

**Herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM para el modelado
de sistemas de drenaje en ambientes urbanos**

Johan Stiven Hurtado Espitia

Director

Diego Ivan Sánchez Tapiero

Ingeniero civil, MSc

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM para el modelado de
sistemas de drenaje en ambientes urbanos

Johan Stiven Hurtado Espitia

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Diego Ivan Sánchez Tapiero

Ingeniero civil, MSc

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

Dedicatoria

*Este trabajo de grado está dedicado a mi madre Virginia.
Tus enseñanzas y sacrificios me han guiado a lo largo de este camino, y
este logro es un reflejo de todo lo que has hecho por mí.*

Agradecimientos

*Primero, quiero agradecer a Dios por darme la fuerza y la sabiduría
para llegar a este punto. A mi madre, por su inquebrantable amor y
sacrificio, que han sido el pilar fundamental en mi vida. A mi tutor Diego
Iván Sánchez Tapiero, por su acompañamiento en este trabajo. Y a todas las
personas que hicieron parte de este camino, por su apoyo, orientación y
compañía en cada paso.*

Tabla de Contenido

Introducción	12
Capítulo 1.....	14
SWMM	14
Introducción SWMM.....	14
Evolución del SWMM:.....	14
¿Qué es EXTRAN?	15
Avances en la Modelación.....	16
Integración de Nuevas Tecnologías de Información (Década de 2000).....	17
Se incluyeron bases de datos relacionales como MySQL -PostgreSQL.....	18
SWMM 5.0 y su Enfoque en la Sostenibilidad y el Cambio Climático (2005)	18
Integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG)	18
Funciones actuales de SWMM.....	19
Modelado Hidrodinámico Avanzado	19
Modelado de Calidad del Agua.....	20
Flexibilidad para Datos de Entrada	20
Calibración y Validación Robustas.....	20
Infraestructura Verde y LID.....	20
Análisis de Escenarios y Cambio Climático	20
SWMM cuenta con 4 bloques principales.....	21
Las fuentes de entrada.....	21
Los núcleos centrales	21

Los mecanismos de corrección	21
El efecto (aguas receptoras)	21
Aplicaciones de SWMM	22
Capítulo 2.....	23
Herramientas 2D basadas en el software SWMM	23
PCSWMM.....	23
Modelación hidrológica e hidráulica.....	25
Infraestructura Verde (LID/SUD).	25
Modelado de aguas.	25
Modelado mediante hidráulica.	25
Simulación de la calidad del agua.	25
Integra modelado 1D-2D	25
Aplicable tanto al modelado de inundaciones rurales como urbanas.....	25
Crear una malla que sea flexible.....	26
Integración de entidades 1D perfecta.	26
InfoSWMM	26
¿Para qué se usa InfoSWMM?	27
Modelación 2D en InfoSWMM	28
Conexión de la zona 1D a 2D	33
XPSWMM.....	37
¿Para qué sirve el modelo en XPSWMM	38
Capítulo 3.....	40

Aplicaciones de las herramientas computacionales 2D	40
Análisis y Discusión	72
Conclusiones	75
Referencias.....	76

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Parámetros de calibración.</i>	45
Tabla 2 <i>Uso del suelo durante 2020-2035</i>	47
Tabla 3 <i>Características de las subcuencas de estudio.</i>	52
Tabla 4 <i>Datos para modelamiento hidrológico</i>	54
Tabla 5 <i>Distribución del uso de la tierra.</i>	60
Tabla 6 <i>Prácticas LID en PCSWMM.</i>	61
Tabla 7 <i>Escenarios del uso del suelo.</i>	63

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Aplicación de SWMM.</i>	19
Figura 2 <i>Mapa de infiltración de suelos.</i>	24
Figura 3 <i>Agregar datos.</i>	29
Figura 4 <i>Crear polígono 2D.</i>	30
Figura 5 <i>Atributos del polígono.</i>	31
Figura 6 <i>Menú 2D de infoSWMM.</i>	32
Figura 7 <i>Opciones de simulación.</i>	33
Figura 8 <i>Navegador de atributos.</i>	34
Figura 9 <i>Herramientas infoSWMM.</i>	36
Figura 10 <i>Modelo 2D e interfaz de InfoSWMM.</i>	37
Figura 11 <i>Interfaz XPSWMM.</i>	39
Figura 12 <i>Ubicación del área de estudio.</i>	41
Figura 13 <i>Metodología.</i>	42
Figura 14 <i>El trazado de la red.</i>	44
Figura 15 <i>Comparación de resultados simulados.</i>	46
Figura 16 <i>Inundación ciudad de Robe.</i>	49
Figura 17 <i>Vista esquemática del marco metodológico.</i>	51
Figura 18 <i>Área de estudio y medidores de caudal.</i>	52
Figura 19 <i>Diagramas de caja de los cambios en la esorrentía.</i>	54
Figura 20 <i>Ubicación de la cuenca de Sugar Creek en Illinois.</i>	58
Figura 21 <i>Cambio en el uso del suelo en la cuenca de Sugar.</i>	59
Figura 22 <i>Número de inundaciones.</i>	64

Figura 23 <i>Sitio de estudio (región Y, ciudad P, Corea)</i>	66
Figura 24 <i>Tipo de instalaciones LID.</i>	67
Figura 25 <i>Instalación LID aplicada por tipo.</i>	68
Figura 26 <i>División del área.</i>	69
Figura 27 <i>Resultados calibración.</i>	70
Figura 28 <i>Curva de escurrimiento.</i>	71

Resumen

El presente trabajo investiga el uso de herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM para modelar sistemas de drenaje en áreas urbanas, con un enfoque en la gestión eficiente de alcantarillados y la mitigación de inundaciones. La metodología incluye el uso de tres herramientas principales: PCSWMM, InfoSWMM y XPSWMM, que permiten una modelación hidrológica e hidráulica detallada, incorporando datos sobre uso del suelo, cambio climático y prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID). Las actividades realizadas abarcaron la calibración y validación de modelos, así como integraron sistemas de información geográfica (SIG) para optimizar el análisis espacial y la gestión de datos en el estudio. Para mejorar la precisión de las simulaciones. PCSWMM destaca por su capacidad para modelar infraestructuras verdes y su integración de entidades 1D y 2D, siendo aplicable en entornos rurales y urbanos; InfoSWMM ofrece modelación avanzada en 2D, permitiendo la conexión de zonas 1D y 2D, además de herramientas para simular la calidad del agua y evaluar escenarios de cambio climático; mientras que XPSWMM se enfoca en la simulación detallada de sistemas de drenaje urbano. Entre los resultados principales se encuentra la capacidad de estas herramientas para predecir y gestionar la respuesta del sistema de drenaje urbano ante eventos de precipitación extremos, así como para evaluar la efectividad de diversas estrategias de gestión de aguas pluviales. La conclusión principal es que estas herramientas son esenciales para la planificación y gestión sostenible de los sistemas de drenaje, contribuyendo significativamente a la resiliencia y sostenibilidad urbana ante los desafíos actuales y futuros, como la amplia construcción y el cambio climático. Este estudio destaca la relevancia de integrar tecnologías avanzadas y prácticas de desarrollo sostenible para mejorar la infraestructura urbana y proteger el medio ambiente.

Abstrac

The present work investigates the use of 2D computational tools based on SWMM software to model drainage systems in urban areas, with a focus on efficient sewer management and flood mitigation. The methodology includes the use of three main tools: PCSWMM, InfoSWMM and XPSWMM, which allow detailed hydrological and hydraulic modeling, incorporating data on land use, climate change and low impact development (LID) practices. The activities carried out covered the calibration and validation of models, as well as integrated geographic information systems (GIS) to optimize spatial analysis and data management in the study. To improve the accuracy of simulations. PCSWMM stands out for its ability to model green infrastructure and its integration of 1D and 2D entities, being applicable in rural and urban environments; InfoSWMM offers advanced 2D modeling, allowing the connection of 1D and 2D zones, as well as tools to simulate water quality and evaluate climate change scenarios; while XPSWMM focuses on the detailed simulation of urban drainage systems. Among the main results is the ability of these tools to predict and manage the response of the urban drainage system to extreme precipitation events, as well as to evaluate the effectiveness of various stormwater management strategies. The main conclusion is that these tools are essential for the sustainable planning and management of drainage systems, contributing significantly to urban resilience and sustainability in the face of current and future challenges, such as extensive construction and climate change. This study highlights the relevance of integrating advanced technologies and sustainable development practices to improve urban infrastructure and protect the environment.

Introducción

El diseño y gestión eficiente de sistemas de alcantarillado son cruciales para el desarrollo sostenible de las ciudades y la protección ambiental. La urbanización acelerada y el cambio climático han complicado el manejo de aguas pluviales y residuales, incrementando la frecuencia e intensidad de las inundaciones urbanas. Por ello, es vital que la nueva generación de ingenieros explore e investigue soluciones posibles utilizando herramientas que faciliten el modelado de drenaje de aguas pluviales.

La herramienta de modelación hidráulica SWMM es ampliamente utilizada a nivel mundial para planificar, analizar y diseñar sistemas de alcantarillado pluvial. SWMM permite a los ingenieros y planificadores urbanos simular el comportamiento de las redes de drenaje, proporcionando una visión detallada del flujo de agua en diversos entornos. Con el tiempo, esta tecnología ha mejorado significativamente, integrando el modelado en 2D. Esto ha potenciado sus aplicaciones, haciéndolas más detalladas y realistas, lo cual es fundamental para comprender cómo se mueven y acumulan las aguas pluviales en áreas urbanas densamente pobladas, donde las características topográficas y la infraestructura urbana juegan un papel crucial.

En esta monografía se analizarán herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM, como PCSWMM, InfoSWMM y XPSWMM, y su aplicación en el modelado de sistemas de drenaje en ambientes urbanos. Dada la complejidad e importancia de la gestión eficiente de aguas lluvia en áreas urbanas, se empleará una amplia variedad de fuentes para proporcionar un análisis exhaustivo y fundamentado. Se utilizarán libros, documentos técnicos, tesis académicas, artículos de revistas científicas y otros recursos relevantes para abordar

integralmente los avances, aplicaciones y beneficios de estas herramientas de modelado. A través de la revisión y síntesis de estos materiales, se buscará proporcionar una comprensión detallada de cómo estas tecnologías contribuyen a la sostenibilidad y resiliencia urbana frente a los desafíos actuales y futuros relacionados con la gestión de aguas pluviales y la planificación urbana.

Capítulo 1

SWMM

Introducción SWMM

Según (INDEAN, 2022), el avance tecnológico global ha impulsado una evolución acelerada en casi todos los ámbitos y sectores económicos y sociales, la ingeniería no ha quedado al margen de este rápido desarrollo. Constantemente se presentan nuevos softwares de modelado y metodologías de trabajo. En la actualidad, es habitual que se desarrollen grandes proyectos urbanos que requieren un análisis minucioso del comportamiento y gestión de los sistemas de distribución de agua potable y manejo de aguas lluvias y residuales. Para alcanzar este objetivo, los ingenieros deben utilizar herramientas que permitan modelar el flujo de manera realista e incorporar elementos que ayuden a retener y mitigar el aumento de caudal generado por el proyecto en el área de estudio como es el caso de SWMM.

De acuerdo con(Herrera, 2023), *SWMM (Storm Water Management Model)* que por sus siglas en español significa Modelo de gestión de aguas pluviales. Se trata de una aplicación informática especializada en simular el comportamiento de los sistemas de agua en entornos urbanos, incluyendo cómo funcionan los ríos y las tuberías de alcantarillado cuando llueve, mostrando de manera precisa cómo interactúan los elementos del sistema de drenaje y los dispositivos de almacenamiento y regulación del agua.

Evolución del SWMM:

SWMM fue desarrollado inicialmente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Su objetivo principal era ofrecer una herramienta para evaluar el impacto de los sistemas de drenaje urbano en la calidad del agua. Las versiones tempranas de SWMM

utilizaban métodos de modelado simplificados y tenían capacidades limitadas para simular sistemas de drenaje complejos. No obstante, el modelo fue bien recibido por la comunidad de ingeniería del agua, convirtiéndose rápidamente en una herramienta estándar para el análisis de aguas pluviales (US EPA, 2014).

Según (*SWMM Theory - Innovyze, 2021*) SWMM, fue creado entre 1969 y 1971. Este modelo era capaz de representar el escurrimiento de aguas lluvias urbanas y los fenómenos combinados de desbordamiento de alcantarillado. El modelo se puede utilizar para investigar problemas de calidad y cantidad, así como opciones de control, y también se pueden obtener estimaciones de costos para controles de almacenamiento y/o tratamiento. La eficacia puede evaluarse inspeccionando hidrogramas, contaminadores, cargas contaminantes y cambios modelados en la calidad del agua receptora.

La creación del programa EXTRAN se remonta a principios de los años 60 y se inspiró en la Bahía de San Francisco como modelo. El modo inicial utilizaba un modelo de agua de nodo de enlace. Se utilizó un enfoque de velocidad constante durante el desarrollo inicial de EXTRAN, pero luego se descubrió que esto producía soluciones extremadamente inestables. Se agregó capacidad adicional a principios de la década de 1970 para simular las áreas de tierras altas que contribuyen al escurrimiento de aguas pluviales a la Bahía de San Francisco. La EPA compró este modelo y lo agregó al paquete SWMM en 1974. Lo llamó Modelo de Transporte Extendido, o EXTRAN, para diferenciarlo del Bloque de Transporte que la Universidad de Florida creó como parte del paquete SWMM original (*SWMM Theory - Innovyze, 2021*).

¿Qué es EXTRAN?

Como señala (*SWMM Theory - Innovyze, 2021*) El modelo de enrutamiento de flujo hidráulico EXTRAN (Dynamic Wave) se utiliza para canales abiertos y conductos cerrados en

redes dendríticas y en bucle. Con la ayuda de un archivo de interfaz, un bloque aguas arriba (como el bloque de escorrentía) y/o la información directa del usuario, EXTRAN puede obtener información del hidrograma en ubicaciones nodales específicas. El modelo enrutó continuamente los flujos de aguas pluviales y sanitarias a lo largo del sistema principal de drenaje pluvial hasta los puntos de desagüe del sistema de agua receptor. En el software se conoce como método de onda dinámica. Se requiere un modelo que represente todos los términos de la ecuación de flujo dinámico unidimensional porque el flujo en las alcantarillas suele ser no uniforme, turbulento y sujeto a remansos y sobrecargas. El modelo EXTRAN representará redes ramificadas o en bucle, flujo en superficie libre, flujo de presión o sobrecarga, inversiones de flujo, transferencia de flujo a través de presas, orificios y sistemas de bombeo, y almacenamiento en estanques o lagos. Los tipos de canales que se pueden simular incluyen tubos circulares, rectangulares, de herradura, con forma de huevo o de cesta, canales trapezoidales, parabólicos, naturales (irregulares), orificios circulares y rectangulares y formas arbitrarias de conductos cerrados.

Avances en la Modelación

Durante las décadas de 1980 y 1990, (SWMM) experimentó significativos avances en la modelación hidráulica y de calidad del agua. Estos avances resultaron en una mayor precisión, flexibilidad y capacidad del modelo para simular una amplia gama de escenarios y condiciones. Durante este período, se corrigieron errores en todos los módulos y se mejoraron los problemas de convergencia. Se implementó la capacidad de "inicio en caliente", permitiendo reiniciar la simulación desde el final de una ejecución anterior. Además, se introdujeron mejoras en los procedimientos de enrutamiento de flujo y manejo de recargos, así como la configuración automática de la longitud de las tuberías para tuberías cortas. Para las simulaciones de calidad del agua, la salida de SWMM se podía conectar a los programas DYNHYD4 (cantidad de agua) y

WASP4 (calidad del agua). Tanto DYNHYD4 como WASP4 tenían la capacidad de leer archivos de interfaz de escorrentía, transportar, almacenar/tratar y extraer datos. DYNHYD4 solo leía los flujos del archivo de interfaz, mientras que WASP4 leía las tasas de carga de calidad de agua relacionadas con la escorrentía, transporte, almacenamiento y tratamiento. Además, se implementó el método de la onda cinética.(Zapata-Sierra & Manzano-Agugliaro, 2010). Este método permitió una representación más precisa del flujo en canales y tuberías, especialmente en situaciones de flujo no uniforme y transitorio. También se desarrollaron modelos de flujo subterráneo, que se integraron para simular la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea. Esto fue crucial para comprender la recarga de acuíferos y la contaminación del agua subterránea.

