

EVALUACIÓN DE BARRILES DE LLUVIA Y TECHOS VERDES PARA MITIGAR INUNDACIONES EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO, ESTADO DE COLIMA, MÉXICO

EVALUATION OF RAIN BARRELS AND GREEN ROOFS FOR FLOOD MITIGATION IN A WARM SUB-HUMID CLIMATE - STATE OF COLIMA, MEXICO

AVALIAÇÃO DE BARRIS DE CHUVA E TELHADOS VERDES PARA MITIGAÇÃO DE ENCHENTES EM CLIMA QUENTE SUBÚMIDO, ESTADO DE COLIMA, MÉXICO

Samir Josué Figueroa-Avalos

Ingeniero Civil
 Estudiante de Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana (MASGU)
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0001-9023-0050>
g2246004@colima.tecnm.mx (Autor de Correspondencia)

Dora Angélica Correa-Fuentes

Doctora en Arquitectura
 Profesora investigadora del cuerpo académico consolidado Ciudad Sostenible de la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0002-1804-5480>
dora.correa@colima.tecnm.mx

Jesús López-de-la-Cruz

Doctor en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
 Profesor Investigador y Director de la Facultad de Ingeniería Civil
 Universidad de Colima, Coquimatlán, México
<https://orcid.org/0000-0001-8230-6414>
jlopez71@ucol.mx

Jorge Armando Gutiérrez-Valencia

Doctor en Educación
 Coordinador de la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0009-0005-5394-064X>
jorge.gutierrez@colima.tecnm.mx

Ignacio Barajas-Ávalos

Magíster en Arquitectura Profesor,
 Departamento de Ciencias de la Tierra
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0003-4834-370X>
ignaciobarajas@colima.tecnm.mx



RESUMEN

Las inundaciones en las áreas urbanas se presentan con mayor frecuencia producto del intensivo cambio de uso de suelo y los efectos del cambio climático. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) buscan replicar el ciclo hidrológico local y con ello, reducir las inundaciones. Se evaluaron dos tipologías: los Barriles de Lluvia (BLL) y los Techos Verdes (TV). El objetivo fue determinar qué técnica alcanza mayor eficiencia en la reducción de volúmenes de escorrentía en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima, México. La simulación se realizó, a través del software Storm Water Management Model (SMWW), y los resultados indicaron que los BLL y TV lograron reducir el volumen de la escorrentía un 14.36% y 26.40% respectivamente, bajo la condición más crítica.

Palabras clave

inundaciones, sustentabilidad, cambio climático, hidrología

ABSTRACT

Flooding in urban areas is becoming ever more frequent due to intensive land-use change and the effects of climate change. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) aim to replicate the local hydrological cycle and, thereby, reduce flooding. Two typologies were evaluated: Rain Barrels (RB) and Green Roofs (GR). The objective is to determine which technique is more efficient in reducing runoff volumes in the city of Villa de Álvarez, Colima, Mexico. The simulation was carried out using the Storm Water Management Model (SWMM) software, and the results indicate that RB and GR reduced runoff volume by 14.36% and 26.40% respectively, under the most critical conditions.

Keywords

floods, sustainability, climate change, hydrology.

RESUMO

As enchentes em áreas urbanas estão ocorrendo com mais frequência como resultado da intensa mudança no uso da terra e dos efeitos das mudanças climáticas. Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) têm como objetivo replicar o ciclo hidrológico local e, assim, reduzir as inundações. Duas tipologias foram avaliadas: barris de chuva (BLL) e telhados verdes (TV). O objetivo foi determinar qual técnica alcança maior eficiência na redução dos volumes de escoamento na cidade de Villa de Álvarez, Colima, México. A simulação foi realizada usando o software Storm Water Management Model (SMWW), e os resultados indicaram que o BLL e o TV foram capazes de reduzir o volume de escoamento em 14,36% e 26,40%, respectivamente, sob a condição mais crítica.

Palavras-chave:

enchentes, sustentabilidade, mudanças climáticas, hidrologia.

INTRODUCCIÓN

Los cambios en el uso del suelo, resultado de la urbanización, representan un proceso antropogénico relevante en las inundaciones; los componentes urbanos como edificios, azoteas, calles y estacionamientos reducen la permeabilidad del suelo (Zúñiga-Estrada et al., 2022); las superficies impermeables en áreas urbanas alteran significativamente el ciclo hidrológico local, por ende, se reduce la infiltración del agua de lluvia y se aumenta el volumen y la velocidad de las escorrentías (Lizárraga-Mendiola et al., 2017); estos factores sobrecargan los sistemas de drenaje, lo que incrementa el riesgo de inundaciones; aunado a lo anterior, como parte de los efectos del cambio climático se espera que los eventos de lluvia sean más frecuentes e intensos (Zuniga-Teran et al., 2020).

Recientemente se impulsó la infraestructura verde, que consiste en implementar soluciones basadas en la naturaleza para obtener beneficios ecosistémicos, especialmente en la regulación hídrica; estas prácticas se conocen como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Reino Unido, desarrollos de bajo impacto (LID) o mejores prácticas de gestión (BMP's) en Norteamérica y técnicas alternativas (AT's) en Francia (Fletcher et al., 2015).

