

Design and construction of a pilot prototype of a Sustainable Urban Drainage System (SUDS) for flood control in Panama

Astrid Ruiz Almanza¹, Haydée Osorio Ugarte²,

^{1,2}Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá, astrid.ruiz@utp.ac.pa, haydee.osorio@utp.ac.pa

*Abstract-. Urban flooding in Panama affects thousands of people annually and generates millions of dollars in losses, exacerbated by rapid urbanization and climate change. Therefore, the purpose of this research is to promote the transition from traditional drainage systems to Sustainable Urban Drainage Systems (SuDs) through the design and construction of a pilot-scale prototype for flood risk reduction in urban environments. The implementation of this prototype aims to innovate in climate adaptation tools that support multiple Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda. The methodology was developed in four stages: analysis of the hydraulic behavior of a traditional drainage model, design and digitization of the prototype, technical characterization and construction of the prototype, and monitoring and evaluation of the prototype. The results included a prototype SuDs represented in a bioretention area (1.25m x 0.80m), with four layers: three soil layers (gravel, silica sand, loam-sand soil mixture, mulch) as a filtration medium, and an outer layer of vegetation consisting of Vetiver and Sansevieria (*Chrysopogon zizanioides* and *Dracaena Trifasciata*). Additionally, an experimental rainfall simulator and an industrial sensor network were assembled as a tool to evaluate hydrological performance and validate the efficiency of the prototype under simulated conditions.*

Keywords - SuDs, Prototype, Flooding, Urban area, Bioretention area.

Diseño y construcción de prototipo piloto de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) para el control de inundaciones en Panamá

Astrid Ruiz Almanza¹, Haydée Osorio Ugarte²,

^{1,2}Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Panamá, astrid.ruiz@utp.ac.pa, haydee.osorio@utp.ac.pa

Resumen. Las inundaciones urbanas en Panamá afectan anualmente a miles de personas y generan pérdidas millonarias, incrementadas por la rápida urbanización y el cambio climático; por ello, el propósito de esta investigación es promover la transición de los drenajes tradicionales hacia Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) por medio del diseño y construcción de un prototipo a escala piloto para la reducción del riesgo de inundaciones en entornos urbanos. Con la implementación de este prototipo se busca innovar en herramientas de adaptación climática que apoyen múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. La metodología se desarrolló en cuatro etapas: análisis del comportamiento hidráulico de un modelo a escala de drenaje tradicional, diseño y digitalización del prototipo, caracterización técnica y construcción de prototipo y monitoreo y evaluación de prototipo. En los resultados se incluyó un prototipo SUDS representado en un área de biorretención (1.25mx0.80m), con cuatro capas, tres de suelo (grava, arena de sílice, mezcla de suelo marga-arenosa, mulch) como medio de filtración y el nivel externo con una capa de vegetación de Vetiver y Sansevieria (*Chrysopogon zizanioides* y *Dracaena Trifasciata*). Adicionalmente, se ensambló un simulador de lluvia experimental y una red sensores industriales como herramienta para evaluar el desempeño hidrológico y validar la eficiencia del prototipo en condiciones simuladas.

Palabras clave- SUDS, Prototipo, Inundación, Área urbana, Área de biorretención

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los impactos del cambio climático han aumentado tanto en frecuencia como en intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, lo que supone una amenaza importante para los entornos urbanos [1]. Según el Banco Mundial (2023), las inundaciones afectan a más de 1,8 millones de personas cada año, y se estima que las pérdidas globales por interrupción de la actividad empresarial debido a las inundaciones ascienden a 26 900 millones de dólares anualmente [2]. Esto coincide con un ciclo hidrológico intensificado asociado a la variabilidad y el cambio climático, combinado con una rápida urbanización [3].

En este contexto, la Ciudad de Panamá ha experimentado un crecimiento urbano acelerado y, en gran medida, no planificado, triplicando su extensión en los últimos 25 años.

Este proceso ha alterado significativamente los procesos hidrológicos naturales, debido a la degradación de áreas verdes y a la expansión de superficies impermeables, lo que ha derivado en un incremento considerable de la escorrentía superficial [4], [5].

Como consecuencia, las inundaciones se han consolidado como el fenómeno natural más recurrente en el país, evidenciando las limitaciones del sistema de drenaje pluvial y sanitario, el cual frecuentemente excede su capacidad operativa, debido a deficiencias en mantenimiento, diseño y expansión [6], [7].

Investigaciones recientes han cuestionado el funcionamiento de los drenajes tradicionales frente a los cambios ambientales significativos ocurridos en las últimas décadas, donde muchos, por su incapacidad para adaptarse a circunstancias críticas, se ven comprometidos por el aumento de las superficies impermeables que produce una mayor cantidad de escorrentía. [8] [9], [10] [11]

Al analizar esta problemática, surge la necesidad de desarrollar un prototipo de Sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS), solución derivada de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Con la finalidad de sustentar la aplicación de los espacios verdes como una característica creciente en la planificación urbana del último siglo, donde diseñar y construir un prototipo SUDS como elemento de la red de drenaje permitirá recoger, transportar, descontaminar, retener, filtrar y evacuar el agua de lluvia de una manera sostenible, y justifica los beneficios ecológicos y sociales que estos proporcionan a largo plazo [12], [13] [14].