Desarrollo de modelos de calidad del agua de primer orden; Se implementaron modelos de calidad del agua de primer orden para simular la degradación de contaminantes orgánicos, lo que permitió evaluar el impacto de las descargas de aguas residuales en el sistema de drenaje(Tu & Smith, 2018).

Estas mejoras en la modelación hidráulica y de calidad del agua expandieron significativamente las capacidades de SWMM, haciéndolo más versátil y aplicable a una gama más amplia de problemas ambientales. Los usuarios del modelo pudieron abordar problemas complejos relacionados con la contaminación del agua, la erosión y la sedimentación, y el manejo de aguas pluviales.

Integración de Nuevas Tecnologías de Información (Década de 2000)

La década del 2000 marcó un período de transformación significativa en el SWMM. La integración de nuevas tecnologías de información expandió las capacidades del modelo, lo adaptó a las necesidades cambiantes de la gestión de aguas generadas por la lluvia en la era digital y sentó las bases para su uso generalizado en la actualidad.

Se incluyeron bases de datos relacionales como MySQL -PostgreSQL

Para almacenar grandes cantidades de datos de lluvia, caudal, calidad del agua y otros parámetros relevantes para el modelado SWMM. Organizar, consultar y actualizar de manera eficiente los datos utilizados en los modelos. Conectar datos de diferentes fuentes, como estaciones meteorológicas, sensores de calidad del agua y sistemas de monitoreo de caudal.

SWMM 5.0 y su Enfoque en la Sostenibilidad y el Cambio Climático (2005)

Según (Gironás et al., 2010) el lanzamiento de SWMM 5.0 en 2005 marcó un avance significativo. Se rediseñó el motor de simulación, mejorando tanto la precisión como la eficiencia computacional. Además, se integraron prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID) y estrategias de infraestructura verde, reflejando un enfoque más sostenible en la gestión de aguas generadas por la lluvia.

Integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La integración con sistemas de información geográfica (SIG) y la adopción de plataformas de código abierto han ampliado considerablemente las aplicaciones de SWMM. Estas integraciones han permitido a los usuarios realizar análisis espaciales más detallados y acceder a una comunidad de desarrolladores que contribuyen con nuevas funcionalidades y mejoras (Dotto et al., 2014).

Permitiendo de esta manera:

Visualizar: Representar gráficamente redes de tuberías, cuencas hidrográficas, características del terreno y otros datos espaciales relevantes para el modelado SWMM.

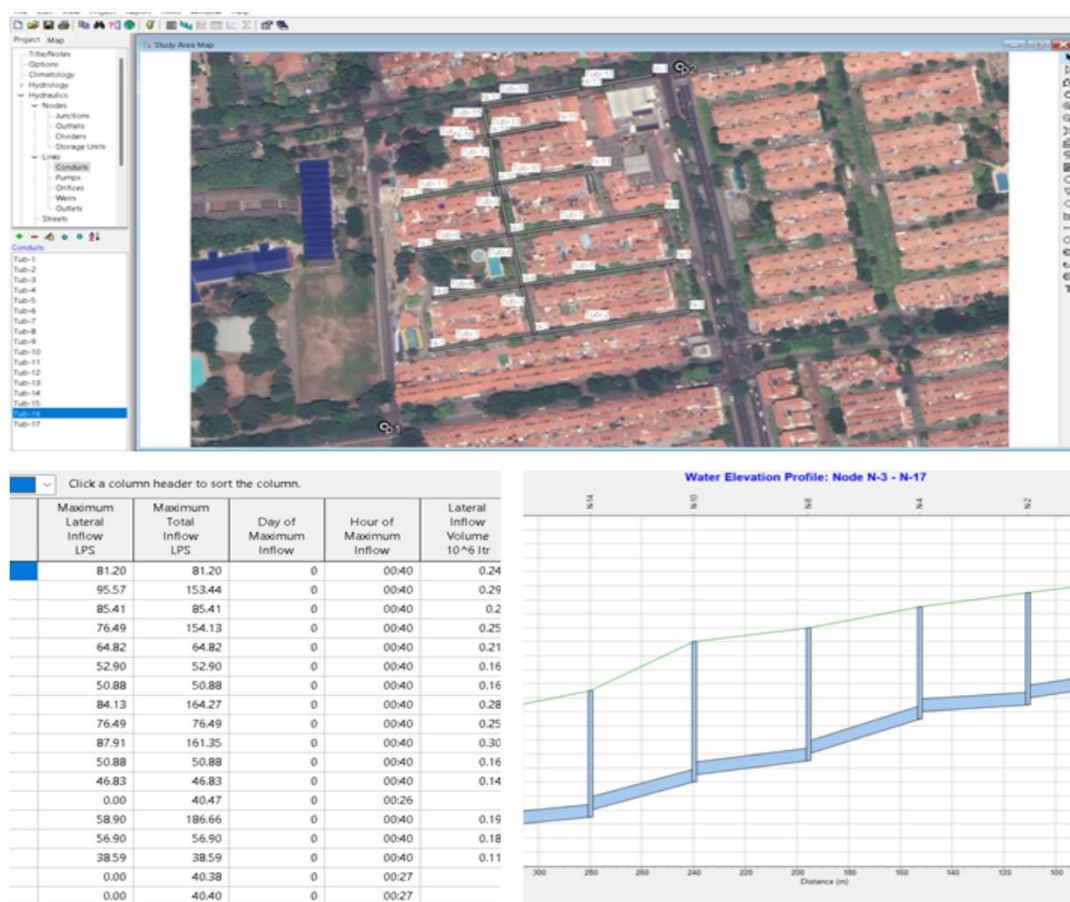
Analizar: Superponer y analizar datos de diferentes fuentes, como mapas de suelo, uso del suelo y precipitación, para comprender mejor las características del sistema de drenaje y su entorno.

Crear modelos: Generar modelos SWMM más precisos y representativos al incorporar información espacial detallada.

Funciones actuales de SWMM

Figura 1

Aplicación de SWMM.



Nota. La figura muestra un ejemplo realizado en SWMM.

Modelado Hidrodinámico Avanzado

SWMM permite modelar sistemas de alcantarillado combinados y separados, así como redes de drenaje pluvial. Utiliza métodos numéricos avanzados para resolver las ecuaciones de

flujo de Saint-Venant, lo que permite simular eventos de lluvias intensas y el comportamiento hidráulico de sistemas complejos (Huber & Dickinson, 1988).

Modelado de Calidad del Agua

De acuerdo con (Lee & Bang, 2000) SWMM también modela la calidad del agua al simular el transporte de contaminantes en sistemas de drenaje urbano, incluyendo sedimentos, nutrientes, bacterias, metales pesados y la transformación de contaminantes en el agua pluvial. Esto es crucial para evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión de aguas generadas por la lluvia en la reducción de contaminantes.

Flexibilidad para Datos de Entrada

SWMM puede aceptar una amplia gama de datos de entrada, incluyendo datos topográficos, características del suelo, uso del suelo y patrones de precipitación (Olivera et al., 2017).

Calibración y Validación Robustas

SWMM permite calibrar y validar modelos mediante la comparación de resultados simulados con datos observados, asegurando la precisión y confiabilidad de las simulaciones (Qi et al., 2021).

Infraestructura Verde y LID

La inclusión de prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID) en SWMM permite a los usuarios evaluar estrategias como jardines de lluvia, techos verdes y pavimentos permeables, que ayudan a reducir la escorrentía y mejorar la infiltración del agua (L. M. Ahiablame et al., 2012).

Análisis de Escenarios y Cambio Climático

Las capacidades de modelación de SWMM se han ampliado para incluir análisis de escenarios y evaluaciones de impacto del cambio climático. Esto permite a los planificadores

urbanos y gestores de recursos hídricos desarrollar estrategias más resilientes frente a eventos extremos y cambios en los patrones de precipitación (Semadeni-Davies et al., 2008).

El SWMM es una herramienta valiosa para el modelado de sistemas de drenaje urbano. Su capacidad para simular el comportamiento del agua y el transporte de contaminantes lo convierte en una herramienta útil para una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones del modelo al utilizarlo, según (*SWMM Theory - Innovyze*, 2021)

SWMM cuenta con 4 bloques principales.

Las fuentes de entrada

El Bloque de Escorrentía produce escorrentía superficial y subterránea en función de hietogramas de lluvia y deshielo arbitrarios, condiciones previas, uso de la tierra y topografía. El bloque de transporte se puede utilizar para generar flujo en clima seco e infiltración en el sistema de alcantarillado.

Los núcleos centrales

Son los Bloques de Escorrentía, Transporte y Transporte Extendido. Los Bloques de Escorrentía y Transporte Extendido encaminan los flujos y los contaminantes a través del sistema de alcantarillado o drenaje. Actualmente, el recorrido de contaminantes no está disponible en el Bloque Extran. Se pueden realizar recorridos hidráulicos muy complejos con Extran.

Los mecanismos de corrección

El bloque de almacenamiento y tratamiento describe cómo los dispositivos de control afectan el flujo y la calidad. Además, se realizan cálculos de costos básicos.

El efecto (aguas receptoras)

SWMM no incluye un modelo de agua receptora. El marco SWMM ya no incluye el bloque receptor de agua. Sin embargo, se incluyen los modelos EPA WASP y DYNHYD.

Aplicaciones de SWMM

(James et al., 2023) describe que SWMM se ha utilizado en numerosos estudios de aguas de alcantarillado y aguas generadas por la lluvia en todo el mundo desde su creación. Las aplicaciones comunes son: la planificación y ajuste de componentes en sistemas de drenaje para prevenir inundaciones, así como el dimensionamiento y selección de instalaciones de detención y sus complementos para evitar desbordamientos e incluso proteger la calidad del agua. También se incluye la labor de mapear las áreas propensas a inundaciones en canales naturales, la elaboración de estrategias para minimizar los desbordamientos en sistemas de alcantarillado, el análisis de cómo las corrientes y la infiltración influyen en los desbordamientos en sistemas de alcantarillado sanitario, la monitorización en tiempo real de los flujos en un sistema de alcantarillado mediante un software especializado y la simulación de ondas superficiales no estacionarias en un entorno bidimensional simulado con el SIG de PCSWMM. Además, se requiere la creación de estimaciones de contaminantes provenientes de múltiples fuentes para investigaciones relacionadas con la carga contaminante y la evaluación de la efectividad de las medidas diseñadas para reducir la contaminación.

Capítulo 2

Herramientas 2D basadas en el software SWMM

El software SWMM (Storm Water Management Model) ofrece una amplia gama de herramientas computacionales en 2D para el modelado hidrodinámico y de la calidad del agua en sistemas de drenaje urbano. Estas herramientas permiten a los ingenieros, científicos y profesionales del agua simular el flujo del agua en superficies inundadas, lo que es crucial para evaluar el riesgo de inundaciones, diseñar soluciones de drenaje efectivas y gestionar emergencias por inundaciones.

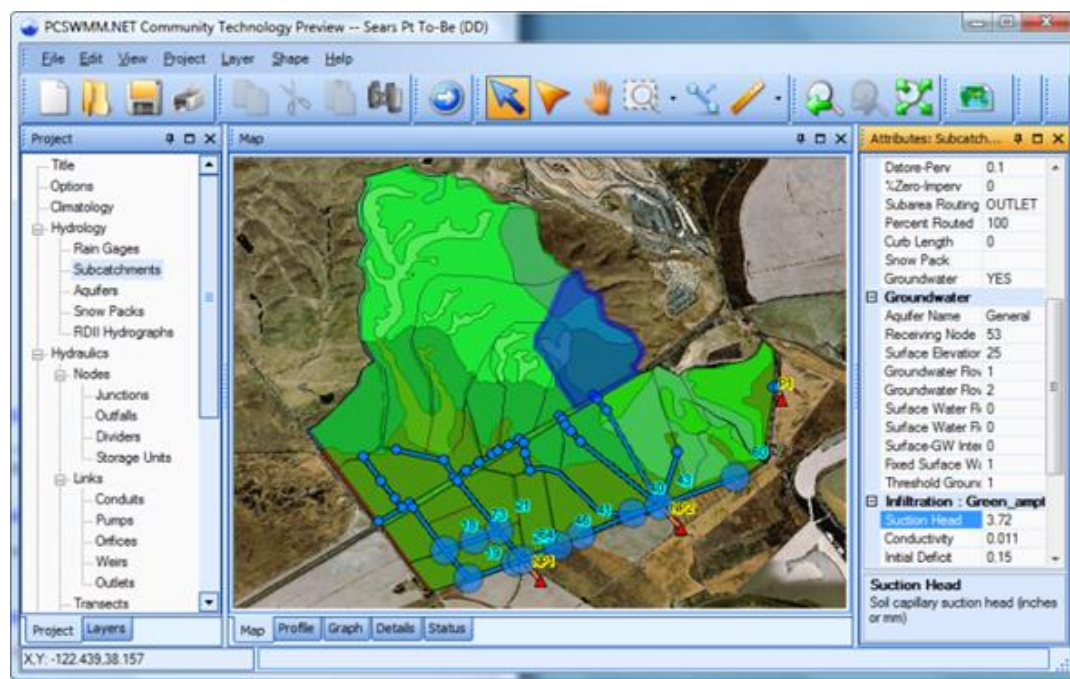
A continuación, se presenta una descripción general de las principales herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM.

PCSWMM

PCSWMM, publicado por primera vez en 1984, se ha desarrollado continuamente con actualizaciones periódicas, y cada dos años se publican versiones sustancialmente mejoradas. El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales por Computadora Personal (PCSWMM) es un modelo dinámico para simular la escorrentía de lluvia para un evento único o un período de largo plazo en áreas urbanas (Bibi et al., 2023).

Figura 2

Mapa de infiltración de suelos.



Nota. La figura muestra el área de infiltración del suelo en PCSWMM. Fuente: (Urban Drainage Application, s. f.)

Con la ayuda de hietogramas, PCSWMM modela la red de manera detallada y utiliza el editor gráfico para predecir su comportamiento; además, simula eventos reales de lluvia. ArcGIS facilita un análisis rápido e intuitivo de la situación de la cuenca y de la red de alcantarillado (Morales & Matamoros, 2009).

Modelación hidrológica e hidráulica

Infraestructura Verde (LID/SUD).

Modelado físico de células de biorretención, canales vegetativos, techos verdes, barriles de lluvia, trincheras de infiltración, jardines de lluvia, pavimento permeable y otras configuraciones de desarrollo de bajo impacto.

Modelado de aguas.

Modelo de lluvia superficial, deshielo, interceptación, evapotranspiración, infiltración, almacenamiento de detención, agua subterránea y escorrentía superficial en un evento único o continuo.

Modelado mediante hidráulica.

Modelado de la distribución de agua de tanques, embalses, tuberías, bombas y válvulas, así como modelado en estado estacionario, cinemático y totalmente dinámico de ríos naturales, alcantarillas, puentes, alcantarillas pluviales, sanitarias y combinadas, bombas, presas, orificios y controles en tiempo real.

Simulación de la calidad del agua.

La producción, el lavado, el transporte y el tratamiento de contaminantes de fuentes puntuales y difusas para áreas urbanas y rurales, incluidas las aguas subterráneas.

Integra modelado 1D-2D

Aplicable tanto al modelado de inundaciones rurales como urbanas.

Modelado de inundaciones urbanas, análisis mayor/menor (drenaje dual) y enrutamiento de precipitaciones terrestre.

Crear una malla que sea flexible.

Creación automatizada de mallas estructuradas o no estructuradas con obstrucciones, bordes definidos, líneas de ruptura, condiciones de límite sin puntos y otros elementos.

Integración de entidades 1D perfecta.

La malla 2D integra fácilmente sumideros, bombas, orificios, vertederos, salidas, alcantarillas y puentes.

Analizar y representar los resultados.

El PCSWMM incluye 4 módulos de servicio y 4 módulos hidráulicos, los cuales se pueden utilizar en el diseño de sistemas de aguas lluvias, aguas servidas o plantas de tratamiento. El módulo principal para el diseño sanitario de redes de alcantarillado es el EXTRAN. Este módulo utiliza como datos de entrada los resultados del módulo RUNOFF, el cual se encarga de introducir el agua de escorrentía en la red de alcantarillado. El EXTRAN modela el flujo de agua a través de los ductos y nodos de la red (Morales & Matamoras, 2009).