Estas prácticas buscan mitigar los picos máximos de escorrentía generados por la impermeabilización del suelo debida a la urbanización, que imita la hidrología natural preexistente. Algunas de estas prácticas son los techos verdes, pozos de infiltración, pavimentos permeables, humedales, cunetas verdes y barriles de lluvia (Liu et al., 2015); estas soluciones promueven la evapotranspiración, la infiltración, la recarga de acuíferos y mejora calidad de las escorrentías, a través de la eliminación de contaminantes (Lizárraga-Mendiola et al., 2017).

Existen numerosas investigaciones sobre el comportamiento de las escorrentías urbanas al implementar diversas técnicas. Guo et al. (2019), desarrollaron un modelo LID en Tsingtao, una de las ciudades esponja piloto en China, donde se implementaron los barriles de lluvia, techos verdes, jardines de lluvia y pavimentos permeables, lográndose reducir la escorrentía entre un 20.7% y un 63.2%. Andrés-Doménech et al. (2018) analizaron el comportamiento hidrológico de techos verdes en Valencia, España; y demostraron su eficacia incluso en climas mediterráneos, donde el coeficiente de escurrimiento se redujo por debajo del 75%; por otro lado, Chapman y Hall (2021), analizaron el comportamiento de la escorrentía en diferentes escenarios en que aplicaron celdas de biorretención, techos verdes y pavimentos permeables, destacándose que la superficie disponible para SUDS efectivos disminuye al aumentar la densidad de viviendas, lo que obliga a adaptar la infraestructura verde, con priorización de techos verdes en viviendas.

La evaluación de estas soluciones requiere simular sus efectos en un modelo hidrológico, un proceso bastante complejo debido a las múltiples variables involucradas. El programa Storm Water Managment Model (SWMM), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), permite modelar el comportamiento hidrodinámico de las aguas pluviales (Mendoza González et al., 2017); SWMM integra un editor LID que permite modelar tecnologías sustentables, además de estimar la respuesta de la cuenca en términos de volumen de escorrentía, calidad del agua, infiltración, evaporación y carga de contaminantes (Zúñiga-Estrada et al., 2022).

Este estudio destaca a la ciudad de Villa de Álvarez, ubicada en el occidente de México, como un ejemplo de una zona urbana que ha sufrido inundaciones recurrentes durante la temporada de lluvias, entre los meses de junio a octubre. El objetivo de esta investigación es evaluar dos tipologías de los SUDS que comúnmente se aplican en las viviendas, los barriles de lluvia (BLL) y los techos verdes (TV); se utiliza SWMM para simular y comparar el comportamiento hidrológico de ambos modelos y determinar la técnica que ofrece mejores resultados; esta evaluación se basa en variables como el volumen de escorrentía, la escorrentía pico y el coeficiente de escorrentía, para diferentes intensidades de precipitación.

METODOLOGÍA

LOCALIZACIÓN Y CLIMA

Villa de Álvarez, se sitúa en el estado de Colima, México; con una población de 149,723 habitantes, se posiciona como la tercera ciudad más poblada del estado (Figura 1); en consecuencia, la ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional notable, superior al promedio nacional, que lo ha llevado a un desarrollo urbano disperso y ha evidenciado la falta de infraestructura adecuada (Ramírez-Rivera et al., 2021).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la ciudad posee un clima cálido subhúmedo, una temperatura media anual de 25°C y una precipitación media anual estimada en los 900 mm, las lluvias predominan en verano, entre junio y octubre (INEGI, 2016). Villa de Álvarez ha experimentado un aumento en la frecuencia de inundaciones en las últimas dos décadas, principalmente por tormentas tropicales asociadas a huracanes y sistemas convectivos de mesoescala (SCM); ejemplos de estos eventos son los huracanes Jova (2011), Manuel (2013) y Patricia (2015), los que registraron precipitaciones acumuladas de 200 mm en 24 horas; también se presentan inundaciones debido a lluvias intensas de corta duración (Pérez-González et al., 2017), producto de SCM, que resultan complicados de dar seguimiento.

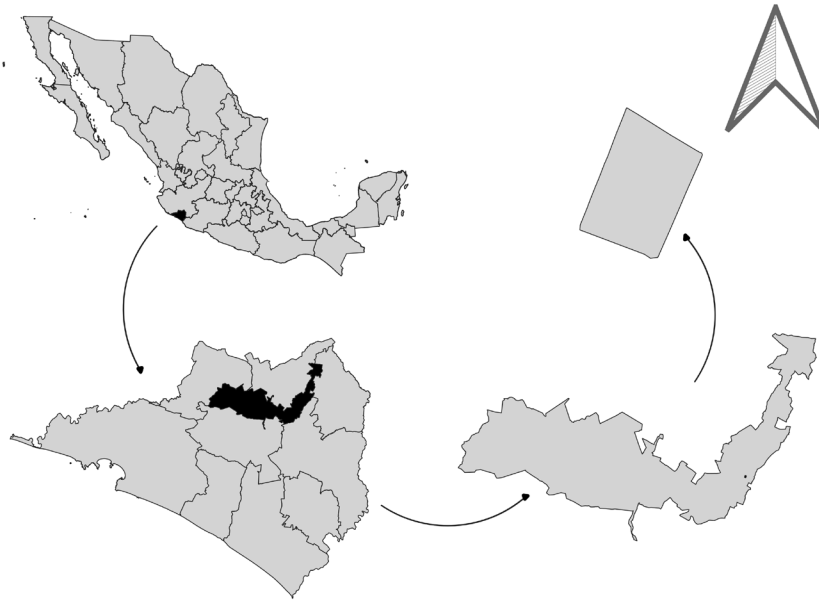


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 2. Delimitación de subcuencas. Elaboración de los autores.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El crecimiento urbano en Villa de Álvarez se ha extendido hacia el norte, lo que incrementó las superficies impermeables y, como resultado, eventos recurrentes de inundación en las zonas bajas. Las soluciones convencionales basadas en la ampliación del drenaje pluvial no han logrado mitigar el problema; resulta evidente cambiar la perspectiva en el manejo del agua pluvial, en que se adopte infraestructura verde que

armonice el desarrollo urbano con el ciclo hidrológico natural.

