



REVISTA INGENIO

Evaluación del Impacto de la Implementación de Techos Verdes en el Dimensionamiento de Sistemas de Alcantarillado Urbano

Evaluation of the Impact of Green Roof Implementation on Urban Sewer System Sizing

Belén Shakira Tapia Montero | Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador
Daysi Gabriela Barros Tuapante | Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador
María Gabriela Soria Pugo | Universidad Politécnica Salesiana-UPS, Quito-Ecuador

Recibido: 02/09/2024
Recibido tras revisión: 30/9/2024
Aceptado: 22/10/2024
Publicado: 03/01/2025

PALABRAS CLAVE

Techos verdes, techos verdes extensivos, alcantarillado, sostenibilidad, escorrentía, software SWMM.

KEY WORDS

Green roofs, extensive green roofs, sewer systems, sustainability, runoff, SWMM software.

RESUMEN

Este artículo analiza el impacto de implementar techos verdes en cubiertas inaccesibles en la urbanización Ecovilla Challuabamba, Cuenca, Ecuador. Mediante el uso del programa SWMM, se comparó el sistema de alcantarillado convencional con uno que incorpora techos verdes, evaluando tormentas de diseño con periodos de retorno de 2 a 50 años. Para estimar la escorrentía, se utilizaron modelos como el Número de Curva, Horton y Green AMPT, considerando variables como clima, sustrato y pendiente. Los resultados muestran que los techos verdes reducen el caudal pico en un 44.5%, el calado en un 6.9% y la velocidad en un 38.1%, según el modelo de Número de Curva. Estos hallazgos sugieren que los techos verdes pueden mitigar inundaciones al disminuir la escorrentía superficial y permitir reducir el tamaño de las tuberías, destacando su potencial para aumentar la resiliencia urbana y promover la sostenibilidad en el desarrollo urbano.

ABSTRACT

This article analyzes the impact of implementing green roofs on inaccessible surfaces in the Ecovilla Challuabamba urbanization, Cuenca, Ecuador. Using the SWMM software, the conventional sewer system was compared with one that incorporates green roofs, evaluating design storms with return periods ranging from 2 to 50 years. Runoff estimation was performed using models such as the Curve Number, Horton, and Green AMPT, considering variables like climate, substrate type, and slope. The results show that green roofs reduce peak flow by 44.5%, water depth by 6.9%, and velocity by 38.1%, according to the Curve Number model. These findings suggest that green roofs can mitigate flooding by reducing surface runoff and potentially allowing for smaller pipe sizes. This highlights their potential to enhance urban resilience and promote sustainability in urban Development.

I. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años se ha evidenciado el crecimiento poblacional a nivel global. En el caso particular del Ecuador, el incremento ha sido de 2.5 millones desde el 2010 a 2022 [1]. Este incremento se traduce en más construcciones y carreteras que conllevan a disminución de parques y zonas ajardinadas. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador: “Para 2012 el índice verde urbano en Ecuador fue de 13,01 m²/habitante, en relación al rango sugerido por

la Organización Mundial de la Salud (OMS) que es de 9 m²/habitante”. Asimismo, solo el 54% de las ciudades en el Ecuador cumplen con la recomendación de este organismo internacional [1]. La creciente impermeabilidad urbana reduce la vegetación nativa y altera el drenaje, aumentando la escorrentía y limitando la capacidad de absorción de agua, afectando así el ciclo hidrológico, lo que puede producir fallos en los sistemas de drenaje urbano que conlleva a desastres, como daños a la infraestructu-

ra, pérdidas económicas y fatalidades, exacerbados por la expansión agrícola, condiciones climáticas extremas y modificaciones en los patrones naturales de drenaje.