InfoSWMM

Según (Innovyze, 2022) Para una gestión efectiva de los sistemas urbanos de recolección de aguas generadas por la lluvia y residuales, InfoSWMM es un modelo avanzado que simula la calidad, hidráulica e hidrológica del agua. Este software dinámico permite el análisis y modelado de aguas residuales y pluviales geoespaciales, abarcando toda la fase terrestre del ciclo hidrológico en áreas urbanas. InfoSWMM puede simular la lluvia y escorrentía, considerando factores como clima, suelo, uso del suelo y topografía, tanto para eventos únicos como prolongados. Además de prever la cantidad de escorrentía, el modelo también evalúa su calidad, incluyendo la acumulación

y el lavado de contaminantes en zonas urbanas. El enrutamiento del agua se realiza a través de tuberías, canales, sistemas de almacenamiento/tratamiento, bombas y reguladores hidráulicos, utilizando diferentes métodos de enrutamiento. InfoSWMM también ofrece un esquema de control en tiempo real altamente sofisticado para la gestión operativa de las estructuras hidráulicas.

La tecnología de gestión de infraestructura ha progresado rápidamente en los últimos años. Actualmente, esta tecnología se está utilizando en el modelado de sistemas de recolección de aguas urbanas. Ha permitido que las aplicaciones de modelado de sistemas de recolección de alcantarillado pasen de un entorno tradicionalmente no gráfico y no intuitivo a uno que adopta los estándares actuales de software de productividad gráfico interactivo y fácil de usar. InfoSWMM proporciona cuatro capacidades principales para el modelado y análisis de sistemas urbanos de recolección de aguas generadas por la lluvia y residuales (*Innovyze, 2022*)

¿Para qué se usa InfoSWMM?

Creación de modelos de sistemas de recopilación: InfoSWMM se creó para facilitar y automatizar en gran medida una gran cantidad de tareas relacionadas con la recopilación y la gestión de datos en el modelado de sistemas de recopilación. El usuario puede crear una representación precisa del sistema de recolección con un mapa del sistema, atributos necesarios para el análisis y otros atributos definidos por el usuario a través de su potente e intuitiva interfaz basada en menús.

Crear simulaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua: puede realizar una variedad de simulaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua al crear una representación adecuada del sistema de recolección.

Integración de información con otras aplicaciones: InfoSWMM funciona con otras aplicaciones de Windows, incluidas aplicaciones CAD y GIS. Las aplicaciones de presentación,

hojas de cálculo, bases de datos relacionales, mapas y sistemas de información geográfica intercambian fácilmente datos con otras.

Análisis de los resultados del modelo: después de cada simulación, el usuario puede ver, consultar y mostrar los resultados del análisis utilizando sofisticadas herramientas de presentación gráfica, como anotación/etiquetado de mapas dinámicos, codificación de colores, gráficos, contornos, perfiles, informes tabulares personalizables y VCR vívidos. Animación de estilo para obtener resultados muy atractivos.(*Innovyze*, 2022).

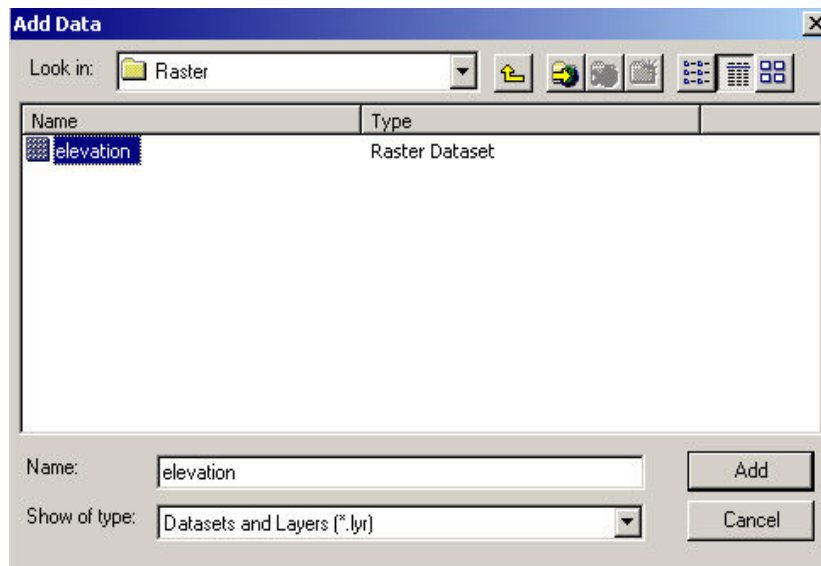
Modelación 2D en InfoSWMM

Pasos para la creación de la malla 2D

Paso 1: De acuerdo con (*Innovyze*, 2022) para agregar datos de la superficie del terreno al mapa. Haga clic en el botón Agregar datos de ArcMap. Busque la ubicación de la capa de la superficie del suelo. Se admiten muchos formatos diferentes.

Figura 3

Agregar datos.



Nota. La figura muestra como agregar capa de la superficie del suelo. Fuente: (Innovyze, 2022).

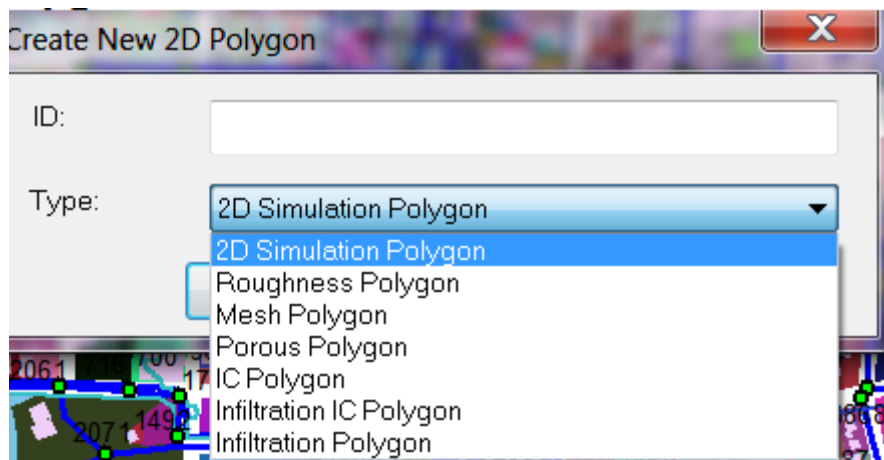
Paso 2: Crear polígonos de simulación 2D

Seguidamente (Innovyze, 2022) plantea crear el polígono 2D de la barra de herramientas 2D de InfoSWMM con los siguientes pasos.

- Digitalice el polígono haciendo clic en el área de dibujo de ArcMap en el primer vértice y luego haga clic en vértices adicionales según sea necesario. Haga doble clic en el último vértice para completar el polígono.
- Asigne al polígono una identificación única (y una descripción opcional si lo desea). Elija 'Polígono de simulación 2D' como Tipo.
- Observe que los atributos del polígono que acaba de crear se muestran en la pestaña 2D en el Explorador de atributos.

Figura 4

Crear polígono 2D.

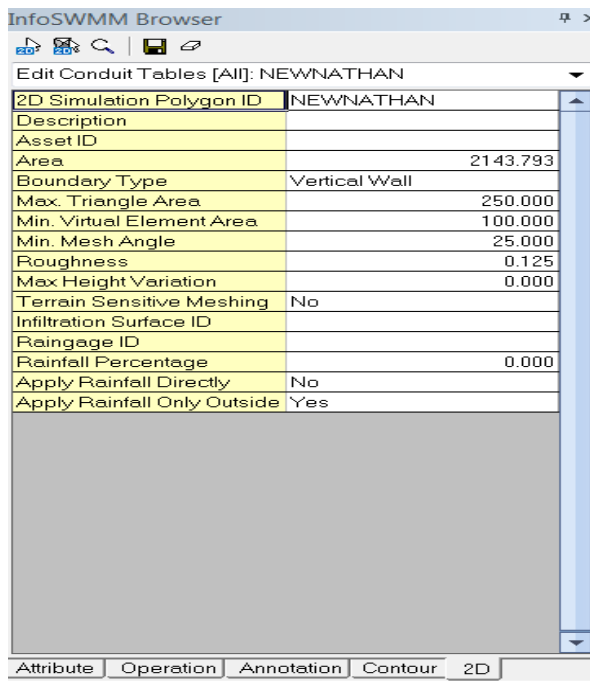


Nota. La figura muestra como crear un polígono en InfoSWMM. Fuente: (Innovyze, 2022).

- Observe que los atributos del polígono que acaba de crear se muestran en la pestaña 2D en el Explorador de atributos; Ajuste los atributos según sea necesario para adaptarse a su situación de modelado. Para obtener una descripción de los atributos, haga clic en Polígono de simulación 2D.

Figura 5

Atributos del polígono.



Nota. La figura muestra la pestaña de atributos del polígono. Fuente: (Innovyze, 2022).

Paso 3: Cree objetos de modificación de zona 2D opcionales según sea necesario

(Innovyze, 2022) determina qué objetos de modificación de la Zona 2D necesitará para modelar correctamente las características de la superficie del terreno y cualquier obstrucción de flujo en la Zona 2D. Los objetos de modificación disponibles son:

- Límite 2D
- Polilínea de ruptura 2D
- Polígono de condiciones iniciales 2D
- Polígono de malla 2D
- Polígono poroso 2D
- Polilínea de pared porosa 2D

- Polígono de rugosidad 2D

Paso 4: Añadir objetos de origen puntual 2D.

Si hay fuentes de flujo sobre la superficie del suelo, como manantiales de agua o pozos artesianos, agregue una fuente de puntos 2D a la simulación 2D.

Paso 5: Establecer configuraciones iniciales

Configurar las condiciones iniciales para la Zona 2D con frecuencia es útil. Esto se logra mediante la creación de configuraciones de condición inicial y la asignación de estas configuraciones a polígonos de simulación 2D y polígonos IC. En esa ubicación, las condiciones iniciales de los polígonos IC anularán las condiciones iniciales del polígono de simulación 2D.

Figura 6

Menú 2D de infoSWMM.

Nota. La figura muestra como configurar las condiciones iniciales para la Zona 2D. Fuente: (Innovyze, 2022).

Conexión de la zona 1D a 2D

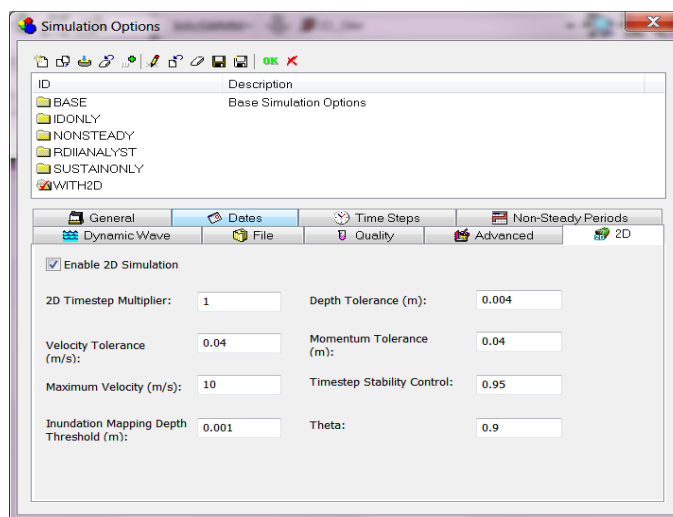
Para pasar un modelo de 1D a 2D implica estructurar los datos de una forma lineal a una forma bidimensional, lo cual es útil para diversas aplicaciones en análisis de datos. En cuanto a InfoSWMM lo realiza de manera sencilla de la siguiente manera.

Paso 1: Habilitar las opciones en 2D

- Seleccione la pestaña 2D después de abrir las opciones de simulación relacionadas con el escenario al que desea aplicar la Zona 2D.
- Configure los parámetros de la simulación 2D seleccionando la opción "Habilitar simulación 2D". Haga clic en Opciones de simulación 2D para ver una descripción de los parámetros.
- En la pestaña General de las opciones de simulación de InfoSWMM, configure Dynamic Wave como modelo de enrutamiento.

Figura 7

Opciones de simulación.



Nota. La figura muestra los parámetros de simulación. Fuente: (Innovyze, 2022).

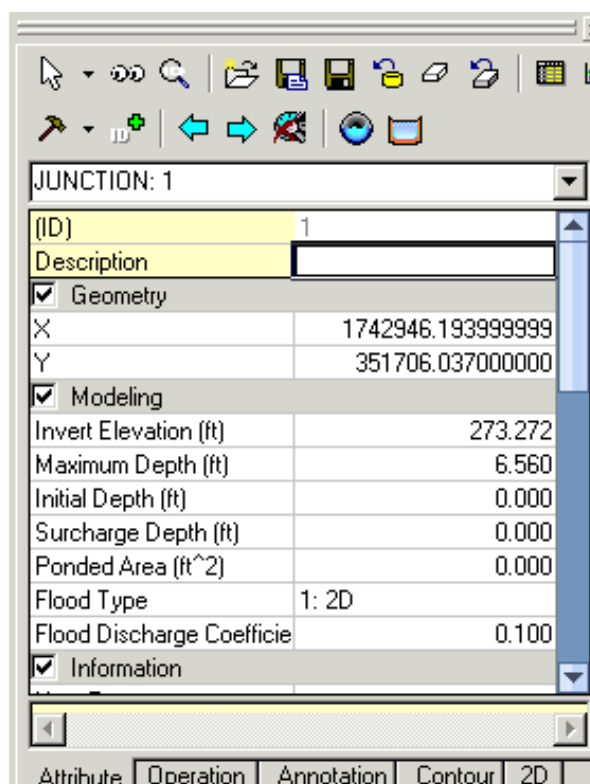
Paso 2: Establecer cruces 1D para interactuar con la región 2D.

(Innovyze, 2022), Menciona que el borde de las uniones 1D conecta la red 1D (subterránea) y la zona 2D (terrestre). Las uniones que interactuarán con la Zona 2D y sus elevaciones de borde deben estar alineadas con la Malla 2D.

En el navegador de atributos InfoSWMM, seleccione el tipo de inundación 2D para permitir que un cruce 1D pase el flujo hacia adelante y hacia atrás a la zona 2D.

Figura 8

Navegador de atributos.



Nota. La figura muestra el navegador de atributos para hacer el cambio de 1D a 2D. Fuente: (Innovyze, 2022).

Para calcular el coeficiente de descarga de inundaciones, ingrese el valor. El flujo tanto dentro como fuera del borde de la unión está controlado por la ecuación del orificio.

$$Q = C_{FD} A (2gH)^{1/2}$$

donde:

Q = flujo hacia/desde la unión en la simulación 2D

C_{FD} = Los coeficientes de descarga de inundación son iguales a el coeficiente de descarga de inundación combina el coeficiente de orificio típico (aproximadamente 0,6) con un factor de reducción del área del orificio, también conocido como factor de porosidad. Este factor reduce el área de la superficie del pozo a un área de orificio efectiva, que representa los pequeños agujeros en la tapa del pozo o la tapa ligeramente abierta o levantada.

A = Área de unión (determinada por el parámetro Área de superficie mínima)

H = Diferencia de altura a través del 'orificio'

Paso 3: Alinear el borde de unión con las elevaciones de malla 2D.

Por último, (*Innovyze*, 2022) considera que los niveles del suelo en el pozo deben coincidir con la altura del modelo del terreno en el lugar. De lo contrario, el flujo podría derramarse sobre la malla antes o después de que alcance el nivel del suelo del pozo. Cualquier persona:

Ajuste manualmente las elevaciones y profundidades del borde de unión para que coincidan con el modelo de elevación del terreno que está utilizando en esa ubicación. Puede verificar la elevación del modelo de terreno en esa ubicación con la herramienta Identificar de ArcMap y ajustar la elevación del borde para ese cruce en el Navegador de atributos InfoSWMM.

Figura 9

Herramientas infoSWMM.



