto en el área de estudios, el análisis hidráulico de la red de alcantarillado combinado de la región y la evaluación de las propiedades hidráulicas de los sistemas propuestos (alcorques y pavimentos porosos). Una vez analizadas estas fases se da paso al desarrollo del análisis del modelamiento hidráulico para así obtener la simulación del sistema de alcantarillado, junto la caracterización morfométrica de la cuenca de estudio y con esto el diseño del Sistema Urbano de Drenaje Sostenible mostrados en la ilustración 20 y ilustración 21.

Ilustración 21. *Implementación de Alcorques*



Tomado de (Villa Ruiz, 2018)

Ilustración 22. Diseño de pavimento poroso



Tomado de (Villa Ruiz, 2018)

Una vez evaluados ambas tipologías Villa Ruiz, (2018) argumenta la elección idónea para implementar en la región son recomendados los alcorques inundables, pues esta elección se sustenta en la limitada capacidad del espacio disponible para construir pavimentos permeables ya que no se podría gestionar el volumen que se requiere de agua.

Camargo et al., (2018) ´propone como solución de alternativa para mitigar el riesgo de inundaciones y las concentraciones de sustancias perjudiciales en cuerpos de agua en la autopista Norte, de la ciudad de Bogotá Colombia realizando un análisis detallado del área escogida para implementar los SUDS.

Para llevar a cabo el estudio Camargo et al., (2018) postula una metodología para organizar así la información y el diseño de la implementación de los SUDS, en donde se propone la recopilación de información del área donde se implementara, la determinación de la problemática y el reconocimiento de las falencias de este lugar, así como un análisis detallado

del riesgo de inundación de la ciudad, luego de esto para proceder a la selección del diseño de ubicación de los SUDS a implementar, teniéndose en cuenta el tipo de suelos y haciendo los respectivos ensayos para conocer la infiltración. Una vez realizados todos los estudios previos se dio paso a establecer la tipología de acuerdo a la conveniencia de la zona el cual de acuerdo a los estudios fueron adaptados los alcorques inundables y zanjas de infiltración ubicados en la zona mostrada por la ilustración 23.

Ilustración 23. *Zona a aplicar alcorques inundables*



Tomado de (Camargo et al., 2018)

Ciudades Esponjas como Estrategias Innovadoras para una Gestión Sostenible del Agua Urbana

Actualmente las áreas urbanas se encuentran confrontando desafíos ambientales que incluyen inundaciones recurrentes, contaminación derivada de la escorrentía presentada, malgasto de agua pluvial y deterioro ecológico, por lo que se han vuelto problemáticas como resultado de la construcción tradicional que complementa a la alteración del ciclo natural de las precipitaciones

(Kaur & Gupta, 2022). Como solución a esta problemática a causa del desarrollo urbano inmedible se ha optado como solución a una estrategia de gestión integrada del agua conocida como ciudades esponjas, con el propósito de enfrentar los problemas presentados por el progreso de las áreas urbanas (Ding et al., 2023).

De acuerdo con Zeng et al., (2023) la amenaza de inundaciones reflejadas en China cada vez han establecidos eventos de grandes crecidas, por lo tanto se han optado diversas estrategia para mitigar las inundaciones implementando y desarrollando un programa denominado la ciudades esponjas desde el 2015 como medida defensiva ante el fenómeno de crecidas, siendo tenidas en cuentas las acciones de infiltración, retención, purificación utilización y liberación con que contará el sistema para optimizar la utilización de agua lluvia y minimizar el impacto que trae el desarrollo urbano. El sistema de Ciudad Esponja podría contribuir a embellecer las ciudades, beneficiando el entorno de la vida como los recursos hídricos, esto a su vez podría elevar el nivel de satisfacción de os residentes con la calidad de vida que les ofrece el sistema (Köster, 2021).

Para el análisis de este sistema se hizo un estudio en donde se planteó analistas los artículos encontrados surgiendo un análisis en cuanto los documentos en el ámbito cuantitativo y cualitativo, la recolección de información sobre eventos catastróficos relacionado con inundaciones de China y el estudio de la cartografía. Teniendo como resultado de esta investigación los registros de inundaciones en China desde el año 2015 hasta 2022 y la muestra de aquellas provincias en donde se implementaron las ciudades esponjas y desde entonces se han visto con una disminución de las inundaciones, pero no una prevención en su totalidad al riesgo.