El objetivo principal es evaluar un SUDS a pequeña escala para la reducción del riesgo de inundaciones en áreas urbanas, como alternativa para abordar la gestión de las aguas pluviales, que incluyen diferentes tecnologías y técnicas, las cuales impulsan el desarrollo urbano sostenible, la adaptación al cambio climático, su mitigación y la protección contra los riesgos naturales [7], [8], [10], [11].

Esta investigación, además, se ajusta a siete Objetivos de Desarrollo Sostenible, y busca innovar mediante la generación de herramientas de adaptación al cambio climático que apoyen en el avance de los ODS, como: ODS N°4: educación de calidad; fortalece la implementación de herramientas visuales dentro del sector educativo, ODS N°5: Igualdad de género; impulsa la investigación liderada por mujeres que asumen generar soluciones a los retos ambientales actuales, ODS N°6: Agua limpia y saneamiento; el desarrollo de este SUDS genera una base científica para una mejor gestión del agua pluvial, ODS N°9: Industria, innovación e infraestructura; moderniza la infraestructura, promoviendo tecnologías y procesos limpios para la reducción de la infraestructura gris e impermeable, ODS N°11: Ciudades y comunidades sostenibles; su aplicación reduce las pérdidas económicas directas provocadas

por los desastres, haciendo hincapié en la protección de personas en situaciones de vulnerabilidad, ODS N°13: Acción por el clima; incorpora medidas al cambio climático en políticas, estrategias y planes internacionales aplicables a Panamá, ODS N°17. Alianza para lograr los objetivos. Este proyecto fomenta alianzas multidisciplinarias que integran conocimientos científicos, tecnológicos y ambientales, esenciales para reducir los impactos del desarrollo en la cantidad y calidad de la escorrentía, imitando y restaurando los procesos hidrológicos existentes antes del desarrollo urbano.

II. IMPACTOS

A. Impacto científico y político

El desarrollo de este prototipo destaca la importancia de integrar la restauración ecológica y la densificación urbana, impulsadas por los retos medioambientales y espaciales. Se busca fortalecer el Pilar estratégico 9: Infraestructura sostenible del NAP (Plan nacional de acción contra el cambio climático, Panamá), que señala conocer el estado actual de medidas de adaptación integradas en las obras públicas para identificar las principales vulnerabilidades y definir los problemas principales concretos a los que se enfrenta el sector.

Por lo tanto, el reto de diseñar una infraestructura que dé respuestas constructivas a las necesidades del país, a la vez que se ajuste a las nuevas condiciones climáticas, a través del nexo entre la infraestructura natural y la construida.

Por ello, se plantea mediante la construcción de este prototipo SUDS la incorporación de criterios de edificación sostenible dentro del marco normativo panameño que reconozcan la integridad del ecosistema con el fin de dar respuesta a los retos generados por las inundaciones.

Con esto se busca asegurar que los recursos financieros para construir y mantener la infraestructura estipulen que las masas de agua, en la medida de lo posible, se mantengan o devuelvan a su estado natural para maximizar su potencial ecológico.

B. Impacto ambiental y Social

La aplicación de este prototipo SUDS busca mejorar la gestión descentralizada de las aguas pluviales al incorporar la reducción de la escorrentía superficial lo que beneficiara a las poblaciones urbanas que actualmente son sujetos de inundaciones. Ambientalmente, técnicas como los biofiltros, que dilatan la entrega de la escorrentía mediante una red de intervenciones de capas de suelo y vegetación, permite que los sedimentos y los contaminantes se asienten o sean absorbidos por la vegetación y el suelo. Lo que además de reducir el volumen y la concentración de contaminantes, impacta en la calidad de vida de los ciudadanos, puesto que, el agua antes de entrar en el sistema de alcantarillado o en los cuerpos de agua naturales [15], es conducida por las urbes impactando en su paisaje urbano.

Con la implementación de este prototipo SUDS se busca mejorar la calidad del agua basado en el aumento de la cobertura de espacios verdes para absorber y filtrar

eficazmente la escorrentía superficial y, por lo tanto, la cantidad de agua que escurre sobre los pavimentos lo que disminuye el riesgo de inundaciones urbanas.

C. Impacto económico

Aunque la aplicación de SUDS destacan por sus beneficios hidrológicos, ambientales y sociales, su implementación escala de igual manera a un valor económico, estrechamente relacionado con su implementación coste beneficioso. Hemos de considerar que en cada evento de inundación se reducirá pérdidas materiales, desplazamientos humanos, pérdidas agrícolas que pueden costar millones de dólares anualmente [16], [17].

Al mismo tiempo, esta innovación promueve un crecimiento sostenible y un desarrollo resiliente, que reducirá la necesidad de redes de alcantarillado a base de concreto, lo que se traduce en menores costos de construcción y mantenimiento, puesto que los SUDS requerirán menor frecuencia de intervención de mantenimiento gracias a sus procesos naturales de infiltración, retención y evaporación.