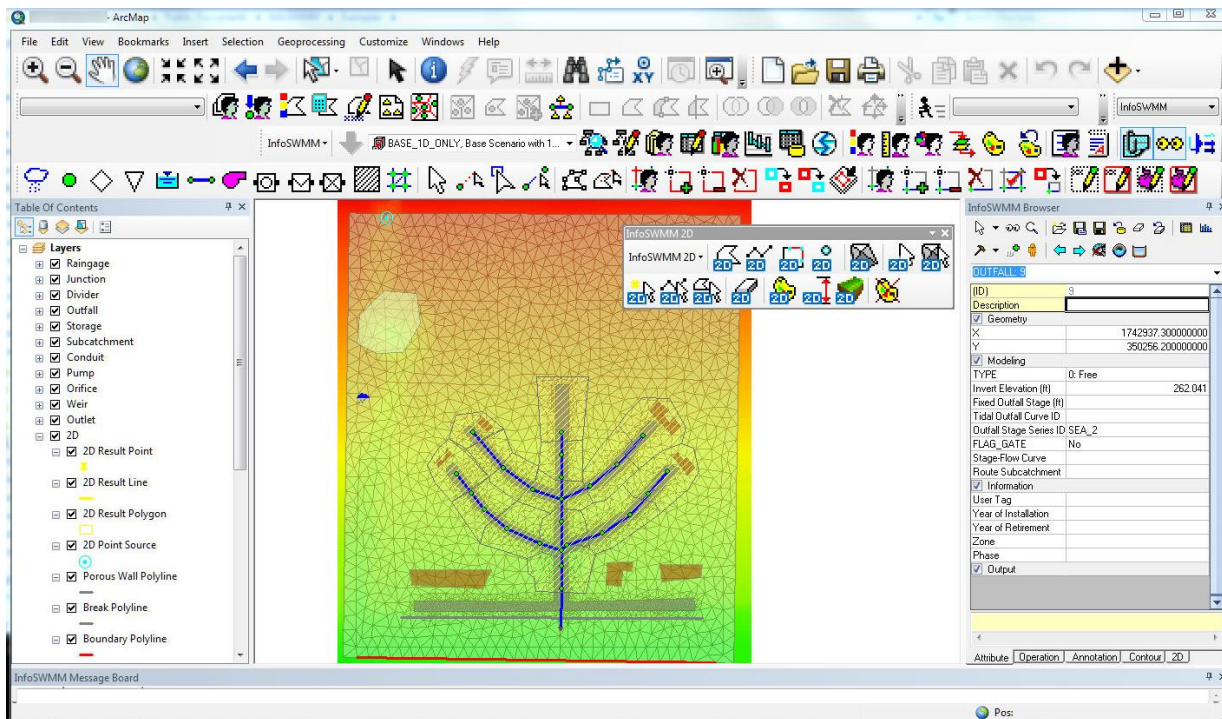
Nota. La figura muestra la cinta de herramientas de infoSWMM. Fuente: (Innovyze, 2022).

Después de simular el modelo con Run Manager, proporciona resultados en un punto de una zona 2D específica. Los resultados de salida disponibles en este momento son los siguientes:

- la profundidad del agua sobre el suelo.
- La dirección del flujo se define como el ángulo en radianes en sentido antihorario hacia el este.
- Elevación: elevación de la superficie del agua.
- Numeración de Froude
- La velocidad
- El flujo por unidad de longitud se conoce como flujo unitario.

Figura 10

Modelo 2D e interfaz de InfoSWMM.



Nota. La figura muestra la interfaz de infoSWMM y un ejemplo del modelo 2D. Fuente: (Innovyze, 2022).

XPSWMM

Desarrollado por XP Software, XP-SWMM es otra herramienta comercial que amplía las capacidades de SWMM con modelado de calidad del agua, herramientas de análisis avanzadas y opciones de calibración automatizada es un conjunto completo de modelos 1D y 2D para problemas de aguas generadas por la lluvia y residuales basado en SWMM. Ayuda a los ingenieros y gestores de cuencas hidrográficas a simular las inundaciones superficiales, la hidrología, la hidráulica y la calidad del agua. (XPSWMM, s. f.)

¿Para qué sirve el modelo en XPSWMM

Gestión de ríos y llanuras aluviales

Simula las llanuras aluviales en entornos urbanos completos y realiza un análisis integrado del flujo y el transporte de contaminantes en sistemas tanto naturales como artificiales, como estanques, ríos, lagos y llanuras aluviales. XPSWMM facilita la creación de mapas de peligrosidad y mapas detallados de llanuras aluviales con alta precisión.

Analizar los sistemas de alcantarillado pluvial, sanitario y combinado

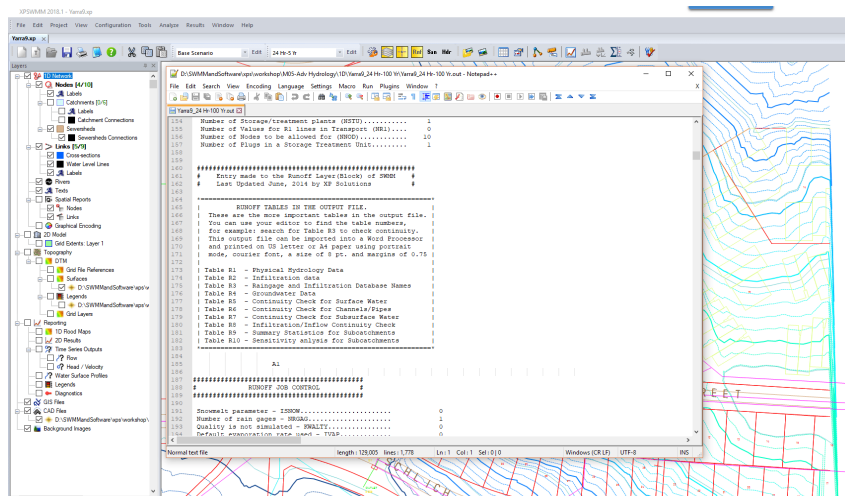
Combina la hidráulica y la hidrología en un único modelo, XPSWMM reproduce los procesos naturales de lluvia-escorrentía y evalúa el rendimiento hidráulico de los sistemas de drenaje para la gestión de recursos hídricos. El modelo identifica métodos para la eliminación de contaminantes, la preparación para inundaciones y el análisis de la capacidad del sistema.

Aborda proactivamente los problemas del sistema

XPSWMM ayuda a prevenir tanto los desbordamientos de alcantarillado combinados como los desbordamientos de alcantarillado sanitario. Se puede vigilar la infiltración y el flujo resultante de las precipitaciones. Esto incluye cosas como presas y compuertas y cosas que dependen del tiempo y están controladas por el clima.

Figura 11

Interfaz XPSWMM.



Nota. La figura muestra la interfaz de XPSWMM. Fuente: (*Hydraulics in XPSWMM*, 2018)

Capítulo 3

Aplicaciones de las herramientas computacionales 2D

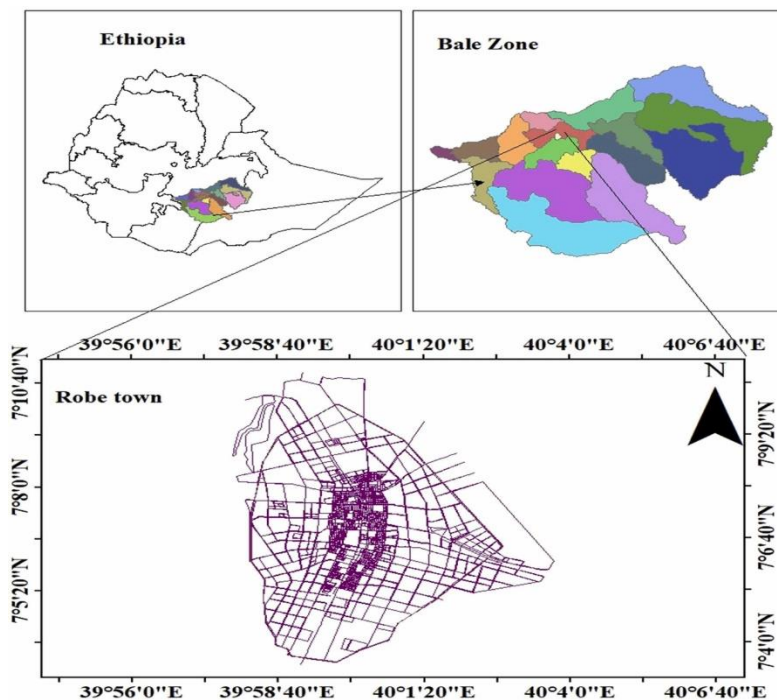
pcSWMM, infoSWMM y xpSWMM son tres paquetes de software ampliamente utilizados para modelación 2D de sistemas de aguas pluviales, sanitarias y fluviales. Si bien comparten algunas similitudes, cada uno tiene sus propias características y aplicaciones únicas. Este apartado tiene como objetivo proporcionar una descripción de las aplicaciones de cada software.

Citando (Bibi et al., 2023), que utilizó PCSWMM para evaluar los impactos de la urbanización y los cambios climáticos en la eficiencia de los sistemas de drenaje de aguas lluvia en la gestión de inundaciones urbanas en la ciudad de Robe, Etiopía.

Este estudio se realizó en la localidad de Robe (39 0 56 '00" E a 40 0 6 '40" E, 70 0 5 '20" N a 70 0 10 '40" N) fue elegido como área de estudio. Situado en la región de Oromia en el sureste de Etiopía. La ciudad ocupa 6680 ha, con una elevación promedio de 2565 m. De 1989 a 2020, la localidad experimentó precipitaciones anuales máximas de 651 mm y mínimas de 1309 mm. En la parte superior de la cuenca de Genale Dawa, las aguas lluvia del área de estudio desembocan en el río Shaya. La mayoría de las precipitaciones ocurren entre julio y noviembre.

Figura 12

Ubicación del área de estudio.



Nota. La figura muestra el área de la ciudad de Etiopía. Fuente: (Bibi et al., 2023)

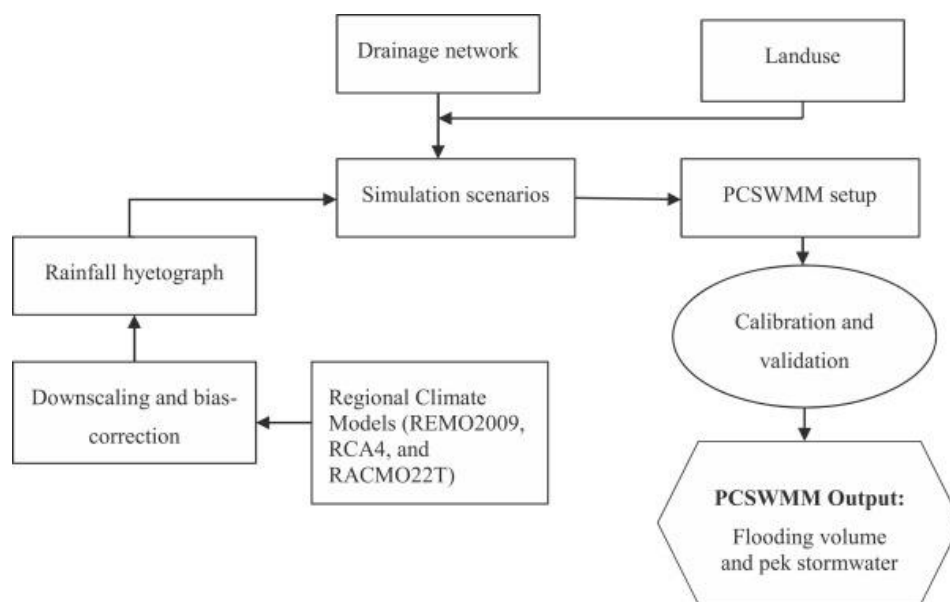
De acuerdo con (Bibi et al., 2023), el estudio necesitó conjuntos de datos tanto espaciales como temporales para evaluar los impactos potenciales del cambio en el clima y la urbanización. La Agencia Meteorológica Nacional de Etiopía proporcionó conjuntos de datos de precipitaciones diarias (1980-2020) para cinco estaciones meteorológicas en Robe City y sus alrededores que tenían un buen historial. Se descargaron datos de precipitaciones futuras proyectadas utilizando modelos climáticos globales de resolución espacial fina ($0,44^\circ \times 0,44^\circ$) de la base de datos CORDEX-África a través de la Earth System Grid Federation (ESGF) para evaluar los efectos de las futuras precipitaciones extremas en los sistemas de drenaje.

El objetivo de este estudio según (Bibi et al., 2023) fue evaluar cómo el desarrollo urbano y el cambio climático podrían afectar la eficiencia de los sistemas de drenaje. Por lo tanto, para

cumplir con los objetivos del estudio, (i) evaluaron el proceso hidrológico de la ciudad en función de las precipitaciones futuras proyectadas por los RCM, (ii) cuantificaron el efecto de la urbanización en los picos de aguas lluvia y la adecuación de los sistemas de drenaje, (iii) simulon en base al impacto combinado de la urbanización y el cambio climático utilizando el modelo calibrado PCSWMM, y (iv) evaluamos la efectividad de desarrollos seleccionados de bajo impacto para minimizar los riesgos amplificados de inundaciones de la ciudad.

Figura 13

Metodología.



Nota. La figura muestra la metodología utilizada por los investigadores. Fuente: (Bibi et al., 2023)

Aplicación de PCSWMM

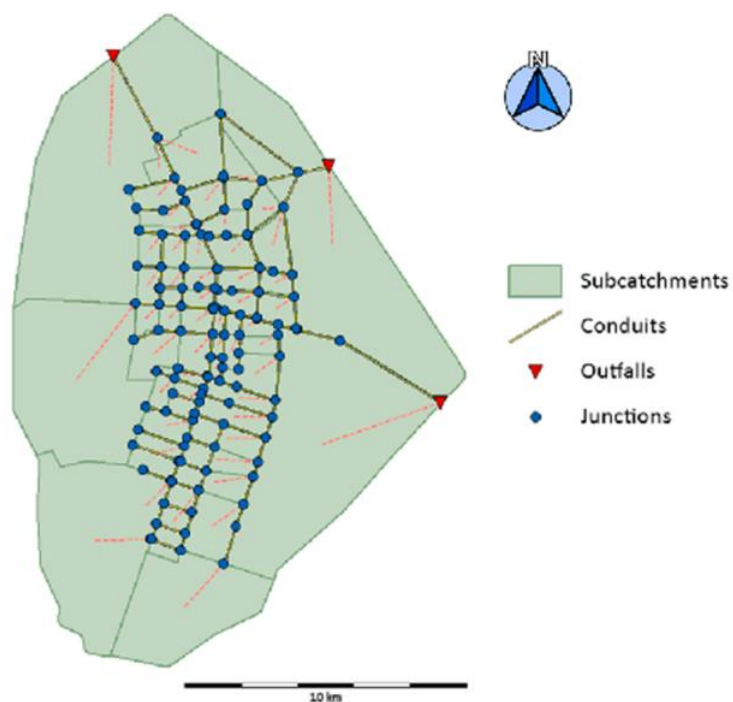
El modelo dinámico Personal Computer Storm Water Management (PCSWMM) se utiliza para simular la escorrentía pluvial en áreas urbanas para un evento único o un período de tiempo prolongado. Los siguientes criterios determinaron la elección de PCWMM para este estudio: (i) genera picos de aguas generadas por la lluvia utilizando el pluviómetro y los parámetros físicos de

la subcuenca, como la superficie de la subcuenca, la anchura del flujo, la pendiente, la relación de impermeabilidad y la rugosidad, (ii) Es un modelo dinámico de precipitación-escurrimiento capaz de simular tanto eventos puntuales como continuos; (iii) permite modelar las respuestas hidrológico-hidráulicas ante el uso del suelo y el cambio climático; (iv) es apropiado para cuencas urbanas de menos de 100 km²; y (v) incluye una herramienta de calibración de sintonía radial basada en sensibilidad (SRTC) (Bibi et al., 2023).

Toda el área de estudio está dividida en 53 subcuencas en PCSWMM, y cada subcuenca necesita un conjunto específico de parámetros estimados. En primer lugar, se identificaron 118 cruces en función de la topografía y el diseño de la carretera para dividir la subcuenca. Luego, se utilizó la extensión Arc-Hydro en Arc Map 10.3 para delinear las subcuencas (Fig. 14). Los parámetros clave de cada subcuenca, como el área, el ancho, la pendiente promedio y el porcentaje de área impermeable, entre otros, se pueden determinar a partir de la división realizada usando el DEM, el uso del suelo y el shapefile del suelo (Bibi et al., 2023).

Figura 14

El trazado de la red.



Nota. La figura muestra el trazado de la red de drenaje mostrando los cruces y enlaces en el PCSMM. Fuente: (Bibi et al., 2023).

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza para seleccionar y ajustar los parámetros sensibles al modelo después de que se asignaron los valores (o clasificaciones) de incertidumbre definidos por el usuario para cada parámetro (Tabla 1).