La selección de la zona de estudio se basó en la necesidad de implementar técnicas SUDS aguas arriba para gestionar eficientemente el agua en zonas bajas, teniendo en consideración, el área promedio de azoteas y la futura vulnerabilidad a inundaciones.

En la investigación se utilizó QGIS, con datos vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional de México (INEGI,

Tabla 1. Requisitos mínimos para la construcción del modelo. Fuente: Ponce de León García (2022).

Parámetros	Definición	Unidades
Área de la cuenca	Superficie total de cada subcuenca	Hectáreas
Longitud de la cuenca	Distancia total de la cuenca	Metros
Ancho de la cuenca	Relación entre el área y la longitud	Metros
Pendiente de la cuenca	Relación porcentual entre las elevaciones y la distancia	Porcentual
%-Imperv	Porcentaje del área impermeable	Porcentual
N-Imperv	Valor de Manning para la fracción impermeable	Adimensional
N-Perv	Valor de Manning para la fracción permeable	Adimensional
Número de curva	Modelo de infiltración del Soil Conservation Service (SCS)	Adimensional

Tabla 2. Características generales de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Subcuenca	Área	Longitud	Ancho	Pendiente	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv
1	0.13	140.61	9.25	2.29	68.01	0.014	0
2	0.85	161.72	52.56	2.14	53.99	0.014	0.06
3	0.82	158.73	51.66	2.69	63.11	0.014	0
4	0.78	157.50	49.52	2.16	63.58	0.014	0
5	0.77	156.09	49.33	2.53	63.53	0.014	0
6	0.44	152.89	28.78	1.83	64.46	0.014	0

2023); el área de estudio de 3.80 hectáreas se caracteriza por un uso de suelo predominantemente residencial, que ocupa el 74.15%, lo que refleja una alta densidad de vivienda; las calles adoquinadas representan el 20.93%, y las áreas verdes constituyen el 4.92% restante; la delimitación de las subcuencas se recurrió al uso de rásters de relieve continental con una resolución de 5 m y escala de 1:10,000 (INEGI, 2019).

Con base en la topografía, se logró delimitar 6 subcuencas en el área de estudio (Figura 2), además, se observó que la escorrentía superficial se desplaza de norte a sur por las calles; esta situación se debe a la falta de un sistema de drenaje pluvial en la zona que facilite una conducción adecuada del agua.

Para la construcción del modelo en SWMM, fue necesario identificar las características mínimas que requiere el sistema (Tabla 1).

Los parámetros se determinaron mediante QGIS, sin embargo, el porcentaje del área impermeable se determinó según el uso de suelo de cada subcuenca, y se utilizó su respectivo coeficiente de escurrimiento, obtenido de la tabla 2.4 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: drenaje pluvial (CONAGUA, 2019, p. 57); los valores de Manning para la fracción impermeable y permeable se obtuvieron de acuerdo con la tabla 5-6 del libro Hidráulica

de canales abiertos (Chow, 1994, p. 108); el número de curva se estimó a partir de datos vectoriales de hidrología superficial y edafología (INEGI, 1981; INEGI, 2007), y, el uso de suelo y vegetación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021). Mediante los datos vectoriales, se clasificó el tipo de suelo de acuerdo con sus propiedades físicas y en función de su permeabilidad, para ello, se utilizaron los valores del Cuadro No.11 (Díaz Herrera, 1987, p. 64), y se destaca que pertenece a una clasificación de suelo del tipo B; por último, se calculó el número de curva en relación a la clasificación del suelo y su uso; se tomaron los valores presentes en la tabla 2-2a del libro Hidrología urbana para cuencas pequeñas, TR-55 (Cronshey et al., 1986, pp. 2-5) para un suelo tipo B y un uso de suelo con asentamientos humanos, por lo que el valor designado al número de curva fue de 92.

Las características principales de las subcuencas se muestran en la Tabla 2.

SELECCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO

La estimación de la precipitación de diseño se realizó, a través de registros históricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), se seleccionó la estación climatológica 6052-E.T.A 254 Comala por su influencia sobre la zona de estudio, de dicha estación, se recopilaron

datos de las precipitaciones máximas mensuales del período de 1975 al año 2017.

Los datos recopilados fueron sometidos a pruebas estadísticas para validar su uso en la investigación, que incluye la detección de valores atípicos, prueba Helmert, t de Student, prueba de Cramer y prueba de independencia de Anderson (Escalante Sandoval y Reyes Chávez, 2002), los resultados satisfactorios de estas pruebas confirman que la serie de precipitaciones máximas en 24 horas es independiente y está libre de tendencias.

Una vez validadas las hipótesis para la aplicación del análisis de frecuencias, se implementa la técnica para construir las curvas de intensidad-duración-período de retorno (I-D-Tr), que permiten estimar la precipitación para duraciones menores a 24 horas; se opta por utilizar el método de Frederick Bell debido que su aplicación se ajusta mejor para condiciones de períodos de retorno entre 2 a 100 años y duraciones entre 5 a 120 minutos; la fórmula de Bell se expresa en la siguiente Ecuación 1 (Campos Aranda, 1998, pp. 4–56).

$$P_t^T = (0.35 \ln T + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

T es el periodo de retorno.

t duración de la tormenta.