Además, se espera involucrar a los promotores de desarrollos urbanos a considerar los SUDS en la valorización inmobiliaria significativa al transformar predios vulnerables hídricos en desarrollos resilientes y atractivos mediante la aplicación de SUDS. Al mismo tiempo donde se contrarresta la urbanización totalmente impermeable.

En consideración, se observará un impacto en diversos Ámbitos económicos al optar por incorporar infraestructura verde en las próximas décadas.

IV. METODOLOGIA

La presente investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental de un SUDS a escala piloto. El estudio se orientó a evaluar el desempeño hidráulico de este prototipo mediante la simulación controlada de eventos de lluvia, con el fin de analizar la respuesta del sistema en términos de infiltración, retención y calidad del agua, bajo condiciones representativas de entornos urbanos.

Desarrollo

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en cuatro etapas principales:

I. Análisis del comportamiento hidráulico de un modelo a escala de drenaje tradicional.

En esta primera fase, la investigación se estructuró a partir de un análisis diagnóstico del comportamiento hidráulico en zonas críticas de Ciudad de Panamá, específicamente en Juan Díaz (Villa Las Acacias y Calle Primera) y Ciudad del Saber, donde se documentó la transición de canales abiertos a redes fragmentadas y subdimensionadas. Este trabajo de campo permitió comprender el comportamiento real de los drenajes tradicionales y detectar las principales oportunidades de mejora al adaptar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

II. Diseño y digitalización del prototipo.

Seguido, de esta inspección de campo se fundamentó el diseño experimental del SUDS donde se determinó el dimensionamiento del prototipo bajo una escala 1:2. Considerando obtener una representatividad física cercana a la realidad sin incurrir en los costos y la complejidad logística de una construcción a tamaño real.

Utilizando la documentación técnica y fotográfica de las zonas críticas de Ciudad de Panamá como línea base (Ver etapa 1). Se aplicó la estrategia de [18], orientada a fortalecer los pilares de diseños de SUDS para reducir, retrasar y guiar la escorrentía como se observa en la Fig 1.

Además, se consideró las bibliográficas que fueron estudiadas como directrices para creación e implementación de SUDS en diferentes lugares del mundo, por lo que avalan su relevancia y efectividad, por ello, como se observa en la Fig 2 se diseñó un SUDS tipo área de biorretención para la retención y filtración del agua, como medida de adaptación a las inundaciones.

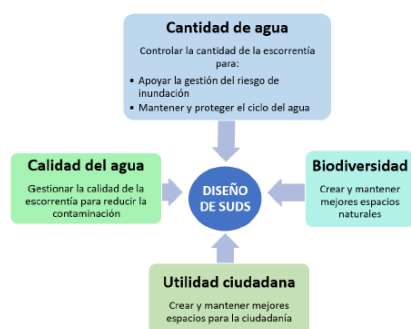


Fig. 1: Pilares en el diseño de los SUDS. Fuente: Adaptación de CIRIA (2015).

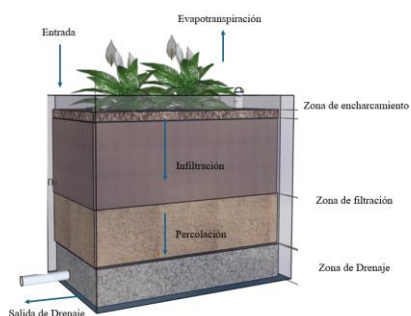


Fig. 2: Visualización 3D del prototipo SUDS. Fuente propia.

III. Caracterización técnica y construcción de prototipo.

Se describe el equipo empleado en el desarrollo constructivo del proyecto:

Materiales de Construcción:

- Tubos de PVC: Conductos principales para el transporte y distribución del flujo de agua dentro del sistema de drenaje.
- Codos y Uniones de pvc: Accesorios esenciales para cambiar la dirección del flujo y conectar diferentes tramos de tubería de forma hermética.
- Tanque acrílico: Estructura transparente que permite observar el comportamiento del agua y las capas de filtración en tiempo real.
- Mezcla de arena sílice, tierra y grava: Sustrato filtrante diseñado para retener sedimentos y permitir la infiltración natural del agua.
- Plantas nativas: Elementos biológicos encargados de la fitorremediación y la absorción de exceso de humedad en el sistema.

Como se observa en la Tabla I, se comparó características técnicas con las bibliográficas consultadas en la fase de metodología previo a la construcción del prototipo.