Tabla 1*Parámetros de calibración.*

Parámetro	Descripción	Rango de ajuste (mín-máx)	Valor calibrado	Rango
Impermeabilidad (%)	La proporción de superficie impermeable.	Estimación ponderada-100	25%Imp	1
Ancho (m)	Ancho de la vía de flujo terrestre	65,9–699,2	60 %P	2
Pendiente (%)	La pendiente ponderada estimada	3,7–11,2	30 % S	3
N-Imperv	N de Manning para flujo terrestre sobre una superficie impermeable	0,01–0,033	0,02	4
N-pervertido	N de Manning para flujo terrestre sobre una superficie permeable	0,24–0,8	0,35	5
D -Imperv. (mm)	Profundidad del almacenamiento de la depresión en la superficie impermeable.	1,27–2,54	1,35	6
D -Pervertido. (mm)	Profundidad del almacenamiento de la depresión en la superficie permeable.	2,54–7,62	3,8	7
Cabeza de succión (mm)	Cabezal de aspiración de suelo de vertisol pelico	240.03	240.03	8
Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	Conductividad hidráulica del suelo de vertisoles pelicos.	0,508	0.508	9

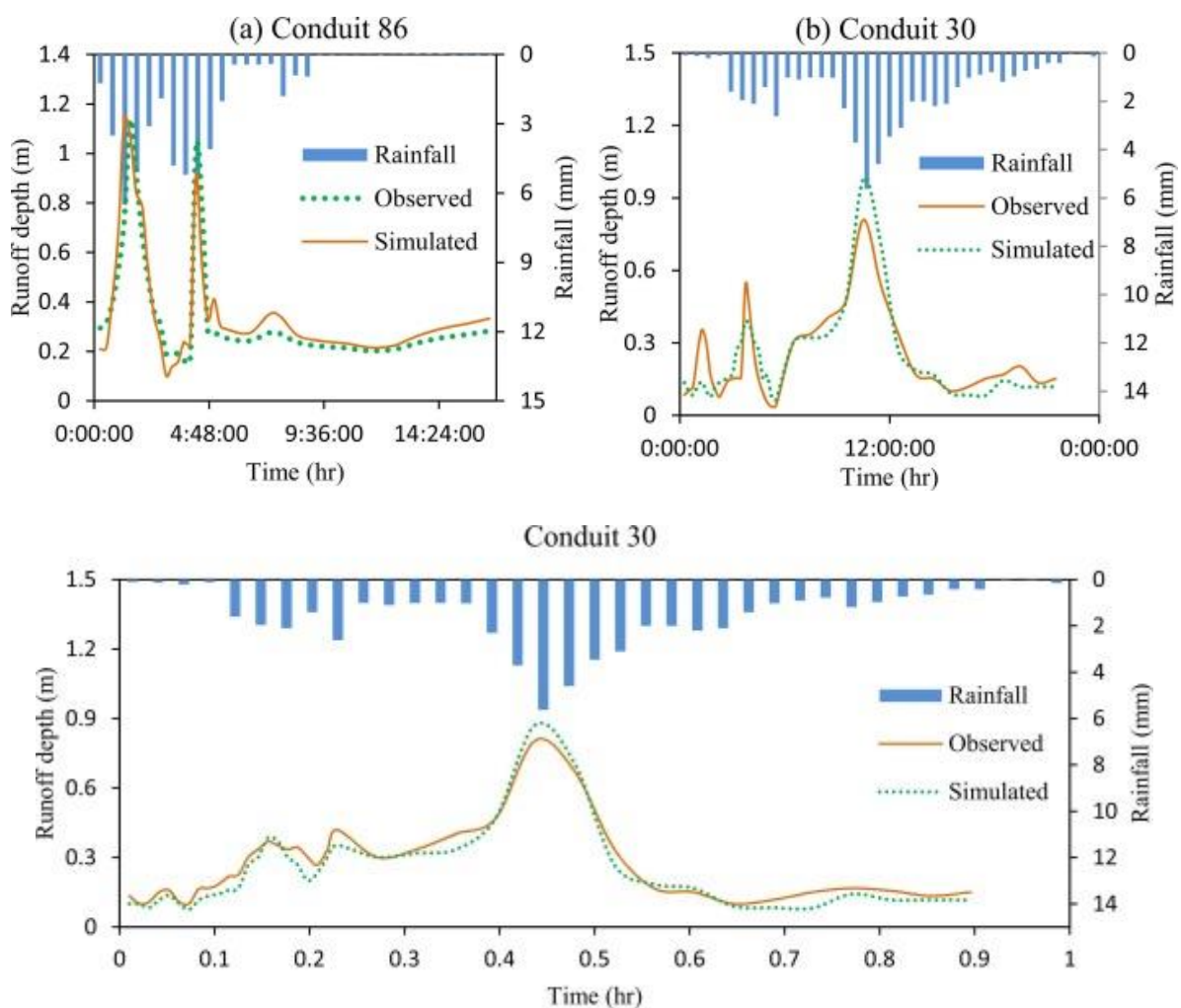
Nota. Parámetros sensibles identificados para la calibración de PCSWMM. Fuente: (Bibi et al., 2023).

Según (Bibi et al., 2023). Una vez calibrado el modelo, debe validarse. El conducto de C86 se utiliza como evento de validación. La comparación gráfica de la profundidad de escorrentía

observada y simulada tanto para calibrado como para validado se muestra en la figura 15, donde se puede ver que el modelo PCSWMM tiene una precisión aceptable para el área de estudio. Los valores de los índices de bondad de ajuste indican que el modelo funciona bien para simular la lluvia y la escorrentía en la ciudad de Robe.

Figura 15

Comparación de resultados simulados.



Nota. La figura muestra la comparación de resultados simulados y observados durante la calibración. Fuente: (Bibi et al., 2023)

Impactos del cambio de uso del suelo en la eficiencia de los sistemas de drenaje

Los resultados del análisis futuro del uso de la tierra indican que la ciudad de Robe ha experimentado un cambio significativo en comparación con el uso de la tierra actual. La transformación de áreas abiertas en superficies impermeables como resultado de la rápida urbanización será el cambio más significativo. Como se muestra en la Tabla 2, la superficie impermeable aumentará del 68,5% al 83,65% en 20 años (2020–2035) y el flujo máximo aumentará de 45,1 m³/s a 68,72 m³/s. Esto indica que el coeficiente de escorrentía aumentará en 2035 como resultado de la construcción de edificios residenciales, comerciales, públicos y de carreteras. Este aumento es lineal con el volumen de inundación y el número de cruces inundados, lo que indica una vulnerabilidad a los riesgos de inundación. Los resultados de la simulación demostraron que, en comparación con la línea de base, la inundación total aumentó de 35.418 a 50.106 * 10⁶ Ltr (Bibi et al., 2023)

Tabla 2

Uso del suelo durante 2020-2035

Uso del suelo	año 2020	año 2035
Superficie impermeable (%)	68,5	83,65
Superficie permeable (%)	31,5	16.35
Pico de aguas pluviales (m³/s)	45.13	68,72
Inundación total (10⁶ Ltr)	35.418	50.106
Número de cruces inundados	32	56

Nota. La figura muestra los resultados obtenidos del modelo en PCSWMM. Fuente: (Bibi et al., 2023)

Impacto combinado del uso de la tierra y el cambio climático en las inundaciones urbanas

El PCSWMM calibrado se ejecuta con el uso futuro de la tierra y los escenarios climáticos proyectados para el período 2020–2040 para evaluar el impacto combinado del uso de la tierra y el cambio climático. Utilizando los modelos climáticos RACMO22T, REMO y RCA4, se simulan picos de aguas lluvia de 162,9, 144,5 y 186,8 m³/s entre 2020 y 2040. Además, se simuló el uso futuro de la tierra con RACMO22T, REMO y RCA4, respectivamente, y el volumen de inundación aumentó un 63,5 % entre 2041 y 2070.

(Bibi et al., 2023) Afirma que se espera una gran cantidad de inundaciones a medida que aumenta el porcentaje de área urbana con el cambio climático. El centro urbano desde la subciudad de Welmel hasta la rotonda está inundado por completo. El volumen de inundación de las uniones aumentará a $65.849 * 10^6$ Ltr, $61.630 * 10^6$ Ltr y $72.954 * 10^6$ Ltr, respectivamente, si se combina la impermeabilidad futura con las precipitaciones previstas de RACMO22T, REMO y RCA4. Los hallazgos de este estudio indican que las inundaciones tendrán una magnitud extremadamente alta e incluso podrían ingresar a propiedades, causando daños a infraestructura y propiedades.

Figura 16

Inundación ciudad de Robe.



Nota. Capturado por investigadores; 31 de julio y 3 de agosto de 2022. La foto de evidencia muestra la inundación cerca de la salida 81 (alrededor de la rotonda de la ciudad de Robe). Fuente: (Bibi et al., 2023).

Finalmente, (Bibi et al., 2023) concluye que el modelo dinámico de lluvia-escorrentía PCSWMM es ampliamente utilizado para evaluar los efectos potenciales del uso del suelo y el cambio climático en la eficiencia de los sistemas de drenaje urbano. En este estudio, se incorporaron tres Modelos Climáticos Regionales (MCR): REMO2009, RCA4 y RACMO22T, junto con datos de uso del suelo para 2020 y 2035. La calibración y validación del modelo se llevaron a cabo utilizando la herramienta de Sintonía Radial Basada en Sensibilidad (SRTC). Los resultados de la simulación revelaron que el 52,94% de los sistemas de drenaje existentes se inundarán debido al crecimiento urbano. Se anticipa un aumento en las aguas pluviales futuras debido a la reducción de la infiltración causada por la impermeabilización de las superficies urbanas. El cambio combinado en el uso del suelo y el clima incrementó el pico de aguas pluviales

hasta en un 52,1% y la magnitud de las inundaciones hasta en un 67,4% en comparación con las condiciones de referencia. Esto indica que el área de estudio enfrentará las peores condiciones de inundación debido a la combinación de aumento de superficies impermeables y cambio climático. Para abordar las futuras inundaciones, es crucial identificar con precisión los tipos y ubicaciones de las inundaciones y rediseñar los sistemas de gestión de aguas pluviales en la ciudad de Robe.

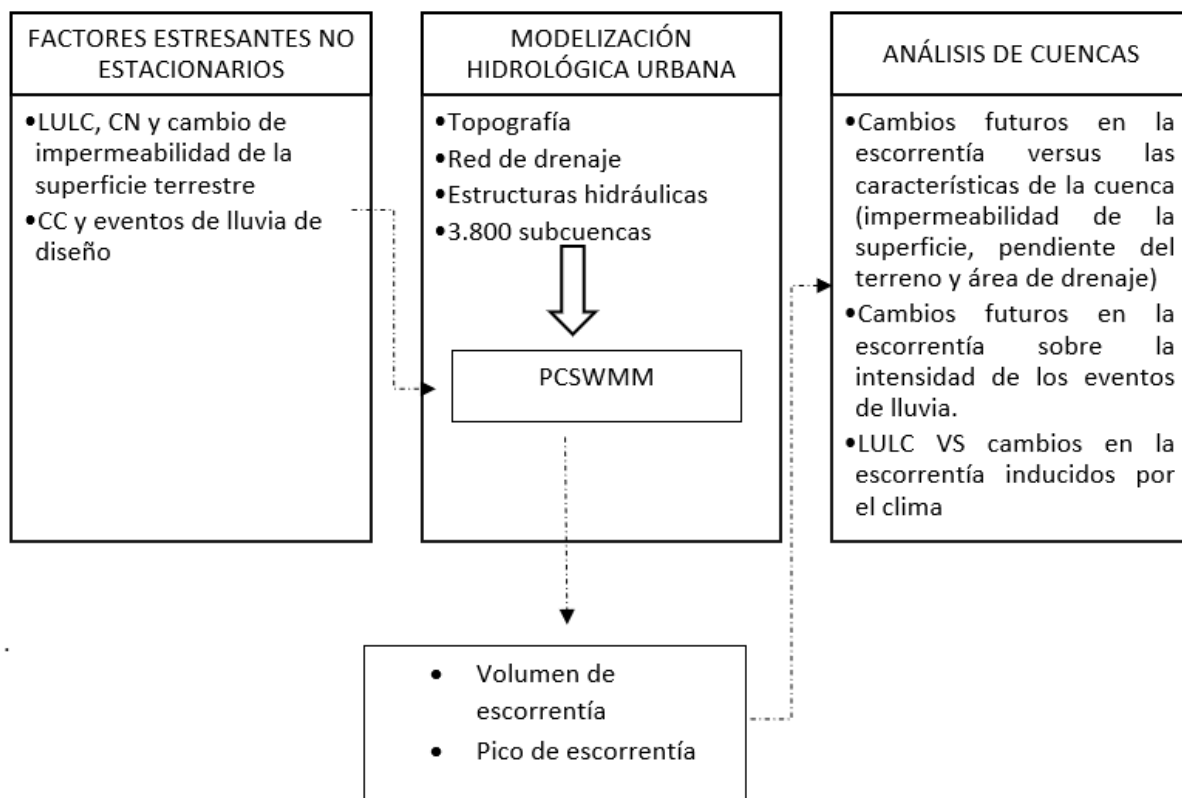
De igual manera (Mayou et al., 2024) uso PCSWMM en impactos del clima futuro y del cambio de uso/coertura del suelo en la esorrentía urbana utilizando modelos hidrológicos a escala fina, donde, analizaron los impactos individuales y combinados del futuro cambio en el uso y cobertura del suelo (LULC) y del cambio climático (CC) en los atributos de la esorrentía también examinaron la relación entre los cambios en los atributos de la esorrentía y las características de la subcuenca, como el área de drenaje, la impermeabilidad de la superficie y la pendiente del suelo e investigaron la relación entre estos cambios y el intervalo de recurrencia de las lluvias. Los cambios en el LULC y el CC se basaron en proyecciones existentes, y el modelado hidrológico urbano se realizó utilizando el software Personal Computer SWMM (PCSWMM) de Computational Hydraulics International.

Se utilizó el modelo hidrológico PCSWMM para simular procesos hidrológicos en 3800 subcuencas urbanas, cada una con características únicas de topografía, uso del suelo (LULC) y redes de drenaje. Antes de analizar escenarios futuros, el PCSWMM fue validado con datos históricos de niveles de agua. Se integraron proyecciones futuras de LULC y precipitaciones en el modelo, con datos de uso del suelo para 2010 y 2070 reflejando el desarrollo urbano proyectado. Los datos climáticos, obtenidos de modelos globales ajustados, incluyeron la intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Estos datos permitieron simular el impacto de los cambios en

LULC y el clima en la esorrentía urbana. Para evaluar estos impactos, se seleccionaron seis eventos de lluvia de 24 horas, representando intervalos de recurrencia de 5 a 200 años.

Figura 17

Vista esquemática del marco metodológico.



Nota. La figura muestra la metodología aplicada en la investigación. Fuente: (Mayou et al., 2024).

El área de estudio abarcó 3800 subcuencas en el condado de Hillsborough, en el centro-oeste de Florida, una región con características topográficas e hidrológicas diversas. Las subcuencas se diferenciaron por su área de drenaje, impermeabilidad de la superficie, distribución del uso del suelo (LULC) y pendiente del terreno. El área de drenaje varió entre 0,1 y 741,3 hectáreas, la impermeabilidad de la superficie entre 0% y 54%, y la pendiente del terreno entre 0% y 10%.

Tabla 3

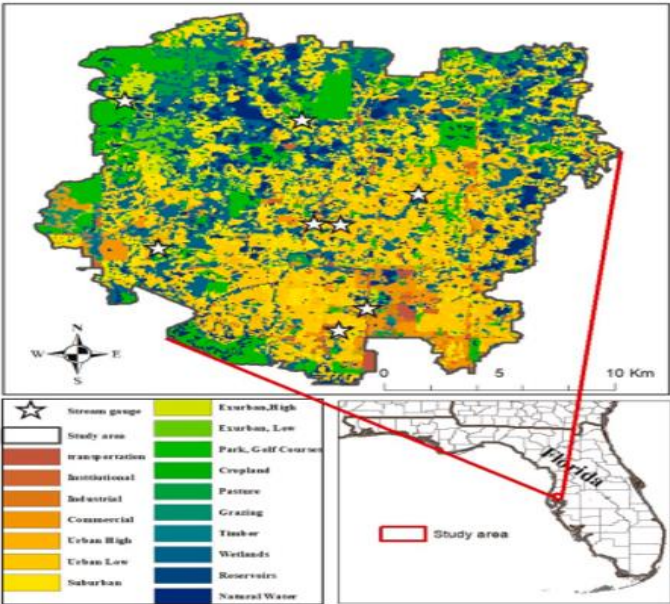
Características de las subcuencas de estudio

Característica de la cuenca hidrográfica	Mínimo	Máximo	Significar
Área de drenaje (ha)	0,1	741.3	9.8
Pendiente del terreno (%)	0.0	10.0	0,7
Impermeabilidad de la superficie (%)	0.0	54.0	36,5

Nota. Datos característicos de la cuenca. Fuente: (Mayou et al., 2024)

Figura 18

Área de estudio y medidores de caudal.