Análisis Global de los Estudios e Investigaciones Basadas en los Enfoques Naturales como Drenajes superficiales

Los desbordamientos en zonas Urbanas, son consideradas como un fenómeno natural adverso, el cual tienen lugar cuando las precipitaciones o la gestión del agua no puede evacuarse de manera rápida y efectiva mediante los sistemas de drenaje y otros cursos del agua (Nguyen et al., 2019). En vista de estos eventos surge la necesidad de innovar y hacer cada vez más los entornos sostenibles y eficaces para la gestión del agua.

Para el caso de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible se hace la inclusión de estrategias en donde se fundamentan en la gestión del agua, planteando alternativas como pavimentos permeables, techos verdes y zanjas de infiltración. A diferencia de las ciudades esponjas el cual su enfoque no es solo la gestión del agua si no, también abordar problemas urbanísticos en donde se vea el drenaje adecuado de las precipitaciones, la retención hasta llegar a un proceso de reutilización y aprovechamiento de la misma, sirviendo con esto para mejorar la calidad del agua y promover la biodiversidad.

Cabe recalcar que para los estudios encontrados en su mayoría estas alternativas han sido primeramente implementadas y fundamentadas en el continente de Asia, por el cual a diferencia en Latinoamérica aun no hace una adaptación de ciudades esponjas, si no, se fundamentan en la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles. Teniendo un análisis de esto en vista que, para ejemplar, países como china se encuentran como uno de los más sobrepoblados del mundo surgiendo así la necesidad de no solo implementar alternativas que ayuden con la gestión y el control hídrico, si no también, con el respectivo ciclo hidrológico de este.

Capítulo 4. Discusión Global de Estudios y avances Ingenieriles basados en el Drenaje

Superficial: Contribuciones Significativas a la Gestión Sostenible del Agua

Al concluir la investigación para la creación de la presente monografía, el cual tiene como objetivo presentar las contribuciones de las investigaciones y avances en el estudio de la gestión del agua, donde se proponen alternativas destinadas a abordar los problemas globales relacionados con este recurso, el cual permitió la complementación de los conocimientos convencionales adquiridos, al tiempo que busco en expandirlos consultando investigaciones a nivel mundial.

En primera instancia se hace una exploración de los programas computacionales de modelación utilizados para predecir y mitigar inundaciones. Entre los estudios destacados se encuentra el análisis hidrodinámico distribuido para procesos hidrológicos e hidráulicos de inundaciones urbanas, lo que proporciona una valiosa herramienta para comprender y gestionar los efectos de los eventos extremos de lluvia. En este contexto, se destaca la complejidad al desarrollo de modelos hidrológicos, donde se aprovecha el potencial de la inteligencia artificial y las tecnologías emergentes para abordar y resolver problemas de manera más eficiente y efectiva en comparación con enfoques convencionales. Es importante recalcar que este tipo de enfoques está siendo implementado principalmente en Asia, con el objetivo de avanzar en la modelación hidrológica y lograr mejoras significativas.

Así mismo, se profundiza en la simulación hidrológica de sistemas de drenaje utilizando el popular modelo SWMM, que es ampliamente utilizado en la ingeniería, y también se aborda el modelamiento hidrológico en HEC HMS, utilizado para analizar eventos de inundaciones y gestionar los recursos hídricos en diversas aplicaciones, el cual para ambos casos fueron encontradas fuentes considerables para el caso de Asia y Latinoamérica. En el contexto

latinoamericano, es importante destacar que la mayoría de los estudios se centran en la aplicación tradicional de herramientas de modelamiento hidrológico, en contraste con el desarrollo de mejoras para estas herramientas. A diferencia de regiones como Asia, donde se está avanzando en la implementación de nuevas tecnologías como anteriormente fue mencionado.

Seguidamente se dio paso a la investigación de los estudios y avances basados en infraestructuras para la gestión del flujo hídrico superficial, donde se destacan los avances en pavimentos permeables, el cual es una tecnología que ofrece una solución innovadora para mejorar la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos. se destaca la exhaustiva investigación que se realiza con el objetivo de mejorar los pavimentos permeables, en donde se notó los numerosos estudios dedicados al desarrollo y progreso de estos pavimentos, con el fin de contrarrestar los factores desfavorables observados en su utilización. Para este caso la implementación de estos pavimentos ha jugado un papel importante en una escala mundial ya que fueron encontrados diversos estudios donde son implementados desde parques hasta en carreteras, dándole un papel fundamental a su ejecución. Asimismo, se observa una gran implementación de sistemas SUDS principalmente en países asiáticos. Esto se debe a una serie de factores ambientales a los que estas zonas están siendo sometidas de acuerdo a lo comunicado en estos, lo que ha causado la necesidad de implementar acciones para gestionar de manera más sostenible el agua de lluvia en entornos urbanos. En comparación, en Latinoamérica se ha comenzado a implementar este tipo de sistemas, pero en menor magnitud y para ser más precisos en Colombia se ha empezado a adoptar esta medida, pero no a gran escala, por lo que realmente aquí aún se opta por las estructuras hidráulicas convencionales.