TABLA I
COMPARACIÓN DE DETERMINADOS DOCUMENTOS DE GUÍA DE SUDS
GLOBALES EXISTENTES

Referencia	[19]	[18]	[13]	
Área de estudio	Navarra, España	Valencia, España	Newcastle, UK	Panamá, Panamá
Nivel	Local	Local	Nacional	Local
Año de revisión	2023	2021	2021	2026
Tipología SUDS	Parterres inundables	Parterres inundables	Área de biorretención	Área de biorretención
Composición de capas	Vegetación/mantilla/medio filtrante/geotextil/capa drenante/tubo dren	Vegetación/sustrato permeable/geotextil/grava/tubo dren	Mulch/suelo para plantar/geotextil/grava/tubo dren	Vegetación/mulch/suelo +compost/arena de sílice/geotextil/grava/ tubo dren
Profundidad media	0.4-1.0m	0.4-1.0m	0.7m	0.2-0.6m
Vegetación	Nativa (No específica)	Gramíneas y herbáceas	Plantas leñosas y herbáceas	Vetiver y Sansevieria
Escala de aplicación	Real	Real	Real	Esc: 1:2 Laboratorio

Posteriormente, en esta fase el prototipo de SUDS se estructuró en un cajón de material acrílico de 1.25mx0.80m, con cuatro capas granulares y orgánicas optimizadas para la reducción de la carga contaminante; además, se implementó un geotextil no tejido como capa de separación para proporcionar resistencia estructural entre los componentes de relleno como se observa en la Fig 3, así también se colocó un tubo de drenaje dentro de las capas a colocar como medio de salida del agua filtrada, dado en la Fig 4 para fines de medición del agua filtrada en pruebas posteriores.

Para la capa inferior o capa base de la estructura se seleccionó gravilla #5 por su alto índice de vacíos (generalmente entre el 35% y 40%), lo que la hace excelente para capas de almacenamiento de agua de lluvia.

Como capa siguiente, se colocó un geotextil no tejido, sobre el cual se extendió arena de sílice, arena utilizada como un medio granular filtrante que mitiga eficazmente los contaminantes de las aguas pluviales urbanas, sólidos en suspensión, materia orgánica y nitrógeno.

También, se incorporó una mezcla de suelo marga arenosa o arena arcillosa que desempeña un papel fundamental en muchos servicios ecosistémicos, como la filtración del agua, la captura de carbono, siendo lo suficientemente permeable como para permitir el paso del agua y evitar que la superficie del área de retención se empoce.

Superpuesto, se colocó una capa de Mulch, mantillo orgánico que posee efecto positivo en la producción de cultivos y la calidad del suelo en diferentes climas y ecosistemas, reduciendo la energía cinética de la lluvia, lo que evita el desprendimiento de sedimentos y la conservación de la erosión del suelo.

Finalmente, en el nivel más externo, se sitúa la capa de vegetación seleccionada para los SUDS, en este caso, se optó por la (*Chrysopogon Zizanioides* y *Dracaena Trifasciata*) vetiver y sansevieria, como se observa en la Fig 5, especies que reducen las emisiones de CO₂, y en el contexto de la fitorremediación, contribuyen a mejorar la calidad del medio ambiente para su uso en sitios contaminados.

Aunque el vetiver y la vanseviera no son una especie nativa de Panamá, son una especie introducida en la región neotropical, su uso en este prototipo SUDS se justifica por ser un cultivar estéril (no produce semillas viables) [20], lo que elimina el riesgo de dispersión descontrolada o desplazamiento de flora nativa. Su selección sobre especies locales se fundamenta en su capacidad reducir la velocidad del flujo de agua hasta en un 40% a 60% cumpliendo con los criterios de resiliencia exigidos por manuales internacionales.

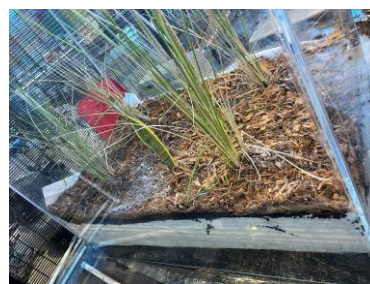


Fig. 3: Capas de drenaje incorporadas al SUDS.

Fuente Propia.



Fig. 4: Prototipo SUDS a escala piloto, Área de Biorretención.

Fuente Propia.



Fig. 5: Plantones de vetiver y sansevieria previos a su incorporación al prototipo SUDS. Fuente Propia.

Posteriormente, al comparar con la bibliografía utilizada, se diseñó un simulador de lluvia como se observa en la Fig 6, adaptado a las características de zonas climáticas de Panamá.

Este sistema se potenció con una bomba de 3700 W, cuya capacidad resultó totalmente adecuada para suministrar el caudal esperado, garantizando intensidades de lluvia simuladas consistentes con los requerimientos hidrológicos del prototipo SUDS.

Asimismo, se seleccionó el tipo de boquilla más apropiado, donde se obtuvo una distancia suficiente como se observa en la Fig 7, para proteger la uniformidad de la secuencia de gotas y minimizar distorsiones por viento o evaporación durante las pruebas.

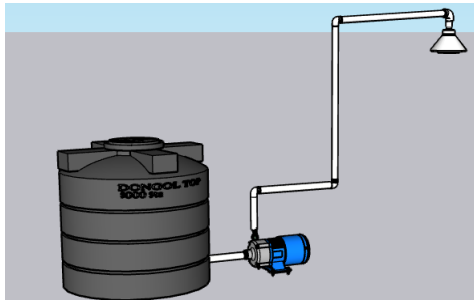


Fig. 6: Visualización 3D de Simulador de lluvia. Fuente Propia.