Nota. La figura muestra el area de estudio donde abarco 3800 cuencas. Fuente: (Mayou et al., 2024).

Modelización hidrológica

Como plantea (Mayou et al., 2024) el modelado hidrológico basado en eventos para escenarios históricos y futuros se llevó a cabo utilizando PCSWMM. Este programa es una versión mejorada de SWMM (Rossman, 2015) y cuenta con varias funciones avanzadas, como la integración de SIG, la delimitación de cuencas hidrográficas, el análisis de series temporales y herramientas para el preprocesamiento y posprocesamiento de datos. PCSWMM ha sido empleado en estudios anteriores para predecir los efectos del cambio climático y del uso del suelo en diversas regiones del mundo. Para cada evento de lluvia de 24 horas, el modelado hidrológico se realizó con un intervalo de enrutamiento de 1 minuto durante un periodo de dos días. Dado que PCSWMM es un modelo semidistribuido, estos datos eran necesarios para cada una de las 3800 subcuencas, las cuales estaban interconectadas en términos hidrológicos. Posteriormente, el modelo se utilizó para predecir los atributos de escorrentía bajo condiciones históricas y futuras para los seis eventos de lluvia de diseño

La Tabla 4 presenta los datos utilizados en PCSWMM para modelar las condiciones históricas y futuras. Los Grupos Hidrológicos de Suelos (HSG), que determinan los valores de Número de Curva (CN), se obtuvieron del Servicio de Suelos Web del USDA (USDA, 2019). Estos valores, junto con la impermeabilidad de la superficie, se usaron para estimar los valores de CN para cada una de las 3800 subcuencas. Otros datos adicionales, como las propiedades de los canales (por ejemplo, geometría y rugosidad) y la infraestructura hidráulica, fueron proporcionados por CH2M HILL Engineers Inc.

Tabla 4*Datos para modelamiento hidrológico*

Clasificación	Conjunto de datos	de	Resolución espacial	Año(s) de datos
Uso/cobertura del suelo	ICLUS		30 metros	2010 y 2070
Impermeabilidad de la superficie terrestre	ICLUS		90 metros	2010 y 2070
Red de drenaje	N / A		N / A	2012
Eventos de lluvia (históricos y futuros)	Atlas NOAA 14		N / A	2013
Infraestructura hidráulica	N / A		N / A	2012

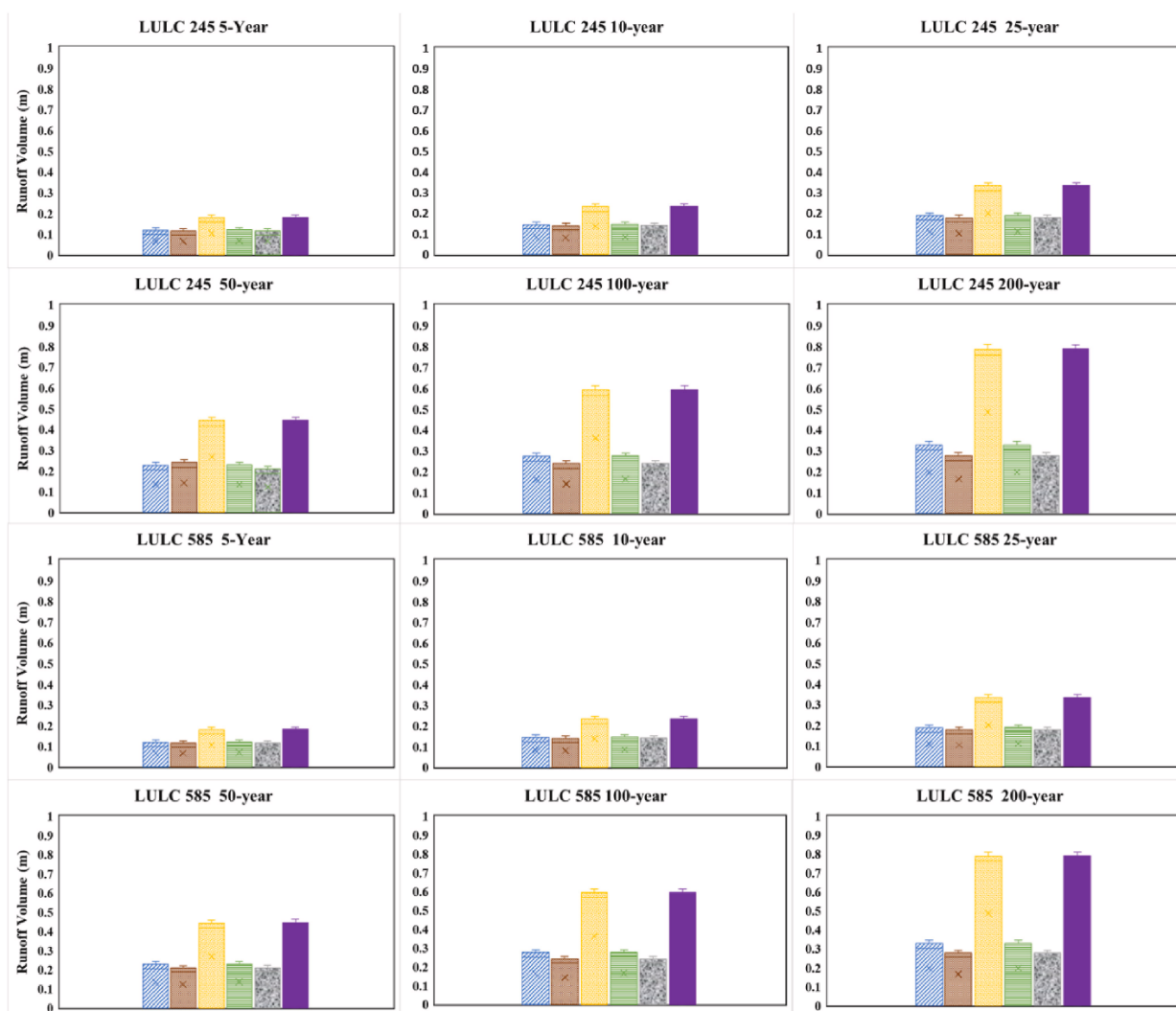
Nota. Datos de entrada para modelamiento hidrológico en las subcuencas de estudio.

Fuente:(Mayou et al., 2024).

(Mayou et al., 2024) describe que la figura 19 compara los resultados de los ocho escenarios de modelado para cada evento de lluvia con respecto a los dos atributos de escorrentía. En general, los valores pico de escorrentía tuvieron mayor variabilidad y más valores atípicos que el volumen de escorrentía. Por ende, en la figura 19 se ve el volumen de escorrentía para los diferentes años que se analizó en el programa.

Figura 19

Diagramas de caja de los cambios en la escorrentía.



Nota. La figura muestra los resultados de los escenarios de modelado para cada evento de lluvia con respecto a los dos atributos de escorrentía. Fuente: (Mayou et al., 2024).

Los resultados destacan la necesidad de actualizar las regulaciones y la zonificación del uso del suelo para adaptarse a las cambiantes condiciones hidrológicas. Esto incluye revisar los códigos de construcción, aplicar controles más estrictos sobre el desarrollo en áreas propensas a inundaciones y asegurar que los nuevos proyectos integren sistemas de drenaje sostenibles. Se requieren estrategias de mitigación integrales para enfrentar el aumento de los riesgos de inundación, las cuales podrían combinar medidas estructurales (como barreras contra

inundaciones) y no estructurales (como campañas de concientización pública y planes de preparación para emergencias). La investigación ofrece información valiosa para planificadores urbanos y administradores de llanuras aluviales en el desarrollo de estrategias que mantengan la funcionalidad de las redes de drenaje. Además, subraya la necesidad de una planificación que anticipe las condiciones climáticas futuras e incorpore la resiliencia en el diseño urbano.

Finalmente (Mayou et al., 2024) afirma que para cada uno de los seis intervalos de recurrencia, se realizaron pronósticos de escorrentía para un escenario histórico y tres futuros (cambio climático, cambio en el uso del suelo y combinación de ambos) en las 3800 subcuencas del estudio. En general, se observó que los cambios en la escorrentía máxima superaron los cambios en el volumen total de escorrentía. Los resultados indicaron que el cambio climático y el cambio en el uso del suelo mostraron una relación inversa con las características de las subcuencas, como el área de drenaje y la pendiente del terreno, y una relación directa con el intervalo de recurrencia de las lluvias de diseño. No se encontraron relaciones significativas entre la escorrentía y la impermeabilidad de las subcuencas. Sin embargo, las relaciones entre las características de la cuenca y los cambios en los atributos de la escorrentía no alcanzaron significancia estadística, lo que sugiere precaución al interpretar estos hallazgos en estudios futuros. Los principales resultados se pueden resumir como sigue:

- Se proyectó que los cambios futuros en la escorrentía máxima serían más significativos que los cambios en el volumen total.
- Los cambios relativos en los valores de escorrentía fueron más pronunciados bajo eventos de lluvia más intensos en el futuro (intervalos de recurrencia más altos).

- El cambio climático tuvo un impacto mayor en los atributos de la escorrentía que el cambio en el uso del suelo. Esto se debió en parte a que los cambios en el uso del suelo en la subcuenca estudiada fueron menores en comparación con la intensidad de la lluvia.
- Las subcuencas más pequeñas experimentaron cambios relativos más grandes en los atributos de la escorrentía.
- Las subcuencas con pendientes más suaves mostraron mayores cambios relativos en los atributos de la escorrentía.
- La impermeabilidad histórica de las subcuencas no mostró ninguna relación con los cambios relativos en la escorrentía.

A diferencia de los dos autores anteriores (L. Ahiablame & Shakya, 2016) que usaron PCSWMM en modelado urbano este autor utilizó el modelo en una cuenca para calcular deducir efectos de reducción de inundaciones del desarrollo de bajo impacto. Para el área de estudio se seleccionó la cuenca hidrográfica de Normal-Sugar Creek (HUC 071300090701) en el condado de McLean, en el centro de Illinois (Figura 20), como área de estudio. Esta elección se basó en la predominancia de uso urbano del suelo en la cuenca y la disponibilidad de datos necesarios para el modelado. Con un área total de drenaje de 87,6 km², la cuenca cuenta con una estación meteorológica (Bloomington Waterworks) y una estación de medición de caudal (Sugar Creek cerca de Bloomington, IL; BMII2) ubicada en su desembocadura.

Figura 20

Ubicación de la cuenca de Sugar Creek en Illinois.

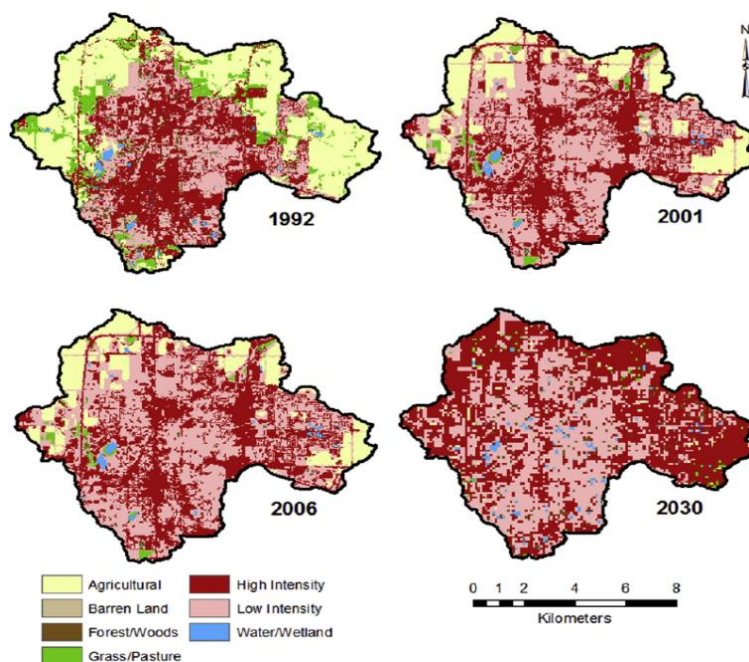


Nota. La figura muestra el area de estudio. Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

En este estudio, se identifica como la cuenca hidrográfica de Sugar Creek (SCW) a la cuenca hidrográfica de Sugar Creek de la ciudad de Normal, la cual está mayormente urbanizada, con más del 80% de su área ocupada por las ciudades principales de Bloomington y Normal (Illinois) (Figura 21).

Figura 21

Cambio en el uso del suelo en la cuenca de Sugar.



Nota. La figura muestra el cambio del uso del suelo de 1992 a 2030. Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

Según (L. Ahiablame & Shakya, 2016) en este estudio, se emplearon datos de precipitación diaria y por hora para evaluar el riesgo de escorrentía e inundación.

Se reorganizaron todos los tipos de uso del suelo en categorías que incluyen alta intensidad (desarrollos urbanos de alta y media intensidad), baja intensidad (áreas abiertas y desarrollos de baja intensidad), pastizales (pastos y praderas herbáceas), bosques (bosques de hoja caduca y perenne), agricultura (cultivos), agua/humedales (cuerpos de agua, humedales leñosos y herbáceos emergentes), y terreno desnudo (rocas, arenas y arcillas expuestas). Utilizando ArcGIS y cuatro mapas de uso del suelo, se proyectó el cambio en el uso del suelo entre 1992 y 2030 en la cuenca.

En 1992, aproximadamente el 50% del área total de la cuenca era urbana (combinando las categorías de baja y alta intensidad; ver Tabla 5).

Tabla 5

Distribución del uso de la tierra.

Año	Porcentaje de área de cuenca hidrográfica						
	Agrícola	Bosques	Pasto	Alta intensidad	Baja intensidad	Agua/humedal	Tierra desolada
1992	35,45	2,89	9.02	28.23	23.28	1.10	0,03
2001	17.53	0,49	1.43	33,57	46.26	0,72	0
2006	15.0	0,45	1.28	35.10	47,43	0,75	0
2030	1.34	2.08	1.02	51,79	42.43	1.35	0

Nota. La tabla muestra la distribución del uso de la tierra en la cuenca del arroyo Sugar, Illinois.

Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

Para determinar la cantidad adecuada de escorrentía que ingresaría al sistema de recolección de drenaje urbano, se estimó que el porcentaje de área impermeable conectada directamente (DCIA) era del 21 % para usos de suelo residenciales de alta intensidad y del 28 % para usos de suelo residenciales de baja intensidad utilizando las siguientes ecuaciones de Sutherland.

$$DCIA = 0.1(IA)^{1.5}, IA \geq 1 \text{ (Alta intensidad residencial)}$$

$$DCIA = 0.1(IA)^{1.7}, IA \geq 1 \text{ (Baja intensidad residencial)}$$

Donde IA representa el área total de superficie impermeable para cada categoría de uso del suelo. Según NLCD (2006), el área impermeable total para el uso residencial de alta intensidad varía entre el 50% y el 100%, y entre el 0% y el 50% para el uso residencial de baja intensidad. Se

empleó el promedio de porcentaje de impermeabilidad para alta intensidad y baja intensidad (es decir, 75% y 25%, respectivamente, del área total impermeable) en los cálculos.

(L. Ahiablame & Shakya, 2016) utilizó PCSWMM para evaluar cómo la urbanización afecta la capacidad de reducción de escorrentías e inundaciones mediante prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID). El modelo ofrece una amplia gama de capacidades hidrológicas e hidráulicas, como enrutamiento de flujo, acumulación de nieve, evaporación de agua superficial, almacenamiento de lluvia en depresiones, y enrutamiento a través de redes de conductos abiertos y cerrados, entre otras funcionalidades. Además, puede estimar la carga contaminante asociada con la escorrentía. PCSWMM también permite simular instalaciones de detención, prácticas LID y dispositivos de infraestructura verde, y proporciona herramientas avanzadas de visualización como perfiles animados de líneas de gradiente hidráulico y análisis en tiempo real de incertidumbre, sensibilidad y calibración.

Tabla 6

Prácticas LID en PCSWMM.