P_{60}^2 precipitación de tormenta para un periodo de retorno de 2 años con duración de una hora.

La duración de tormenta, también conocida como tiempo de concentración, se determina al emplear la Ecuación 2 de Kirpich (CONAGUA, 2019, p. 41), manifestándose en una hora el tiempo de concentración en el área de estudio.

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{lt}{\sqrt{S_{ic}}} \right) \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

l es la longitud del cauce principal (m).

S_{ic} pendiente media del cauce (adimensional).

La construcción de las curvas I-D-Tr permite obtener hietogramas de diseño de precipitación para períodos de retorno de 2, 5 y 10 años, que asume una duración de tormenta de una hora; las precipitaciones de diseño correspondientes a estos períodos fueron de 47.90 mm, 63.23 mm y 74.82 mm, respectivamente, la Figura 3 presenta los hietogramas utilizados en SWMM para la construcción del modelo.

ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

La humedad del suelo es importante para procesos como la infiltración y la evaporación, para representar

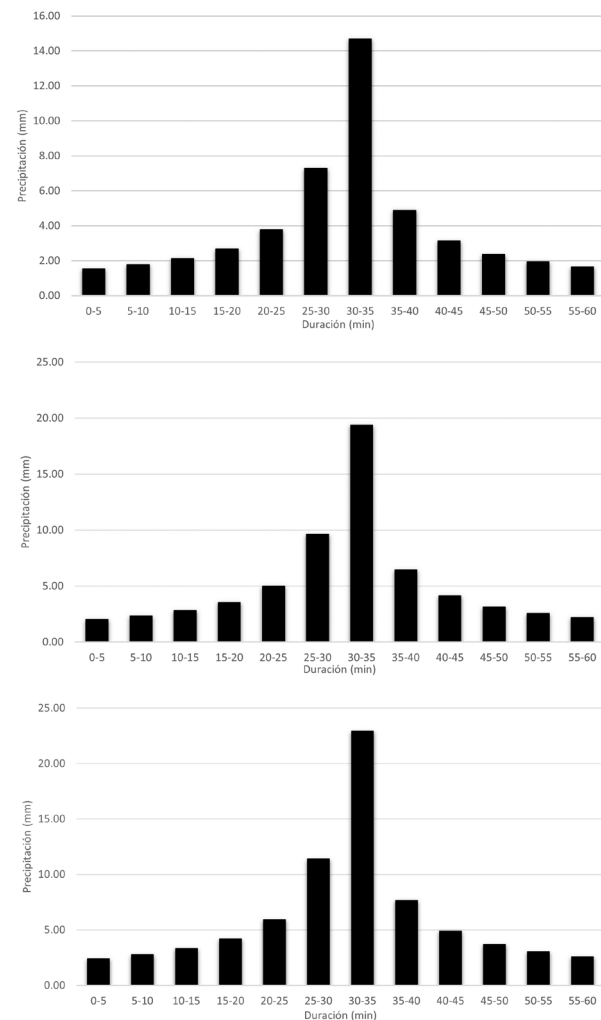


Figura 3. Hietogramas para diferentes periodos de retorno: a) 2 años, b) 5 años y c) 10 años. Fuente: Elaboración de los autores.

de manera precisa la humedad del suelo durante el período de simulación, especialmente al inicio del evento de lluvia, el modelo hidrológico requiere datos de evapotranspiración (Andrés-Doménech et al., 2018).

Debido a que las estaciones climatológicas no registran los datos necesarios, se calcula la evapotranspiración mensual potencial, se utiliza la fórmula de Thornwaite (Ecuación 3), esta fórmula se basa principalmente en la temperatura media, y se ajusta según el número de horas de luz solar en un sitio específico, la evapotranspiración se calcula para el mismo período de años que la precipitación.

$$PE_m = 16N_m \left(\frac{10\overline{T_m}}{I} \right)^a \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

PE_m evapotranspiración potencial (mm/mes).

N_m factor de ajuste mensual relacionado a las horas de luz solar (sin unidades).

$\overline{T_m}$ Temperatura mensual promedio (°C).

a Constante (Ecuación 4).

I Índice térmico anual (Ecuación 5).

$$a = 6.7 \times 10^{-7} I^3 - 7.7 \times 10^{-5} I^2 + 1.8 \times 10^{-2} I + 0.49$$

(Ecuación 4)

$$I = \sum_m^i = \sum_m \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.5}$$

(Ecuación 5)

La evapotranspiración potencial se estimó en milímetros por mes, para obtener el valor diario, fue necesario dividirlo entre el número de días del mes debido que la simulación de la lluvia es a partir de un solo evento de precipitación; además, se selecciona el valor correspondiente a septiembre, el mes con mayor precipitación en la región (Tabla 3).

Tabla 3. Evapotranspiración potencial por día. Fuente: Elaboración de los autores.