Una alternativa para aliviar los sistemas de drenaje es la implementación de techos verdes. Consiste en una losa cubierta por capa vegetal que abarca un drenaje, sustrato y la vegetación [2]. Según el tamaño del sustrato los techos verdes pueden clasificarse en extensivos, intensivos y semi intensivos. En el primer caso, los techos verdes extensivos se caracterizan por ser de peso ligero, y el espesor máximo es de 15 cm, no hay mucha diversidad de plantas y las que se utilizan generalmente son las suculentas, no requiere mantenimiento diario, y el costo de implementación es bajo [3]. Los techos verdes intensivos requieren mantenimiento constante; adicionalmente, su espesor es de al menos 20 cm, lo que permite tener una gran variedad de vegetación y una capacidad de almacenamiento alta de aguas lluvias, el peso que genera a la estructura debe ser considerado en el análisis de cargas [4]. Por último, los techos verdes semi intensivos se caracterizan por tener propiedades de los techos antes mencionados. Por ende, el espesor oscila entre 15 y 20 cm [5].

La vegetación utilizada en estos sistemas es en base al clima y la pluviometría de la zona, las capas que componen los techos verdes se indica en el Anexo-Figura 1.

La vegetación utilizada en techos verdes extensivos a nivel mundial son las suculentas (*Sedum pachyphyllum*), pensamientos (*Viola x wittrockiana*), bergenia (*Bergenia ciliata*), reseda (*Libolaria maritima*), sedum (diferentes variedades), lechuga batavia (*Lactuca sativa*), entre otras [7]. En Ecuador, de estas especies sobresalen las suculentas, las raíces de estas plantas tienden a ser poco profundas, pero muy extendidas lateralmente. Esto les permite absorber rápidamente el agua de lluvia ocasional y almacenarla en sus tejidos gruesos y carnosos, por lo tanto, tienen una alta resistencia a la sequía. En el mercado ecuatoriano hay gran variedad de estas plantas [6].

Es importante considerar que los techos verdes pueden implementarse en pendientes variadas, aunque la aplicación específica dependerá del objetivo deseado. Para enfocarse en la retención de agua, que es el caso por el cual se implementa en este estudio, se recomienda utilizar techos verdes en pendientes suaves de máximo 3%. Esto se debe a que las pendientes suaves permiten una distribución más uniforme del agua retenida, facilitando la absorción por parte de la vegetación y el sustrato, y minimizando el riesgo de erosión o pérdida de agua por escorrentía [8].

El almacenamiento de agua de lluvia en medios urbanos utilizando techos verdes tiene beneficios para los sistemas de drenaje urbano al permitir reducir los diámetros de las tuberías y su inclinación (López et al., 2020), lo que hace que el manejo de aguas pluviales sea más efectivo y sustentable. También, la implementación de techos verdes, puede permitir aprovechar las aguas

lluvias generadas por la escorrentía de estas cubiertas, reduciendo los costos de riego y apoyando al medio ambiente. De acuerdo con Camacho et al. (2020), México, en 2011, implementó techos verdes en el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda, lo que ofreció enormes ventajas para la naturaleza a través de la siembra de hortalizas, el empleo de compost de lombriz y la reutilización del agua de lluvia de macetas con la reducción de impuestos sobre el pago del agua [9], según varios estudios en el campo, se ha comprobado que la utilización de azoteas verdes en ámbitos urbanos tiene un papel muy importante en el manejo efectivo de las aguas pluviales, porque absorbe gran cantidad de estas, acumulándolas y liberándolas poco a poco para no sobrecargar el sistema de alcantarillado, con lo cual se minimizan los picos de escorrentía.

Existen investigaciones de cómo se podría mejorar la adaptación de los techos verdes al clima tropical andino. Galarza et al. (2017) estudiaron el comportamiento hidrológico de los techos verdes mediante un experimento con numerosas configuraciones de techos verdes, y los datos de veintiún eventos de lluvia recogidos. Los resultados mostraron que la combinación de la planta y la altura del sustrato podría marcar una diferencia en la reducción de la escorrentía.