Práctica de LID	Superficie	Acera	Suelo	Almacenamiento	Drenaje inferior
Celda de biorretención	X		X	X	0
Pavimento poroso	X	X		X	0
Zanja de infiltración	X			X	0
Barril de lluvia				X	X
Zanja vegetativa	X				

X = Obligatorio 0 = Opcional

Nota. La tabla muestra que prácticas LID fueron utilizadas en PCSWMM. Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

El modelo PCSWMM fue calibrado ajustando cuatro parámetros clave de la cuenca— ancho de la trayectoria de flujo, pendiente promedio de la subcuenca, porcentaje de impermeabilidad y conductividad—dentro de rangos de incertidumbre establecidos, utilizando una herramienta de calibración basada en la sensibilidad de ajuste de radio (SRTC). El parámetro de ancho se define como la relación entre el área de la subcuenca y la longitud máxima promedio de flujo superficial para la escorrentía laminar. Estos parámetros se eligieron después de un análisis de sensibilidad previo a la calibración específico para la cuenca en cuestión. Se discutieron detalladamente los rangos de incertidumbre en el contexto de "Reglas para el modelado responsable". La calibración del modelo se realizó con datos de escorrentía diaria obtenidos a partir de precipitaciones diarias de la estación Bloomington Waterworks y datos del National Land Cover Database (NLCD) 2006, para el período del 1 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2013 (8 años). La validación del modelo se llevó a cabo con datos del 1 de enero de 1997 al 31 de diciembre de 2003 (7 años). Se crearon dos escenarios de referencia: el primero utilizó datos de lluvia diaria de la estación Bloomington Waterworks desde el 1 de enero de 1984 hasta el 31 de diciembre de 2013 (30 años) para calcular la escorrentía diaria y determinar la escorrentía anual promedio y los días de inundación; el segundo escenario empleó datos de lluvia por hora de la estación Fairbury Waterworks desde el 1 de enero de 1987 hasta el 31 de diciembre de 2012 (26 años) para calcular la escorrentía diaria y evaluar la escorrentía anual promedio y las inundaciones de una hora durante ese periodo (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

Tabla 7*Escenarios del uso del suelo.*

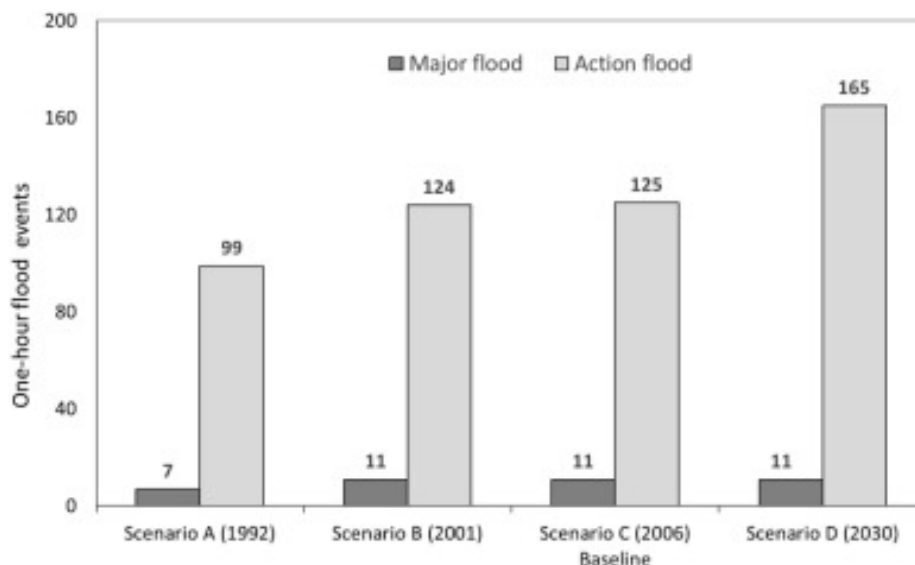
Uso del suelo	Guión	Área urbana (%)
1992	Escenario A	41.4
2001	Escenario B	79.8
2006	Escenario C (línea de base)	82,5
2030	Escenario D	94.2

Nota. La tabla muestra los escenarios de uso del suelo para evaluar los efectos de la urbanización sobre la esorrentía y las inundaciones en la cuenca de Sugar Creek, Illinois. Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

Se simularon días y eventos de inundación de una hora con datos de lluvia diaria y horaria, respectivamente. No se registraron días de inundación mayores (más de 3,4 m), pero la esorrentía alcanzó 43 m³/s durante dos días en los cuatro escenarios de uso de la tierra, provocando inundaciones de acción. Para considerarse un día de inundación, el nivel de 3,4 m debe mantenerse durante 24 horas, lo cual no ocurrió, indicando que las inundaciones dependen de la duración e intensidad de la lluvia. Los eventos de inundación importantes de al menos una hora y los de acción aumentaron con el crecimiento urbano (Figura c). No se observó un incremento notable en eventos de inundación entre 2001 y 2006 debido al leve aumento del área urbana en ese período.

Figura 22

Número de inundaciones.



Nota. La figura muestra el número de inundaciones de una hora en la cuenca de Sugar Creek, Illinois. Fuente: (L. Ahiablame & Shakya, 2016).

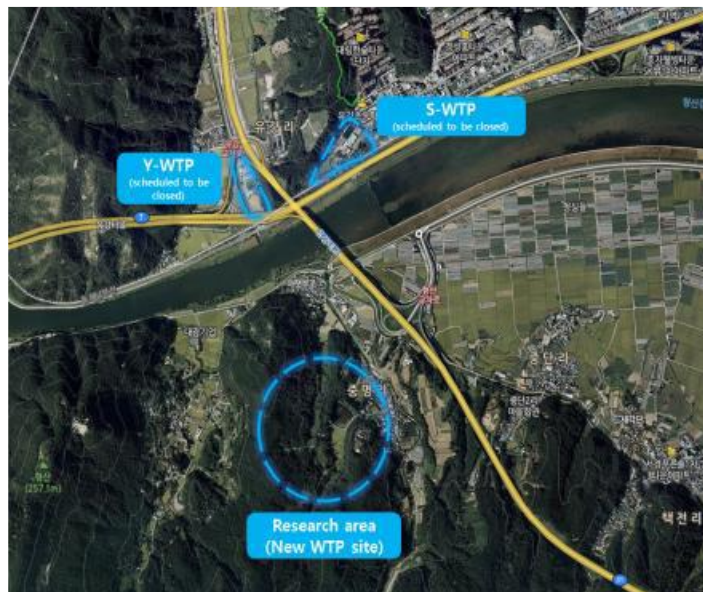
Finalmente, (L. Ahiablame & Shakya, 2016) del modelo mostró que las prácticas de Desarrollo de Bajo Impacto (LID) pueden reducir los riesgos de inundaciones en cuencas urbanas. Los resultados indicaron que la escorrentía anual promedio aumentó entre un 3 % y un 32 % debido a un incremento del 50 % al 94 % en el uso del suelo urbano entre 1992 y 2030, lo que elevó significativamente el riesgo de inundaciones en la cuenca estudiada. Se registraron dos días de inundación con inundación de acción y ningún día con inundación importante en los cuatro escenarios de uso del suelo simulados. Las inundaciones importantes aumentaron de siete en 1992 a 11 en 2030, mientras que las inundaciones de acción aumentaron de 99 a 165 eventos entre 1992 y 2030. La escorrentía anual promedio de las prácticas individuales y combinadas se redujo del 3 % al 40 % como resultado de la implementación de prácticas LID. Los escenarios combinados, que incluían pavimento poroso, controlaron mejor la escorrentía que los demás.

Por otro lado, (Kwak et al., 2016) utilizaron XPSWMM para evaluar el potencial de control de escorrentía en distintos tipos de diseño de desarrollo de bajo impacto en áreas de desarrollo pequeñas. Este estudio destaca la importancia de modelar los efectos de diferentes estrategias de uso del suelo y planificación urbana en la gestión de aguas generadas por la lluvia.

La investigación examina la evolución del desarrollo de bajo impacto (LID) y su impacto en la Región Y, ciudad P, Corea, evaluando los resultados antes y después de su implementación. Se anticipa que la zona objetivo experimentará un aumento superior al 80% en las áreas impermeables debido a la instalación de nuevos elementos como asfalto, pavimento de concreto y edificaciones, lo que incrementará proporcionalmente la escorrentía. En respuesta, se propusieron técnicas de gestión integrada de recursos hídricos para reducir la probabilidad de inundaciones río abajo por el aumento del volumen de agua de lluvia. Se espera un cambio significativo en el sector investigado, como se ilustra en la Figura 23, mediante la construcción de una nueva instalación de purificación de agua y la adecuada conservación de las tuberías de desagüe. Tras revisar los registros de lluvias de los últimos diez años en el área, se observó que la región presenta lluvias breves pero intensas y un incremento en la frecuencia de aguaceros torrenciales. El aumento en las áreas pavimentadas y el consiguiente incremento en el flujo superficial de agua podrían afectar la seguridad del sistema de drenaje existente. Por lo tanto, es crucial implementar medidas que protejan la integridad del sistema de drenaje actual frente a estos riesgos (Kwak et al., 2016).

Figura 23

Sitio de estudio (región Y, ciudad P, Corea).

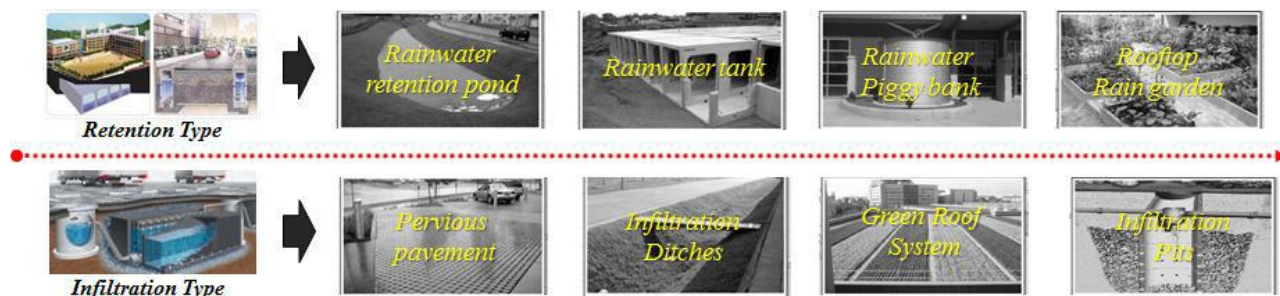


Nota. La figura muestra el sitio de la investigación. Fuente: (Kwak et al., 2016)

Como plantea (Kwak et al., 2016) las instalaciones utilizadas en el campo de estudio se pueden dividir en dos categorías: por un lado, están las instalaciones de gran capacidad de retención y, por otro lado, las instalaciones de tipo infiltración. El tipo de instalación mencionado se dividió en cuatro secciones individuales, tal como se muestra en la Figura 24. Cada una de ellas ha sido puesta en práctica. De las instalaciones, que se eligen en función de las condiciones geográficas de la zona objetivo, teniendo en cuenta únicamente las instalaciones de tipo retención e infiltración tienen la capacidad máxima total para investigar las cualidades de escurrimiento de agua.

Figura 24

Tipo de instalaciones LID.

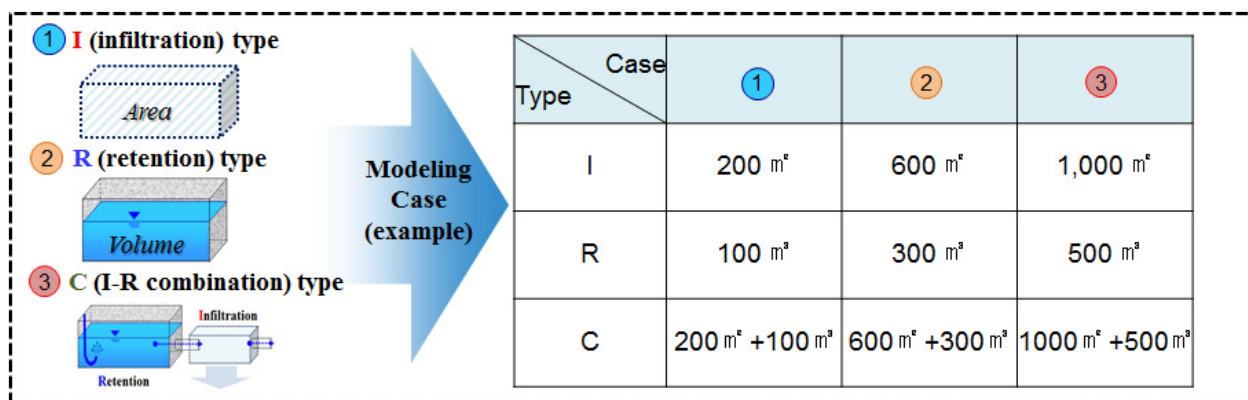


Nota. La figura muestra las instalaciones de gran capacidad de retención y, por otro lado, las instalaciones de tipo infiltración. Fuente: (Kwak et al., 2016).

Seguidamente (Kwak et al., 2016) calcularon las instalaciones de tipo unidad de retención e infiltración utilizando las características de escorrentía local cuando las instalaciones individuales se instalan en toda la cuenca. Luego calculamos esquemáticamente el tipo y la capacidad de la instalación con los objetivos de reducción de escorrentía. La instalación combinada, que implica la instalación de LID de tipo retención e infiltración en conjunto, se espera que tenga un impacto sinérgico en la capacidad de control de escorrentía de una sola.

Figura 25

Instalación LID aplicada por tipo.



Nota. La figura muestra la capacidad en m³ de cada modelo. Fuente: (Kwak et al., 2016).

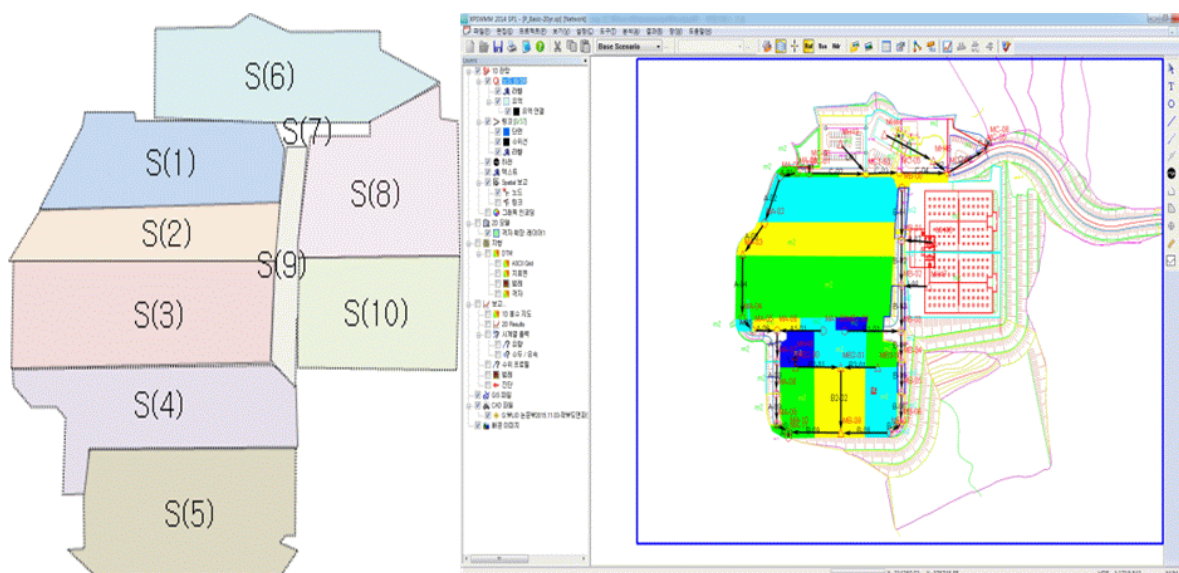
Construcción del modelo XP-SWMM

Esta área de estudio se dividió en diez cuencas más pequeñas en función de las características geográficas e instalaciones de tuberías. Los datos de entrada fueron extraídos, posteriormente las pequeñas cuencas hidrográficas fueron divididas usando el software ARC GIS, y finalmente se llevó a cabo un modelado adicional. A través de un sistema de tuberías complicado que ha sido simplificado en su representación gráfica (ver Figura 25). La tubería fue diseñada teniendo en cuenta la información de la tubería de drenaje y el análisis detallado del relieve del terreno, se procedió a introducir la información relacionada con las características topográficas del lugar, tales como el tamaño del territorio de drenaje de agua, el promedio de inclinación del terreno y la proporción de áreas sin permeabilidad. La información más reciente fue corregida utilizando los datos obtenidos en el terreno, así como el diagrama de tuberías y la información geoespacial, como la ubicación de los pozos. Se debe registrar información detallada como la ubicación aguas arriba y aguas abajo del sistema de tuberías, el tipo de tubería utilizado, la longitud y el nivel de la tubería, la elevación, la pendiente, y otros datos relevantes. Además, la información también fue

introducida en el sistema. relativamente exacta. Información acerca de la alcantarilla, como por ejemplo el nombre que identifica a la alcantarilla, su altitud, el nivel de la tubería y otros datos relacionados. Se refiere a la superficie de la pequeña cuenca, la extensión de la cuenca, la dimensión de anchura, la inclinación del terreno, la proporción de áreas impermeables, el índice de aspereza del terreno, entre otros aspectos. La ubicación total de las alcantarillas en el área del proyecto abarcó un total de 178 plazas, mientras que la longitud de la tubería alcanzó los 169 metros (Kwak et al., 2016).