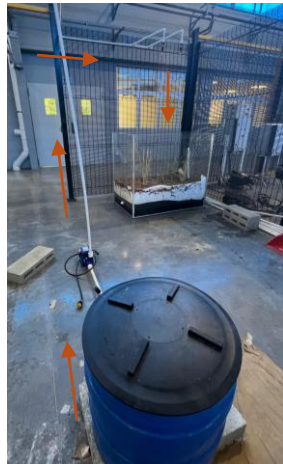


Fig. 7: Simulador de lluvia construido a escala piloto. Fuente Propia.

IV. Monitoreo y evaluación de prototipo.

A continuación, se describe el equipo empleado en esta fase, como se observa en la Fig 8 y 9.

Materiales Tecnológicos

- Arduino Mega 2560: Microcontrolador central que procesa los datos de todos los sensores y coordina la lógica del prototipo.
- Sensor analógico de Turbidez: Dispositivo óptico que mide la claridad del agua detectando la presencia de partículas suspendidas.
- Sensor de temperatura impermeable DS18B20: Sonda térmica sellada que permite medir la temperatura del agua de forma precisa sin dañar la electrónica.
- Sensor medidor de conductividad eléctrica (CE) analógico industrial: Sensor para determinar la cantidad de sales disueltas en el agua, clave para evaluar la pureza del efluente.
- Sensor medidor de pH analógico industrial: Instrumento de alta precisión para monitorear los niveles de acidez o alcalinidad del agua filtrada.
- Fotómetro Lovibond MD600: fotómetro portátil multiparamétrico de alta precisión, diseñado para el análisis rápido y fiable de la calidad del agua en campo o laboratorio.

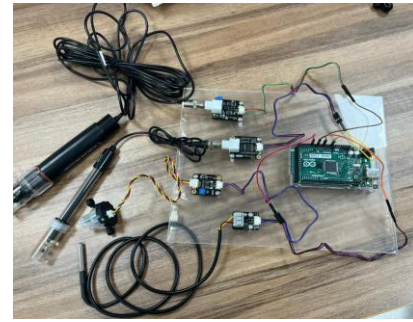


Fig. 8: Red de Sensores Arduino para medición de parámetros físicoquímicos. Fuente Propia.



Fig. 9: Fotómetro Lovibond MD600. Fuente Propia.

En esta fase se desarrolló el algoritmo de medición en lenguaje C++ para el funcionamiento de la red de sensores, que posee como hardware central un microcontrolador Arduino, como se observa en la Fig 10, implementado principalmente para medir los parámetros físicos.

En el Arduino Mega 2560, todos los sensores operan con multiplexación temporal, en intervalos de 1011ms por canal, garantizando una frecuencia de muestreo efectiva permitiendo el envío y recepción eficiente de mensajes.

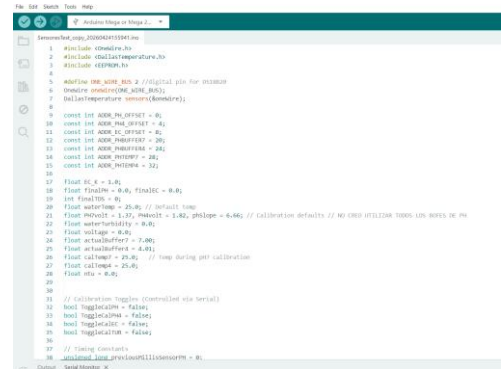


Fig. 10: Código C++ para programación de sensores industriales Arduino. Fuente Propia.

Además, se simuló la precipitación mediante una regadera hecha con materiales de PVC, con tres (3) tipos de soluciones de agua, entre ellas: agua con sedimentos, agua con soluciones de fertilizantes de base nitrógeno, agua del grifo (solución de control).

Al compararlo con la bibliografía utilizada, se adaptó a las características de zonas climáticas de Panamá para diseñar el simulador de lluvia.

Se obtuvo valores de precipitaciones en la ciudad de Panamá se calcularon a partir de las ecuaciones (1) y (2) tras la revisión de la data del instituto de meteorología e hidrología de Panamá donde se calculó la precipitación a aplicar en el prototipo según guías del Ministerio para la Transición Ecológica, considerando en estudios parecidos este tipo de denominación de zonas climáticas como se observa en la Fig 11.

ZONA A	Precipitaciones frecuentes y constantes de intensidad media-baja. Riesgo medio de inundaciones. Temperaturas medias y bajas. Esta climatología se da predominantemente en la zona norte del país.
ZONA B	Precipitaciones estacionales. Periodos secos y periodos lluviosos continuados. Riesgo medio de inundaciones. Humedades bajas y temperaturas medias y bajas. Este clima corresponde a las zonas interiores de la península.
ZONA C	Lluvias esporádicas y de gran intensidad. Episodios de torrencialidad y elevado riesgo de inundaciones, desertificación y sequía. Temperaturas medias y altas y humedad elevada. Climatología predominantemente en la zona del mediterráneo.