Mes	PEm (mm/día)	Factor corrección	PEm Corregida (mm/día)
Enero	2.55	0.95	2.43
Febrero	2.74	0.90	2.47
Marzo	3.00	1.03	3.09
Abril	3.52	1.05	3.70
Mayo	4.14	1.13	4.67
Junio	4.40	1.11	4.87
Julio	4.15	1.14	4.72
Agosto	4.07	1.11	4.50
Septiembre	3.84	1.02	3.92
Octubre	3.79	1.00	3.79
Noviembre	3.37	0.93	3.14
Diciembre	2.88	0.94	2.72

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La simulación del modelo consta de tres escenarios: A, el estado actual de la zona sin intervenciones; B, implementación BLL; y C, implementación TV; la capacidad de los BLL es de 2500 litros para cada vivienda, ésta se determina con base en productos comerciales. Por otro lado, las azoteas, al ser principales receptoras del agua de lluvia en la investigación, tienen una superficie promedio de 80m². Además, se considera que los TV cubrieran el total de la azotea, la Tabla 4 presenta el diseño de los TV utilizados en SWMM, basados en los parámetros de Chapman y Hall (2021).

La zona de estudio al carecer de un sistema de drenaje pluvial, se modelaron las calles (7m de anchura y 15cm de altura) como canales rectangulares de superficie libre en

Tabla 4. Parámetros usados en la simulación SWMM. Fuente: Chapman y Hall (2021).

Tipología SUDS	Parámetro	Valores usados en el modelo
TV	Altura de la berma (mm)	20
	Fracción del volumen de vegetación	0.05
	Rugosidad de la superficie (Manning n)	0.24
	Pendiente %	0
	Capa del suelo	
	Espesor (mm)	80
	Porosidad (Fracción de volumen)	0.464
	Capacidad de campo (Fracción de volumen)	0.20
	Punto de marchitez (Fracción de volumen)	0.10
	Conductividad (permeabilidad – mm/hr)	119.40
	Pendiente de la conductividad	45.05
	Carga de succión (mm)	49.80
BLL	Material para el drenaje	
	Espesor (mm)	25
	Fracción de vacíos	0.50
	Rugosidad (Manning n)	0.30
	Altura del barril (mm)	1320



Figura 4. Construcción del modelo en SWMM. Fuente: Elaboración de los autores.

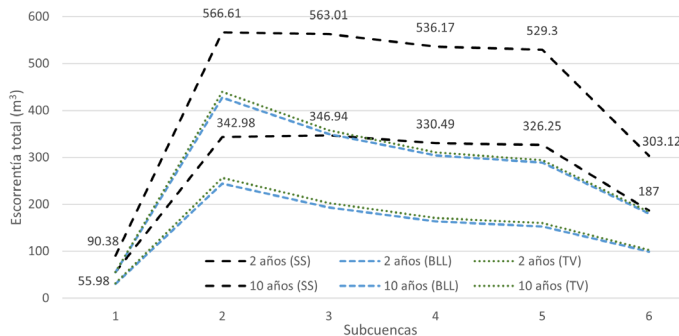


Figura 5. Escurrimiento de acuerdo con valores máximos y mínimos.
 Fuente: Elaboración de los autores.

SWMM para simular la evacuación del agua. Las salidas de cada subcuenca se establecieron en nodos ubicados al final de éstas, que simulan que la escurrimiento generada desciende hasta su punto más bajo y se conecta con la calle que une las subcuencas (Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El escenario A, sin SUDS (SS), se simuló bajo tres condiciones de lluvias (2, 5 y 10 años) con duración de una hora, lo que permitió evaluar el comportamiento hidrológico; la subcuenca 2 presentó los valores más altos de acuerdo con los volúmenes de escurrimiento, con una precipitación de 47.90 mm, generó 342.98 m³ de escurrimiento y un flujo máximo de 308.23 lps; con 63.23 mm de precipitación, estos valores aumentaron a 469.46 m³ y 436.61 lps, respectivamente; finalmente, con 74.82 mm de lluvia, se alcanzaron 566.61 m³ de escurrimiento y 536.09 lps de flujo máximo; de acuerdo con los resultados, se evidenció una relación directa entre el aumento de la intensidad de precipitación y la escurrimiento.

La Figura 5 muestra los resultados de la simulación al considerar la aplicación de SUDS para eventos de precipitación con períodos de retorno de 2 y 10 años, representaron las intensidades mínimas y máximas, respectivamente. En general, tanto los BLL como los TV muestran resultados satisfactorios en la retención de agua para las tres condiciones de precipitación; la subcuenca 2, presenta los mayores volúmenes de escurrimiento para una lluvia de 10 años y, experimenta una reducción significativa de 139.15 m³ con los BLL y de 126.94 m³ con los TV; no obstante, la subcuenca 5, logra la mayor reducción absoluta, al alcanzar 240.75 m³ con BLL y 235.35 m³ con TV.

Los BLL como los TV siguen un comportamiento similar para una precipitación de 2 años, aunque los BLL gestionan ligeramente mejor la escurrimiento pluvial que

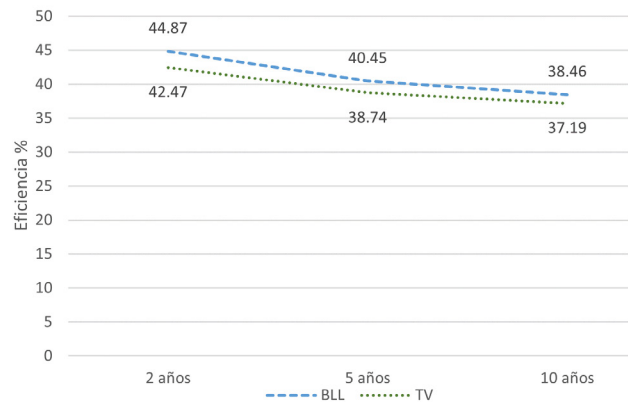


Figura 6. Relación de eficiencia general en la reducción de volúmenes de escurrimiento para diferentes períodos de retorno. Fuente: Elaboración de los autores.