Conclusiones

Basándome en lo que hemos discutido anteriormente, se pueden derivar las siguientes conclusiones tras revisar y sintetizar la información recopilada en el transcurso de la monografía:

El estudio previo antes de la ejecución del diseño de una obra de drenaje es de suma importancia ya que estos ayudan a comprender la disponibilidad del agua, ayudando a estimar y predecir de una manera más real los eventos a los que pueden ser sometidos los elementos que se diseñen para la gestión del agua, dándole aquí la importancia al modelamiento hidrológico de las zonas, lo que ayudarían a proporcionar una base sólida para el diseño de sistemas de drenaje efectivos y eficientes. Siendo esto, sustentado en la importancia que se le da a nivel universal para comprender a fondo las características hidrológicas de una región antes de emprender cualquier iniciativa relacionada con la gestión de recursos hídricos.

Según la información investigada sobre los avances en infraestructuras para la gestión del flujo hídrico superficial, los pavimentos permeables están emergiendo como una opción cada vez más viable en comparación con otras alternativas. Esto se debe a las mejoras continuas en su diseño, que los hacen más efectivos para sus propósitos. Además, estos pavimentos están siendo ampliamente aceptados y adoptados a nivel mundial, lo que resalta su idoneidad como una opción óptima para contribuir al drenaje de aguas superficiales y al manejo general del flujo hídrico en superficie.

Ante la necesidad de explorar alternativas adicionales a los elementos hidráulicos tradicionales para gestionar y captar el flujo hídrico, han surgido conceptos innovadores como las "ciudades esponjas" y los sistemas de drenaje de desarrollo sostenible (SUDS). Estos enfoques están siendo ampliamente estudiados y adoptados en gran medida en Asia, donde la urbanización rápida ha generado desafíos significativos en términos de manejo del agua. En el

contexto de Latinoamérica, si bien aún no se ha adoptado ampliamente el concepto de ciudades esponjas, los SUDS están ganando terreno como una propuesta innovadora y sostenible para abordar los desafíos relacionados con la gestión del agua en áreas urbanas. La implementación progresiva de estos sistemas refleja un movimiento hacia prácticas más amigables con el medio ambiente y una mayor conciencia sobre la relevancia de la administración sustentable de los recursos hídricos en la región.

Finalmente, como aporte a lo desarrollado como opción a trabajo de grado, se destaca la manera de investigación que se lleva a cabo para desarrollar la monografía fundamentando las bases que se tenían de lo que era los drenajes superficiales, comprendiendo y complementando los estudios internacionales que han buscado reestructurar y mejorar las prácticas convencionales. Igualmente se observó un cambio significativo en la forma en que se abordan los desafíos relacionados con la gestión del agua, lo que ha dado lugar a la emergencia de nuevos términos y enfoques, como las ciudades esponjas y los sistemas de drenaje de desarrollo sostenible. Estos conceptos han surgido como resultado de la investigación internacional, que ha buscado innovar y mejorar las prácticas existentes para enfrentar de manera más eficiente los problemas de inundaciones, escasez de agua y degradación ambiental en entornos urbanos y rurales. Por el cual esto no solo demuestra una comprensión profunda de las tendencias actuales en el ámbito de la hidrología y el manejo hídrico, sino que también ofrece ideas innovadoras y soluciones prácticas que están siendo aplicadas en contextos locales y globales.