ZONA CLIMÁTICA	PLUVIOMETRÍA (mm)			
	Precipitación media (mensual)	Precipitación media (anual)	Precipitación máxima	Precipitación mínima
A	79,14	949,72	357,86	0,50
B	37,47	449,58	221,89	0,00
C	32,92	395,05	304,64	0,00

Fig. 11: Tabla de zonas climática en relación con la pluviometría.
Fuente: Ministerio de Transición Ecológica, España.

Además, se utilizó la ecuación de Kirpich, fórmula empírica para obtener un estimado del tiempo de concentración (T_c) de una cuenca. En este caso, en estudio de la cuenca de Juan Díaz (Área Urbana Inundable de Panamá).

$$T_c = 0.01947 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (1)$$

T_c : tiempo de concentración (en minutos)

T : tiempo de concentración (en minutos)

L : longitud del canal principal

S : pendiente promedio de la cuenca

Para el análisis hidrológico de la subcuenca Juan Díaz se utilizó la curva IDF local, obteniendo una intensidad de lluvia de 3,12 mm/h para el período de retorno de 50 años.

Aplicando la ecuación de Kirpich con una longitud de canal de 22 500 m, pendiente del 1 % y coeficiente de rugosidad 2,3, se obtuvo un tiempo de concentración de 2,3 horas (142 minutos).

Con estos datos se calculó el caudal pico de escorrentía mediante la fórmula racional $Q = C \cdot I \cdot A$, resultando en valores de $8,66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ tanto para el escenario de escala piloto.

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (2)$$

C : coeficiente de escorrentía (adimensional)

I : intensidad de lluvia (en mm/h).

A : área de drenaje (ha)

De acuerdo con la clasificación de [21], y los resultados obtenidos, se optó por utilizar intensidades de lluvia controladas y constantes, categorizadas como fuertes ($i > 10 \text{ mm/h}$) y muy fuertes ($i > 20 \text{ mm/h}$) por un tiempo determinado de 30, 15 y 10 minutos.

Luego, una vez la filtración iniciara se recolectó el agua por el tubo de salida para conocer el volumen del agua filtrada.

Posteriormente, se midió los parámetros físicos como: pH, Conductividad eléctrica, TDS, turbidez y temperatura, además, parámetros químicos como: nitratos, sulfatos y fosfatos, con las herramientas antes mencionadas.

Lo ensayos del prototipo se realizaron alrededor de 8 veces, donde se determinó la rapidez de infiltración, retención de la escorrentía superficial, así también como la cantidad de agua que es capaz de permeabilizar durante un tiempo determinado el prototipo SUDS, y su efectividad al mejorar la calidad de agua.

V. RESULTADOS

Con el objetivo de validar que los SUDS son capaces de capturar y tratar el agua pluvial antes de que llegue a los cuerpos de agua naturales, reduciendo la cantidad de contaminantes como sedimentos, metales pesados, nutrientes y productos químicos.

Para evaluar la eficiencia del sistema, se realizaron pruebas con diferentes intensidades de lluvia. Los principales hallazgos se observan en la Tabla 2, donde se registra una reducción en el caudal pico y el volumen de escorrentía, mediante procesos de infiltración y retención temporal.

TABLE 2
CAUDAL Y VOLUMEN EN LA ENTRADA Y SALIDA DE SUDS BAJO
DIFERENTES INTENSIDADES DE LLUVIA

Intensidad	Parámetro	Entrada	Salida	Reducción (%)
>20 mm/hr	Volumen (ml)	225	190	15.6
	Caudal (ml/s)	45.0	38.0	
>10 mm/hr	Volumen (ml)	101	65.0	35.6
	Caudal (ml/s)	20.13	13.0	

La eficiencia de los sistemas urbanos de drenaje sostenible se midió al comparar la calidad del agua del agua a la entrada y a la salida del sistema, a través de pruebas de medición de parámetros fisicoquímicos.

Lo resultados del monitoreo muestran una mejora notable en la mayoría de los parámetros evaluados tras la filtración a través del sistema en comparación con las condiciones iniciales observadas.

Como se presenta en la Fig 12, el sistema permitió reducciones significativas en varios parámetros. Los sulfatos, nitratos y sólidos suspendidos totales presentaron una reducción entre 58% y 37.5%.

La turbidez mostró una reducción mayor, como se muestra en la Fig 13, disminuyendo desde 1356 NTU valores donde no se detecta sedimento alguno. En contraste, los fosfatos y la conductividad eléctrica presentaron un ligero incremento, este comportamiento ha sido reportado previamente en SUDS cuando el mulch actúa como sumidero de fósforo, es decir, que una vez el agua empieza a pasar por esta capa, presenta una exportación de fósforo y/o iones del medio filtrante al agua descargada, no obstante, es un incremento no significativo.

Respecto al pH, se observó un cambio considerable, presentando un aumento de 3.12 al iniciar a 6,52, acercándose a un rango neutro recomendado para aguas superficiales.