los TV, la diferencia entre ambos no es significativa según el análisis descriptivo. Los porcentajes de eficiencia en el volumen para la subcuenca 2 con una lluvia de 2 años son del 28.86% para los BLL y del 25.30% para los TV, a pesar de su alta eficiencia en tormentas de 2 años, los BLL presentan desbordamientos incluso en eventos de esta magnitud, sin embargo, incluso con desbordamientos, su desempeño es superior que los TV en precipitaciones de mayor intensidad. En la misma subcuenca, con una precipitación de 10 años, la eficiencia de los BLL alcanza el 24.56%, mientras que los TV alcanzan el 22.40%.

La Figura 6 evidencia la eficiencia de ambas tecnologías de manera general y demuestra que su eficacia depende de la magnitud de la precipitación; los BLL muestran un mejor desempeño en cualquier condición de precipitación; no obstante, disminuye su eficiencia al aumentar la intensidad de la lluvia debido a su capacidad de almacenamiento limitada (2500 l). Los desbordamientos que ocurren al superar esta capacidad aumentan la escurrimiento superficial; por otro lado, los TV presentan un desempeño inferior a los BLL en todas las condiciones de precipitación evaluadas. En la zona de estudio, ambas técnicas son funcionales para los períodos de retorno analizados; sin embargo, ambos mantienen una disminución en la eficiencia con precipitaciones de mayor intensidad.

El escurrimiento pico, refiere al flujo máximo que escurre por una cuenca durante un evento de lluvia, las técnicas lograron reducir los escurrimientos pico (Figura 7); se observa una diferencia notable en la reducción de la escurrimiento pico entre los TV y los BLL, a diferencia de la reducción de volúmenes de escurrimiento, donde los BLL mostraban un mejor desempeño, en la reducción de la escurrimiento pico, los TV superan a los BLL en términos de eficacia; la subcuenca 2 presenta un menor rendimiento en la reducción de la escurrimiento pico debido a la menor cantidad de técnicas implementadas, en contraste, la subcuenca 5 logra una mayor reducción gracias a su

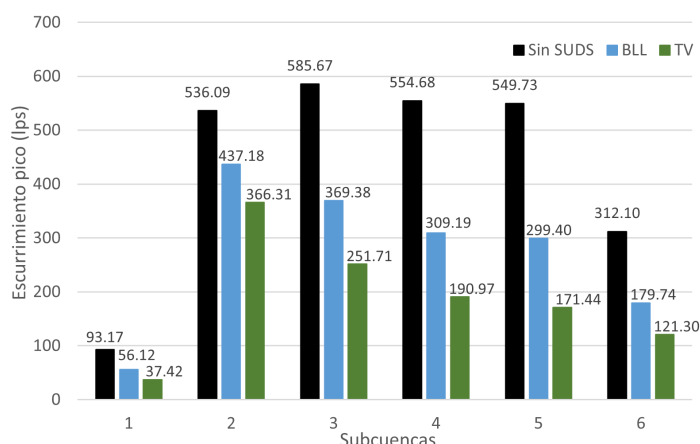


Figura 7. Esguerrimiento pico para un período de retorno de 10 años.
 Fuente: Elaboración de los autores.

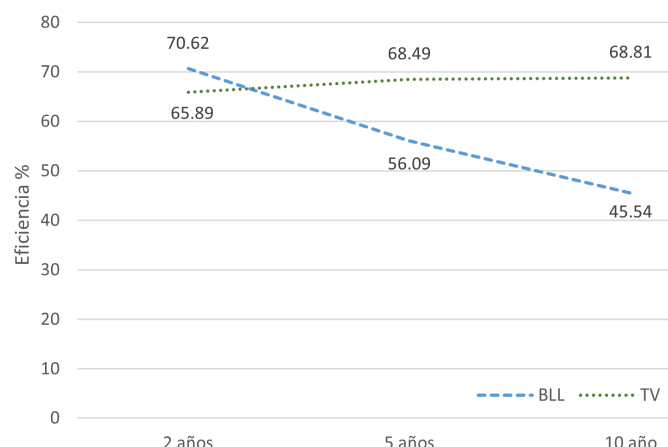


Figura 8. Comparación de la efectividad de BLL y TV en la reducción de la esgorrentía pico para diferentes períodos de retorno. Fuente: Elaboración de los autores.

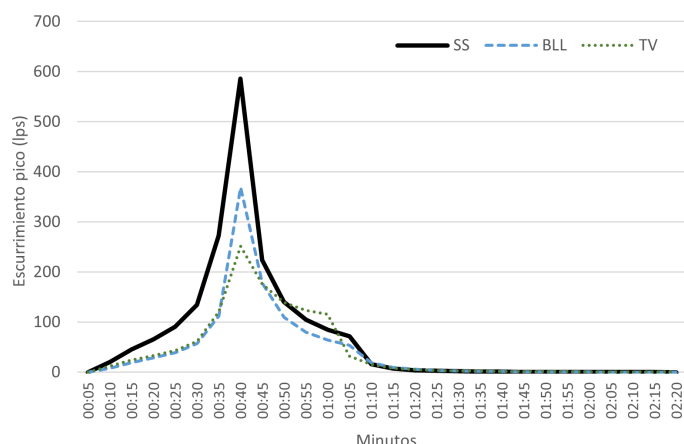


Figura 9. Hidrograma de la subcuencia 3 para un período de retorno de 10 años. Fuente: Elaboración de los autores.