Referencias Bibliográficas

- Anta Álvarez, J., Naves García-Rendueles, A., & Naves García-Rendueles, J. (2019). *Introducción al cálculo de redes de saneamiento con SWMM*. Universidade da Coruña - Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497336>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P., Trewin, B., Achutarao, K., Adhikary, B., Allan, R., Armour, K., ... Zickfeld, K. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Bouhennache, R., Bouden, T., Taleb-Ahmed, A., & Cheddad, A. (2019). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*, 34(14), 1531-1551. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>
- Butler, D., Digman, C. J., Makropoulos, C., & Davies, J. W. (2018). *Urban Drainage*. CRC Press.
- Camargo-Ramírez, E. A., & Lozada-Chamorro, J. H. (2018). *Diseño de sistema urbano de drenaje sostenible en Bogotá, calle 127 con Autopista Norte*. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/6e514515-46c9-4f2d-9c72-4df9c9f94a9d>

- caprario et., al. (2019). *Influence of drainage network and compensatory techniques on urban flooding susceptibility* | *Water Science & Technology* | IWA Publishing.
<https://iwaponline.com/wst/article/79/6/1152/66734/Influence-of-drainage-network-and-compensatory>
- Díaz Mora, C. D., Coral Jojoa, D. A., & Ruiz Quiroga, L. H. (2019). *Diseño de obras de drenaje de la estructura vial para el condominio parcelación Caracolí ubicada en el km 3 vía del amor de la ciudad de Villavicencio*. <http://hdl.handle.net/20.500.12494/7732>
- Ding, M.-Q., Lu, M.-Y., Cui, C.-H., Ding, J., Pang, J.-W., Ren, N.-Q., & Yang, S.-S. (2023). ESSCC: A new multi-scale and extensively applicable evaluation system for the construction of sponge cities. *Sustainable Horizons*, 8, 100069.
<https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100069>
- Dollinger, J., Dagès, C., Bailly, J.-S., Lagacherie, P., & Voltz, M. (2015). Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 999-1020. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0301-6>
- Farina, A., Di Nardo, A., Gargano, R., van der Werf, J. A., & Greco, R. (2023). A simplified approach for the hydrological simulation of urban drainage systems with SWMM. *Journal of Hydrology*, 623, 129757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129757>
- Fischer, P., Pistre, S., & Marchand, P. (2022). Effect of fast drainage in karst sinkholes on surface runoff in Larzac Plateau, France. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 43, 101206. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101206>
- Guo, K., Guan, M., Yan, H., & Xia, X. (2023). A spatially distributed hydrodynamic model framework for urban flood hydrological and hydraulic processes involving drainage flow

- quantification. *Journal of Hydrology*, 625, 130135.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130135>
- Guptha, G. C., Swain, S., Al-Ansari, N., Taloor, A. K., & Dayal, D. (2022). Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban drainage system: A case study of Gurugram City, India. *Urban Climate*, 41, 101075. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101075>
- He, B.-J., Zhu, J., Zhao, D.-X., Gou, Z.-H., Qi, J.-D., & Wang, J. (2019). Co-benefits approach: Opportunities for implementing sponge city and urban heat island mitigation. *Land Use Policy*, 86, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.003>
- Hein, D., & Schaus, L. (2016). *Permeable Pavements for Roadway Shoulders*. 1151-1161.
<https://doi.org/10.1061/9780784479926.103>
- Higuera, E. A. O. (2015). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA, MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y MODELACIÓN HIDRÁULICA PARA LA CUENCA DEL CAUCE EN LA URBANIZACIÓN CIUDAD BLANCA, DEL MUNICIPIO SAN GIL, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, MEDIANTE EL USO DE LAS HERRAMIENTAS HEC-GEOHMS Y HEC-GEORAS*.
- Kaur, R., & Gupta, K. (2022). Blue-Green Infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: A geospatial approach. *City and Environment Interactions*, 16, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100087>
- Koohmishi, M., & Shafabakhsh, G. (2018). Drainage potential of reservoir course of porous pavement for various particle size distributions of aggregate. *Transportation Geotechnics*, 16, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.002>
- Köster, S. (2021). How the Sponge City becomes a supplementary water supply infrastructure. *Water-Energy Nexus*, 4, 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.02.002>

- Kröger, R., Cooper, C. M., & Moore, M. T. (2008). A preliminary study of an alternative controlled drainage strategy in surface drainage ditches: Low-grade weirs. *Agricultural Water Management*, 95(6), 678-684. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.006>
- Lebens, M. A., & Troyer, B. (2012). *Porous Asphalt Pavement Performance in Cold Regions* (MN/RC 2012-12). Article MN/RC 2012-12. <https://trid.trb.org/View/1212594>
- Lohmann, D., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Wood, E. F., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Desborough, C., Dickinson, R. E., Duan, Q., Ek, M., Gusev, Y. M., Habets, F., Irannejad, P., Koster, R., Mitchell, K. E., Nasonova, O. N., Noilhan, J., ... Zeng, Q. (1998). The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS) phase 2(c) Red–Arkansas River basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes. *Global and Planetary Change*, 19(1), 161-179. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00046-0)
- Lucke. (2013). *Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable? - University of the Sunshine Coast, Queensland*. <https://research.usc.edu.au/esploro/outputs/conferencePaper/Are-Infiltration-Capacities-of-Clogged-Permeable-Pavements-Still-Acceptable/99448619002621>
- Mayorga, E., Logsdon, M. G., Ballester, M. V. R., & Richey, J. E. (2005). Estimating cell-to-cell land surface drainage paths from digital channel networks, with an application to the Amazon basin. *Journal of Hydrology*, 315(1), 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.023>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G., Ding, J., & Liang, H. (2019). Implementation of a specific urban water management—Sponge City. *Science of The Total Environment*, 652, 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>