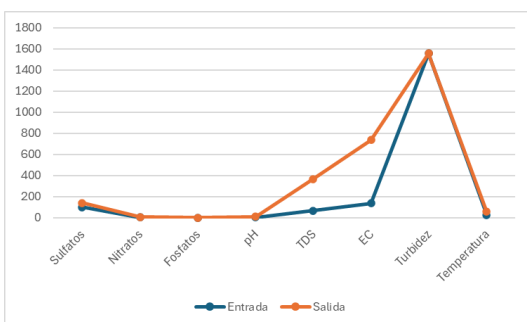


Fig. 12: Comportamiento de los parámetros medidos. Fuente Propia.

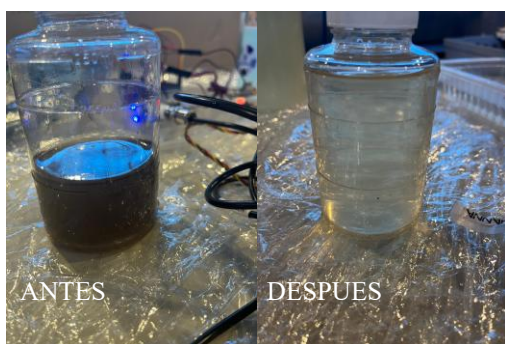


Fig. 13: Demostración visual de la efectividad del sistema de biorretención en la reducción de turbidez del agua pluvial. Fuente propia.

Durante la realización del estudio, se llevaron a cabo observaciones para evaluar la viabilidad de la vegetación plantada. Cabe destacar que la capa vegetal estuvo expuesta a un estrés hídrico significativo debido a las cantidades de ensayos repetitivos simulados, además, los ensayos se desarrollaron en condiciones de interior, lo que permitió aislar el cultivo de la exposición solar directa y otros factores climáticos externo.

Es importante considerar que tras el mes de plantación e inicios de ensayos las plantas se encontraban en un estado favorable y, salvo algunas hojas secas, no se observó pudrición. Por lo tanto, se puede concluir que la especie vegetal y el tipo de suelo que conforman la capa vegetal fueron correctamente seleccionados. Sin embargo, es importante considerar, para una evaluación completa del funcionamiento de las especies seleccionadas, se deberían realizar pruebas adicionales en condiciones reales, al menos anualmente, abarcando todas las etapas del ciclo de vida de la vegetación, así como las diferentes estaciones del año (verano, transición e invierno).

V. DISCUSIÓN

En el diseño del prototipo SUDS la replicabilidad se vio afectada por variables ambientales que los manuales estándar suelen omitir, como datos locales de curvas IDF utilizados, especies vegetales nativas, control de vectores, ajuste de pH y química del suelo. La región Latinoamericana en donde se realiza este experimento contrasta con los diseños de acuerdo con el clima de Asia a Europa.

En este estudio el prototipo diseñado posee un potencial significativo para alinearse con los estándares internacionales de las SbN y los SUDS, tales como la 'Guía de Adaptación al Riesgo de Inundación' del Ministerio para la Transición Ecológica de España y el manual 'The SUDS Manual (C753F)' de CIRIA en el Reino Unido [19][13]. Al integrar estos marcos normativos, el proyecto trasciende el diseño mecánico para convertirse en una infraestructura verde resiliente.

Estos resultados y proyecciones nos indican la viabilidad del prototipo como herramienta de adaptación climática a la región de Panamá.

VI. CONCLUSIÓN

En base a la metodología y los resultados presentados, se concluye que es viable adaptar el diseño y construcción de un prototipo piloto SUDS para el control de inundaciones en panamá. Su implementación podría generar una reducción significativa del riesgo de inundación mediante el control de escorrentía y mejoras en la calidad del agua, contribuyendo así a un enfoque de sostenibilidad urbana alineado con los marcos normativos y estándares internacionales.

No obstante, en Panamá no existen soluciones idénticas al SUDS desarrollado, lo que limita la posibilidad de comparar los resultados obtenidos con otros estudios previos.

Por consiguiente, para validar este tipo prototipo en entornos reales, se deben realizar más ensayos con diferentes configuraciones y soluciones para obtener un rango de datos más amplio, o replicar el presente estudio en otros contextos.