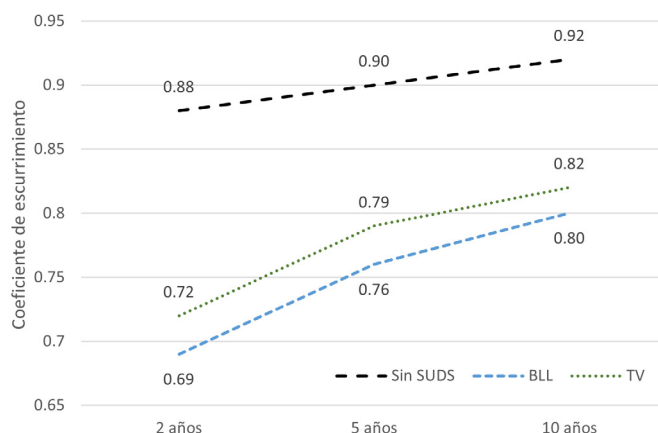


Figura 10. Comparación del coeficiente de esgorrentimiento medio en las subcuencas aplicando BLL y TV. Fuente: Elaboración de los autores.

mayor densidad de viviendas, lo que permite una mayor aplicación de técnicas de captación.

Se evaluó el rendimiento general de ambas técnicas bajo diferentes condiciones de precipitación; la Figura 8 muestra que los BLL destacan en su eficiencia para lluvias de 2 años, pero su rendimiento disminuye en lluvias de mayor intensidad; por otro lado, los TV muestran un mejor desempeño en condiciones de precipitaciones más intensas. En términos generales, los TV superan a los BLL en la reducción del caudal pico, en su mayoría, en eventos de mayor intensidad, los BLL alcanzan su máxima eficiencia (70.62%) en lluvias con período de retorno de 2 años, mientras que los TV demuestran una eficiencia notablemente superior (60.81%) en lluvias con período de retorno de 10 años.

En la subcuencia 3, el esgorrentimiento pico se alcanza a los 40 minutos de iniciada la precipitación, la implementación de BLL reduce este pico en un 36.93%, mientras que los TV logran una reducción aún mayor del 57.02% (Figura 9), las técnicas presentan rendimientos satisfactorios en función de reducir el caudal pico; sin embargo, existe una diferencia significativa entre ambas técnicas; los BLL logran una reducción significativa del caudal pico, al mostrar un comportamiento satisfactorio: sin embargo, los TV superan ampliamente esta eficiencia, al atenuar el caudal pico en más del 50% en comparación con el escenario sin intervención.

Se observa que el tiempo de concentración en el escenario sin intervención presenta un ascenso y descenso pronunciado; aunque los BLL reducen el caudal

Tabla 5. Significancia estadística de las diferencias entre escenarios. Fuente: Elaboración de los autores.

Año	Volumen AvsB	Volumen AvsC	Volumen CvsB	Caudal AvsB	Caudal AvsC	Caudal CvsB	Coefficiente AvsB	Coefficiente AvsC	Coefficiente CvsB
2 años	0.0049	0.004	0.008	0.0051	0.0059	0.0090	0.0002	0.0006	0.00003
5 años	0.0046	0.004	0.010	0.0057	0.0056	0.0059	0.0002	0.0006	0.00010
10 años	0.0044	0.037	0.014	0.023	0.0053	0.0047	0.0004	0.0007	0.00030

pico, exhiben un comportamiento similar, aunque a menor escala; en contraste, los TV disminuyen el caudal pico y aplanan la curva del hidrograma, definiéndolos como la técnica más efectiva.

Se evaluó el coeficiente de escorrentía que evidencia una notable reducción en todos los casos; en la Figura 10, se presenta como el coeficiente de escorrentía en el escenario A aumenta de manera constante con el incremento de precipitación, no obstante, ambas técnicas logran reducirlo considerablemente, siendo los BLL los más efectivos en este aspecto; a pesar de mayor reducción observada con los BLL, los TV presentan un comportamiento más estable frente a lluvias más intensas.

Se analizó si la reducción observada en las tres variables era estadísticamente significativa; aunque el análisis descriptivo muestra una disminución en términos absolutos, es fundamental determinar si esta reducción es estadísticamente significativa para confirmar la efectividad de las intervenciones respecto a cada escenario; se realizaron pruebas t para muestras pareadas, donde un valor de $P < 0.05$ indica diferencias significativas entre los escenarios. Los resultados obtenidos muestran reducciones estadísticamente significativas en las variables analizadas (Tabla 5).

CONCLUSIONES

La simulación con SWMM permite observar la respuesta de las subcuencas ante diferentes condiciones de lluvia y su comportamiento al implementar técnicas sostenibles. Los BLL logran reducciones significativas en el volumen de escurrimiento, al destacar con un mejor desempeño en eventos de precipitación de mayor intensidad, a diferencia de los TV, que muestran su mejor comportamiento en tormentas menos intensas.

Ambas técnicas reducen el volumen, el caudal pico y el coeficiente de escurrimiento; sin embargo, los TV demuestran un rendimiento superior (68.81%), que supera los BLL (45.54%) en la gestión de

escurrimientos pico promedio para lluvias de 10 años; incluso el hidrograma evidencia que los TV consiguen mayor aplanamiento de la curva que los BLL.