- Ortega, A. D., Rodríguez, J. P., & Bharati, L. (2023). Building flood-resilient cities by promoting SUDS adoption: A multi-sector analysis of barriers and benefits in Bogotá, Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103621.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103621>
- Otálvaro Barco, M. (2016). *Consideraciones generales para realizar el diseño hidrológico e hidráulico de obras de drenaje para vías de bajos volúmenes de tránsito. Caso de estudio pista de prueba Urrao-Antioquia*. <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2203>
- Phyo, A. P., Yabar, H., & Richards, D. (2023). Managing dam breach and flood inundation by HEC-RAS modeling and GIS mapping for disaster risk management. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100487.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100487>
- Rojas, R. (s. f.). *EVALUACION PRELIMINAR*.
- Romero Vanegas, A. J., Gómez Pachón, L. F., & Ronchaquira Sabogal, Y. Y. (2017). *Propuesta de diseño de un sistema de drenaje vial para el tramo de carretera terciaria San Joaquín- Alto del tigre en el municipio de La Mesa, Cundinamarca*.
<https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/5551>
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Ávila Díaz, Á. J. (2013). ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA. *Luna Azul*, 37, 219-238.
- Shao, M., Zhao, G., Kao, S.-C., Cuo, L., Rankin, C., & Gao, H. (2020). Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote water security—A case study of two adjacent basins in Texas. *Journal of Hydrology*, 589, 125154.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125154>

- Swain, S., Mishra, S. K., Pandey, A., & Dayal, D. (2022). Spatiotemporal assessment of precipitation variability, seasonality, and extreme characteristics over a Himalayan catchment. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 817-833.
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03861-0>
- Trujillo López, A., & Quiroz Lasprilla, D. P. (2013). *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*.
<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11174>
- Universidad Autónoma del Estado de México, Cárdenas Gutiérrez, E., Albiter Rodríguez, Á., Universidad Autónoma del Estado de México, Jaimes Jaramillo, J., & Universidad Autónoma del Estado de México. (2017). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. *CIENCIA ergo sum*, 24(2), 173-180. <https://doi.org/10.30878/ces.v24n2a9>
- Villa Ruiz, F. (2018a). *Estudio de factibilidad de la implementación de un sistema de drenaje basado en SUDS para un colegio en Colombia: Caso de estudio del Colegio Espíritu Santo de Villavicencio*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/b66788bffa5-43df-bd4f-a5339877d53f>
- Villa Ruiz, F. (2018b). *Estudio de factibilidad de la implementación de un sistema de drenaje basado en SUDS para un colegio en Colombia: Caso de estudio del Colegio Espíritu Santo de Villavicencio*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/b66788bffa5-43df-bd4f-a5339877d53f>
- Xu, S., Chen, Y., Zhang, Y., Chen, L., Sun, H., & Liu, J. (2023). Developing a framework for urban flood modeling in Data-poor regions. *Journal of Hydrology*, 617, 128985.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128985>

- Yu, T., Zhang, H., & Wang, Y. (2020). Interaction of asphalt and water between porous asphalt pavement voids with different aging stage and its significance to drainage. *Construction and Building Materials*, 252, 119085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119085>
- Zarate et al., (2020). (s. f.). *Repositorio UNJ: Modelado Hidrológico e Hidráulico del Drenaje Pluvial Mediante el Software SWMM para la Urbanización Monterrico de la Ciudad Jaén – Cajamarca*. Recuperado 8 de enero de 2024, de <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/281>
- Zeng, C., Aboagye, E. M., Li, H., & Che, S. (2023). Comments and recommendations on Sponge City—China’s solutions to prevent flooding risks. *Heliyon*, 9(1), e12745. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12745>
- Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., & He, P. (2016). Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. *The Science of the Total Environment*, 553, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.025>