La presente investigación representa una base preliminar importante para Panamá. Por ello, se recomienda avanzar en próximas investigaciones hacia la implementación de esta solución a escala real en un entorno no controlado, evaluando su desempeño bajo intensidades de lluvias reales. Esto permitirá escalar su funcionamiento, generar datos relevantes y consolidar su implementación como sistema calificado para la gestión de aguas pluviales en entornos urbanos del país.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento a la secretaria nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT AIP) por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1] X. Gao, X. Yi, M.-P. Kwan, y H. Li, «Does flood risk matter in shaping climate gentrification? Evidence from Brisbane (2006–2021)», *Cities*, vol. 168, p. 106496, ene. 2026, doi: 10.1016/j.cities.2025.106496.
- [2] «Cada gota cuenta: es tiempo de actuar en América Latina y el Caribe», World Bank. Accedido: 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2023/03/21/time-for-water-action-in-latin-america-and-caribbean>
- [3] «Flood hazard and risk maps: A key instrument for flood risk management», World Bank Blogs. Accedido: 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/en/water/flood-hazard-and-risk-maps-key-instrument-flood-risk-management>
- [4] T. D. Fletcher *et al.*, «SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage», *Urban Water J.*, vol. 12, n.º 7, pp. 525-542, oct. 2015, doi: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- [5] M. K. McLeod y S. B. Mickovski, «The Use of End-of-Line SUDS for Residential Development», *J. Sustain. Res.*, vol. 6, n.º 2, jun. 2024, doi: 10.20900/jsr.20240031.
- [6] T. L. P. Do, M. Coffin, P. Gentet, L. Hwang, y S. Lee, «Development of a Tabletop Hologram for Spatial Visualization: Application in the Field of Architectural and Urban Design», *Buildings*, vol. 14, n.º 7, jul. 2024, doi: 10.3390/buildings14072030.
- [7] Banco Mundial, «Evaluación del riesgo de inundación y priorización de infraestructura híbrida para la reducción del riesgo en la cuenca del río Tocumen, Ciudad de Panamá». 2020. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/491331610619371616/pdf/Executive-Summary.pdf>
- [8] I. M. Kourtis y V. A. Tsihrintzis, «Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 771, p. 145431, jun. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145431.
- [9] Y. Chen, H. Zhou, H. Zhang, G. Du, y J. Zhou, «Urban flood risk warning under rapid urbanization», *Environ. Res.*, vol. 139, pp. 3-10, may 2015, doi: 10.1016/j.envres.2015.02.028.
- [10] M. Fernández-Gonzalvo, C. Hernández-Crespo, M. Martín, y I. Andrés-Doménech, «Comparison of permeable pavements effluent under Atlantic and Mediterranean rainfall regimes: A mid-term laboratory experience», *Build. Environ.*, vol. 206, p. 108332, dic. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108332.
- [11] H. Storch y N. K. Downes, «A scenario-based approach to assess Ho Chi Minh City's urban development strategies against the impact of climate change», *Cities*, vol. 28, n.º 6, pp. 517-526, dic. 2011, doi: 10.1016/j.cities.2011.07.002.
- [12] I. Bogunović y V. Filipović, «Mulch as a nature-based solution to halt and reverse land degradation in agricultural areas», *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 34, p. 100488, ago. 2023, doi: 10.1016/j.coesh.2023.100488.
- [13] B. Woods-Ballard, H. R. Wallingford, R. Kellagher, H. R. Wallingford, P. Martin Black & Veatch, C. Jefferies University of Abertay, R. Bray Robert Bray Associates, y P. Shaffer CIRIA, «The SuDS manual». 2007.
- [14] M. Chen, W. Li, Z. Dong, y D. Zhang, «Characterization of Silica Sand-Based Pervious Bricks and Their Performance under Stormwater Treatment», *Water*, vol. 16, n.º 18, sep. 2024, doi: 10.3390/w16182625.
- [15] P. S. R. Kulkarni, A. K. Desai, y M. R. T. Narayan, «Integrating Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) for Flood Mitigation and Water Quality Enhancement in Urban Areas», *J. Res. Civ. Archit. Eng.*, vol. 10, n.º 1, feb. 2026, Accedido: 25 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://admin.mantechpublications.com/index.php/JoRCAAE/article/view/2796>
- [16] B. Thodesen, B. Time, y T. Kvande, «Sustainable Urban Drainage Systems: Themes of Public Perception—A Case Study», *Land*, vol. 11, n.º 4, abr. 2022, doi: 10.3390/land11040589.
- [17] A. G. Aguilar, «SUDS: desarrollo urbano sostenible y oportunidades para la gestión del agua pluvial en Latam», iAgua. Accedido: 25 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/alfonso-galicia-aguilar/suds-desarrollo-urbano-sostenible-y-oportunidades-gestion-agua-pluvial>
- [18] Laura de la Fuente García Cicle Integral de l'Aigua Sara Perales Momparder Green Blue Management S.L. (Grupo TYPESA) Miguel Rico Cortés Green Blue Management S.L. (Grupo TYPESA) Ignacio Andrés Doménech Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente Juan Bautista Marco Segura Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, «Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje

Sostenible en la Ciudad de València». junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia_Basica_para_el_Diseño_de_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_en_la_Ciudad_de_Valencia_V01.pdf

[19]Ministerio para la Transición Ecológica Secretaría General Técnica Centro de Publicaciones, «GUÍAS DE ADAPTACIÓN AL RIESGO DE INUNDACIÓN: SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE». octubre de 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/mites/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/adaptación/guias-adaptacion/guia-adaptacion-riesgo-inundacion-sistemas-urbano-drenaje-sostenible_tcm30-503726.pdf

[20]«Sansevieria trifasciata and Chlorophytum comosum botanical biofilter for cigarette smoke phytoremediation in a pilot-scale experiment—evaluation of multi-pollutant removal efficiency and CO₂ emission | Air Quality, Atmosphere & Health | Springer Nature Link». Accedido: 30 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-019-00775-9>

[21]H. W. Goh *et al.*, «A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, n.º 15, pp. 14904-14919, may 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05041-0.