Los resultados permiten demostrar la efectividad de estas soluciones sostenibles para gestionar las escorrentías en el área de estudio; al intentar mimetizar las condiciones hidrológicas naturales, es posible recuperar el ciclo hidrológico local y mitigar los impactos de los escurrimientos urbanos para tormentas de diferentes intensidades; es fundamental implementar soluciones basadas en la naturaleza para gestionar la escorrentía, especialmente para reducir el caudal pico y minimizar el riesgo de inundaciones.

En esta investigación se evaluó la aplicación de las técnicas para un 90% de las viviendas, un porcentaje posiblemente poco realista; la principal limitación del estudio es la falta de calibración del modelo debido a la complejidad de determinar todos los parámetros necesarios; se sugiere que futuras investigaciones se centren en la calibración y evaluación para diferentes porcentajes de aplicación en viviendas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, S.J.F.A.; Curación de datos, S.J.F.A.; Análisis formal, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Adquisición de financiación D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Investigación, S.J.F.A.; Metodología, S.J.F.A.; Administración de proyecto, D.A.C.F.; Recursos; Software. S.J.F.A.; Supervisión, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Validación, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Visualización, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Escritura – borrador original, S.J.F.A.; Escritura – revisión y edición, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación

(CONAHCYT) por esta investigación que se deriva del proyecto “Diseño y evaluación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para mitigar inundaciones en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima”. Agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TECNM) Campus Colima y a la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana (MASGU).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrés-Doménech, I., Perales-Momparler, S., Morales-Torres, A., y Escuder-Bueno, I. (2018). Hydrological Performance of Green Roofs at Building and City Scales under Mediterranean Conditions. *Sustainability*, 10(9), 3105. <https://doi.org/10.3390/su10093105>

Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Chapman, C., y Hall, J. W. (2021). The Influence of Built Form and Area on the Performance of Sustainable Drainage Systems (SuDS). *Future Cities and Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.5334/fce.112>

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana S.A.

CONABIO. (8 de diciembre de 2021). Portal de Geoinformación 2024. Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250000, Serie VII (Continuo Nacional). http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw

CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Drenaje Pluvial Urbano*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

CONAGUA. (2020). Información estadística climatológica. Información de Estaciones Climatológicas. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Cronshey, R. G., Roberts, R. T., y Miller, N. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*, TR-55. U. S. Department of Agriculture (USDA).

Díaz Herrera, P. (1987). Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Administración del Agua, & Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Río. CONAGUA.

Escalante Sandoval, C. A., y Reyes Chávez, L. (2002). Técnicas estadísticas en hidrología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., y Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

Guo, X., Du, P., Zhao, D., y Li, M. (2019). Modelling low impact development in watersheds using the storm water management model. *Urban Water Journal*, 16(2), 146–155. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1637440>

INEGI. (1981). Mapas. Conjunto de Datos Vectoriales de La Carta de Aguas Superficiales. Escala 1:250 000. Serie I. Colima. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825683030>

INEGI. (2007). Mapas. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Colima. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235147>

INEGI. (2016). Conociendo Colima. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825218621.pdf

INEGI. (2019). Mapas. Modelo Digital de Elevación Tipo Superficie Con 5m de Resolución Derivado de Datos de Sensores Remotos Satelitales y Aerotransportados. E13B34f3. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463778547>

INEGI. (2023). Mapas. Marco Geoestadístico, diciembre 2023. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>

Liu, Y., Bralts, V. F., y Engel, B. A. (2015). Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. *Science of The Total Environment*, 511, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.077>

Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constantino, C. A., Bigurra-Alzati, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortiz-Hernández, J. E., y López-León, L. D. (2017). Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of central Mexico. *Water*, 9(8), 561. <https://doi.org/10.3390/w9080561>

Mendoza González, E., Aldana Alonso, S., y Castolo Ramírez, C. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica del manejo de las aguas pluviales urbanas en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios, Guadalajara, Jalisco. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (2), 83–104. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i2.22>

Pérez-González, M. L., Capra Pedol, L., Dávila-Hernández, N., Borselli, L., Solís-Valdés, S., y Ortiz-Rodríguez, A. J. (2017). Spatio-temporal land-use changes in the Colima-Villa de Álvarez metropolitan area, and their relationship to floodings. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 78–90. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.435>

Ponce de León García, C. E. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de drenaje pluvial convencional incorporando sistemas urbanos de drenaje sostenible, en la zona metropolitana de San Luis Potosí [Tesis Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36479.48807>

Ramírez-Rivera, M. P., Moreno-Peña, J. R., Arceo-Díaz, S., y Chung-Alonso, P. (2021). Dispersión urbana en Villa de Álvarez en los últimos cuarenta años. *Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías*, 15(3), 82–87. <http://difu100cia.uaz.edu.mx/index.php/difuciencia/article/view/206/151>

Zúñiga-Estrada, M. A., Lizárraga-Mendiola, L., Bigurra-Alzati, C. A., Aldana-Alonso, S. E., Ramírez-Núñez, J. S., y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2022). Preliminary Model-Based Evaluation of Water Conservation Strategies in a Semi-Arid Urban Zone. *Land*, 11(1), 101. <https://doi.org/10.3390/land11010101>

Zuniga-Teran, A. A., Staddon, C., de Vito, L., Gerlak, A. K., Ward, S., Schoeman, Y., Hart, A., y Booth, G. (2020). Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(4), 710–732. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1605890>