Figura 26

División del área.



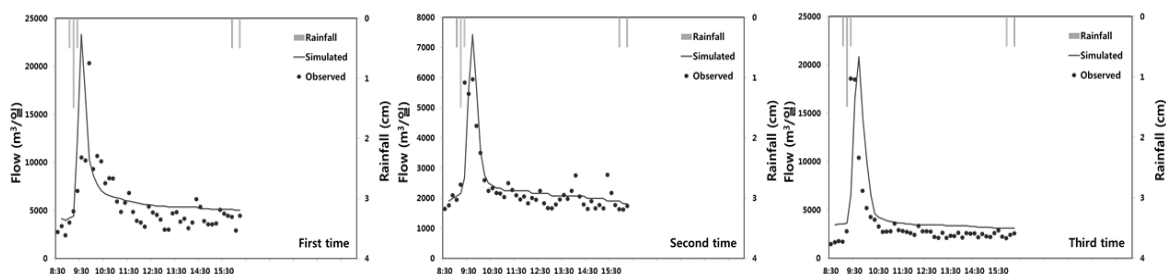
Nota. La figura muestra la división del área objetivo y pantalla de construcción XPSWMM. Fuente: (Kwak et al., 2016).

El trabajo necesario para demostrar la confiabilidad de los resultados de la investigación y el modelado es el proceso de modelo CAL/VAL. Por esta razón, se llevó a cabo una calibración utilizando los datos de lluvia y escorrentía medidos en el área objetivo del modelado el 4 de mayo de 2012. Los datos de escorrentía realmente medidos y los datos derivados del modelo se

compararon tres veces para determinar la variable de entrada. Y así se determinó el impacto del control de escorrentía de la instalación LID. Figura 27 es el resultado de la comparación de los valores medidos y los valores del modelo después de ajustar tres veces los parámetros.

Figura 27

Resultados calibración.

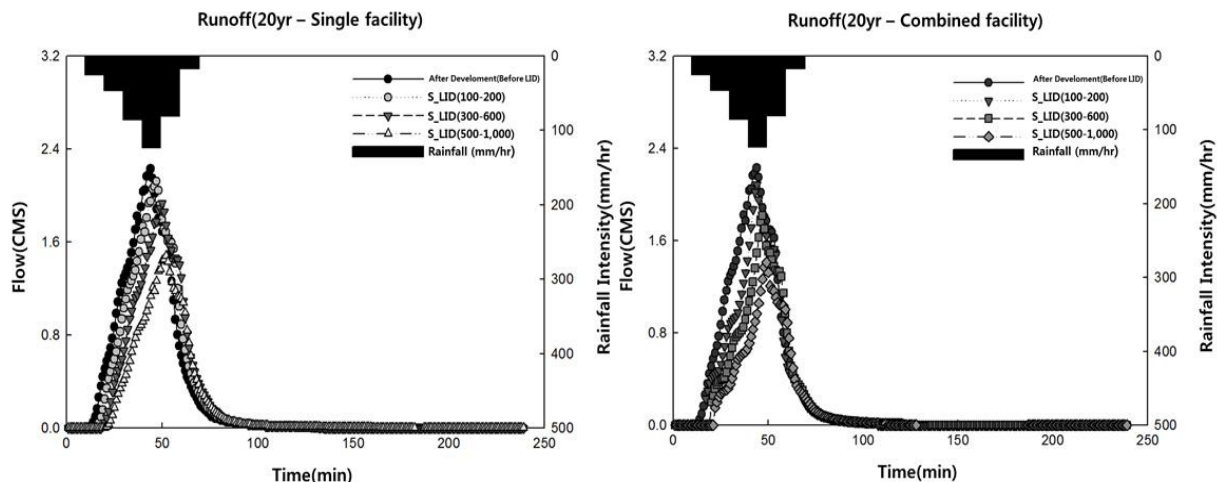


Nota. La figura muestra el resultado de la calibración. Fuente: (Kwak et al., 2016).

Como resultado del propósito de la investigación, cuando la capacidad total de retención e infiltración. Las instalaciones que se utilizarán en el área objetivo son iguales, las características de escorrentía de las instalaciones individuales y combinadas se analizaron y se calculó el efecto de control de escorrentía de la instalación combinada. Después del desarrollo sin LID y la curva de escorrentía del modelo básico, la reducción de escorrentía Los resultados de la curva de escorrentía simulada de tres instalaciones individuales y combinadas se compararon para analizar el impacto de una sola instalación LID. se calculó que el tiempo de retraso de la escorrentía aumentaba aproximadamente 3 minutos, 5 minutos, 8 minutos a medida que aumentaba el área de infiltración y la capacidad de almacenamiento.

Figura 28

Curva de escurrimiento.



Nota. La figura muestra la curva de escurrimiento de instalaciones LID simples y combinadas.

Fuente: (Kwak et al., 2016).

(Kwak et al., 2016) Concluyó que la característica de esorrentía fue afectada por la instalación de LID única, y el aumento de la retención redujo la esorrentía total la capacidad de infiltración y área. El tiempo de retraso como el tiempo de flujo máximo que se retrasó al aumentar la retención fue confirmado. Se encontró que la esorrentía total y la esorrentía máxima se reducen significativamente al aumentar la capacidad de retención y el área de infiltración en comparación con una sola instalación. El tiempo de retraso se retrasó aproximadamente 0 minutos, 3 minutos, 5 minutos al ser simulado, El resultado de derivar la curva de esorrentía fue que una tendencia a disminuir el flujo máximo (CMS) y la esorrentía total () al aumentar la capacidad de retención y la instalación combinada de mayor capacidad, el uso de XP-SWMM para comprender los cambios en la esorrentía de lluvia y precedió el impacto de la reducción de la esorrentía dependiendo del tipo de instalación LID confirmó que la instalación combinada de 500 - 1000 (combinada) tiene el mayor rango de reducción del flujo máximo.

Análisis y Discusión

SWMM permite simular la cantidad y calidad del agua en sistemas de alcantarillado urbano, siendo especialmente útil para la planificación y diseño de infraestructuras de gestión de aguas pluviales. La herramienta soporta tanto la modelación hidrológica como la hidráulica, permitiendo a los usuarios evaluar el comportamiento del flujo y la escorrentía en respuesta a diferentes eventos de precipitación. Además, SWMM ofrece la capacidad de modelar prácticas de desarrollo de bajo impacto (LID), lo que es esencial para promover soluciones sostenibles en la gestión de aguas urbanas (Lee & Bang, 2000). Sin embargo, al ser una herramienta gratuita y de código abierto, SWMM puede carecer de algunas de las funcionalidades avanzadas y del soporte técnico que ofrecen las herramientas comerciales como PCSWMM, InfoSWMM y XPSWMM.

Al analizar la herramienta computacional PCSWMM se observa que es altamente versátil, permitiendo modelar infraestructuras verdes (LID/SUD) y facilitando la integración entre entidades 1D y 2D, lo que es particularmente útil tanto en entornos rurales como urbanos. Su capacidad para crear mallas flexibles le otorga una ventaja significativa en términos de adaptabilidad a diversas condiciones y necesidades del proyecto. Además, PCSWMM ofrece funcionalidades avanzadas para la modelación hidrológica e hidráulica, permitiendo una representación detallada de los procesos de precipitación-escorrentía y el flujo en sistemas de alcantarillado. Esta herramienta también permite la simulación de eventos extremos y la evaluación de diferentes estrategias de mitigación, lo cual es crucial para la planificación urbana sostenible y la gestión de riesgos (Morales & Matamoros, 2009).

InfoSWMM, por su parte, destaca por su modelación avanzada en 2D y su capacidad para simular la calidad del agua, una función crítica para evaluar el impacto ambiental de las estrategias de gestión de aguas lluvia. Esta herramienta permite la simulación de contaminantes y la

evaluación de su impacto en cuerpos de agua receptores, lo que es esencial para cumplir con las normativas ambientales y proteger los ecosistemas acuáticos. Además, InfoSWMM facilita la evaluación de escenarios de cambio climático, proporcionando herramientas valiosas para la planificación a largo plazo y la resiliencia ante variaciones climáticas. Su capacidad para modelar tanto sistemas de alcantarillado combinados como separados permite a los planificadores urbanos y a los ingenieros diseñar y evaluar soluciones integrales para la gestión de aguas generadas por la lluvia y residuales(*Innovyze*, 2022).

XPSWMM es conocido por su precisión en la modelación de eventos de precipitación extrema y su enfoque en la simulación detallada de sistemas de drenaje urbano. Esta herramienta es particularmente eficaz para predecir y gestionar la respuesta del sistema de drenaje ante eventos climáticos adversos, lo cual es esencial para la mitigación de riesgos en áreas urbanas. XPSWMM permite realizar análisis detallados de inundaciones urbanas, modelando el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas durante eventos de tormenta. Su capacidad para integrar datos topográficos detallados y simular la interacción entre el flujo de aguas pluviales y la infraestructura urbana proporciona a los planificadores y gestores de emergencias información crítica para la toma de decisiones. Sin embargo, su especialización en drenaje urbano puede hacerlo menos flexible para aplicaciones en entornos rurales, donde las condiciones y requerimientos pueden diferir significativamente(*Kwak et al.*, 2016).

Comparando estas herramientas, PCSWMM sobresale en flexibilidad y aplicabilidad en diversos entornos, siendo ideal para proyectos que requieren una integración amplia de diferentes elementos de infraestructura y la implementación de soluciones sostenibles. InfoSWMM se distingue por sus capacidades avanzadas en la modelación de calidad del agua y evaluación de escenarios climáticos, siendo particularmente valioso para proyectos donde el cumplimiento de

normativas ambientales y la protección de ecosistemas acuáticos son prioritarios. XPSWMM es ideal para simulaciones detalladas y precisas en contextos urbanos, especialmente en la modelación de eventos de precipitación extrema y la gestión de riesgos asociados. SWMM, por su parte, destaca por ser una herramienta accesible y versátil, adecuada para una amplia gama de aplicaciones en la gestión de aguas lluvia y alcantarillado urbano. Todas estas herramientas son fundamentales para la planificación y gestión sostenible de sistemas de drenaje urbano, contribuyendo significativamente a la resiliencia y sostenibilidad urbana frente a los desafíos actuales y futuros como la creciente urbanización y el cambio climático.

Conclusiones

Las herramientas computacionales en 2D basadas en el software SWMM, como PCSWMM, INFOSWMM y XPSWMM, se han demostrado cruciales para el diseño y la gestión eficiente de los sistemas de drenaje en ambientes urbanos. Estas herramientas permiten una modelación más precisa y detallada del flujo de aguas generadas por la lluvia, lo que es esencial para mitigar los efectos adversos de la urbanización y el cambio climático. PCSWMM, ofrece capacidades avanzadas para el modelado hidrológico e hidráulico, integrando el modelado en 1D y 2D, lo que facilita una mejor representación de la interacción entre las áreas urbanas y las redes de drenaje. Esto no solo mejora la precisión de las simulaciones, sino que también permite una planificación urbana más efectiva. Por su parte, InfoSWMM se utiliza principalmente para la modelación en 2D y permite la conexión de zonas modeladas en 1D a 2D, lo cual es crucial para entender cómo las características del terreno y la infraestructura urbana influyen en el comportamiento del flujo de aguas. Esto ayuda a identificar áreas vulnerables y planificar medidas de mitigación adecuadas. XPSWMM, por otro lado, ha mostrado ser particularmente efectivo para analizar el potencial de control de escorrentía de diferentes diseños de desarrollo de bajo impacto (LID) en áreas pequeñas. Los estudios han demostrado que la instalación combinada de LID puede reducir significativamente la escorrentía total y máxima, aumentar el tiempo de retardo y mejorar la capacidad de infiltración. Es importante emplear tecnologías avanzadas y enfoques integrados para mejorar la gestión de sistemas de drenaje en entornos urbanos, promoviendo así un desarrollo más sostenible y resiliente.

Referencias

- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). *Efectividad de las prácticas de desarrollo de bajo impacto: revisión de la literatura y sugerencias para investigaciones futuras*, 223(7), 4253-4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Ahiablame, L., & Shakya, R. (2016). Modelar a escala de cuenca los efectos de la reducción de inundaciones del desarrollo de bajo impacto. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>
- Bibi, T. S., Kara, K. G., Bedada, H. J., & Bededa, R. D. (2023). Evaluación de los efectos de la urbanización y el cambio climático sobre la eficacia de los sistemas de drenaje de aguas pluviales en la gestión de inundaciones urbanas en la ciudad de Robe, Etiopía mediante la aplicación de PCSWMM. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101291>
- Dotto, C. B. S., Kleidorfer, M., Deletic, A., Rauch, W., & McCarthy, D. T. (2014). Efecto de la incertidumbre de los datos medidos en los modelos de aguas pluviales urbanas. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.025>
- Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A., & Davis, J. (2010). Se ha desarrollado un nuevo manual de aplicación del Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.11.009>
- Herrera, C. L. (2023). *Hydraulic modeling using SWMM software for a stormwater network in Fila Alta, province of Jaén 2021*. https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/6551/1/TL_HerreraSaavedraCatherine.pdf

- Hydraulics in XPSWMM*. (2018, julio 29). ICM SWMM & ICM InfoWorks, SWMM5.
<https://swmm5.org/2018/07/29/organized-output-tables-for-runoff-and-hydraulics-in-xpswmm-2018/>
- Innovyze*. (2022).
<https://help.innovyze.com/space/infoswmm/17597927/2D+Flood+Routing+Basics>
- James, William, Rossman, & Lewis A. (2023). *Users Guide To SWMM 5, Edn 13*. Computational Hydraulics Inc. (CHI).
<https://www.chiwater.com/Files/UsersGuideToSWMM5Edn13.pdf>
- Kwak, D., Kim, H., & Han, M. (2016). Para tipos de diseño de desarrollo de bajo impacto en áreas de desarrollo pequeñas que utilizan XPSWMM, potencial de control de escorrentía.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.483>
- Lee, J. H., & Bang, K. W. (2000). Identificar la escorrentía de aguas pluviales urbanas.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00325-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00325-5)
- Mayou, L. A., Alamdari, N., Ahmadisharaf, E., & Kamali, M. (2024). Los modelos hidrológicos a escala fina revelan los efectos del clima futuro y los cambios en el uso/cobertura del suelo sobre la escorrentía urbana. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121284>
- Morales, G. B., & Matamoros, D. (2009). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH CENTER*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/243/1/392.pdf>
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). Una revisión de cómo se utilizan los modelos de inundaciones urbanas en las estrategias de mitigación de inundaciones.
<https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>

- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., & Gustafsson, L.-G. (2008). Aguas pluviales suburbanas en Helsingborg, Suecia: los efectos de la urbanización y el cambio climático en el drenaje. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.006>
- Software de modelación hidráulica, una herramienta que debe usarse con criterio.* - INDEAN. (2022, octubre 10). <https://indean.co/blog/software-de-modelacion-hidraulica-una-herramienta-que-debe-usarse-con-criterio/>
- SWMM Theory—Innovyze. (2021). <https://help.innovyze.com/space/xps/19661214/SWMM+Theory>
- Tu, M.-C., & Smith, P. (2018). Modelado de parámetros de lavado y acumulación de contaminantes para SWMM según el uso de la tierra en una cuenca urbana semiárida. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3777-2>
- Urban Drainage application.* (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2024, de <https://www.tatukgis.com/News/Market-Leading-Urban-Drainage-Modeling-Application.aspx>
- US EPA, O. (2014, mayo 21). (SWMM). <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- XPSWMM. (s. f.). Innovyze. Recuperado 23 de junio de 2024, de <https://innovyze.com/products/stormwater-sewer-flood-modeling/xpswmm/>
- Zapata-Sierra, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2010). Using a rainfall simulator on permeable soils, hydrographs created through kinematic wave theory are studied. *Agrociencia*, 4(8), 3-884.