La ciudad de Cuenca se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en la depresión interandina, dentro de la cuenca del río Paute. Aunque el régimen de precipitaciones anuales es relativamente bajo comparado con otros sectores del Ecuador, los eventos de lluvias intensas son considerables. La intensidad máxima de precipitación puede alcanzar los 134 mm/h en 10 minutos para un periodo de retorno de 50 años [10]. Eventos extremos han generado escorrentía que no ha podido ser evacuada por los sistemas de drenaje de la ciudad. Es así que, por las intensas lluvias, el 23 de diciembre de 2023 se produjo un desborde del río Tomebamba, ocasionando el colapso del sistema de alcantarillado. Asimismo, el 04 de mayo de 2024 ocasionaron daños materiales en casas y locales comerciales aledaños a los ríos Tomebamba y Machángara. Por lo expuesto, la implementación de cubiertas verdes sería una solución viable para la mitigación de inundaciones dentro de la ciudad.

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto que tendría la implementación de techos verdes en la planificación de sistemas de alcantarillado urbano utilizando como caso de estudio una urbanización ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Para cumplir el objetivo, se realizó la modelación del sistema de alcantarillado de la Urbanización en el software Storm Water Management Model (SWMM) para comparar el sistema convencional de recolección de aguas lluvias y grises, con el nuevo sistema de detención de techos verdes, analizando los cambios en los hidrogramas para diferentes duraciones de tormenta con diferentes modelos de infiltración.

2. MÉTODO

Con base en el objetivo planteado, se ha realizado el análisis específico del sistema de alcantarillado de una urbanización que servirá como caso de estudio. Se ha considerado dos escenarios: el primero, que es la situación actual, el diseño de alcantarillado convencional combinado que se lo denominará como tradicional, y el segundo, la implementación de cubiertas verdes en los techos de las viviendas. Para la comparación de ambos casos se ha realizado la modelación de los sistemas en el software SWMM. El software de estudio es de acceso libre y gratuito; adicionalmente, su interfaz es muy amigable y de fácil manejo. Se ha utilizado como caso de estudio la urbanización Ecovilla Challuambamba, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

2.1. CASO DE ESTUDIO

2.1.1. Contexto climatológico, fitológico y social

Cuenca, se encuentra en la región sur del país, en la provincia del Azuay, en la parte occidental de la Cordillera de los Andes. Su ubicación geográfica precisa es en un valle interandino, rodeada por montañas y paisajes naturales impresionantes. Se sitúa a unos 2.500 metros sobre el nivel del mar, lo que le otorga un clima templado y agradable durante la mayor parte del año, con temperaturas moderadas.

La ciudad está atravesada por cuatro ríos principales: el Tomebamba, el Yanuncay, el Tarqui y el Machángara, lo que contribuye a su belleza natural y a la fertilidad de sus tierras.

En el cantón Cuenca se distinguen diferentes zonas morfológicas, entre ellas se destaca el valle interandino, que abarca el 25% de la superficie del cantón, está entre los 2.300 a 2.900 m s. n. m. Tiene una temperatura promedio anual que varía entre 18 y 22 °C y una precipitación media anual alrededor de 500 mm. En esta área, además de la ciudad de Cuenca, se asientan 19 cabeceras de las 21 parroquias rurales, y alberga alrededor del 98% de la población cantonal. De acuerdo con la información del censo al año 2022 tiene 596.101 habitantes [11].

En el cantón, la variedad de formaciones vegetales está influenciada por factores bióticos y abióticos, incluyendo procesos históricos, adaptaciones de organismos, interacciones entre especies, variaciones de altitud, pendientes, condiciones climáticas y barreras geográficas. Estos factores son cruciales para el desarrollo de los ecosistemas y microhábitats, contribuyendo a la amplia diversidad de flora en la región [11].

La familia Asteraceae destaca con especies endémicas, aunque no siempre son las más comunes. La familia Poaceae también es notable, especialmente en áreas conservadas, como el páramo a más de 2.900 m s. n. m. en la

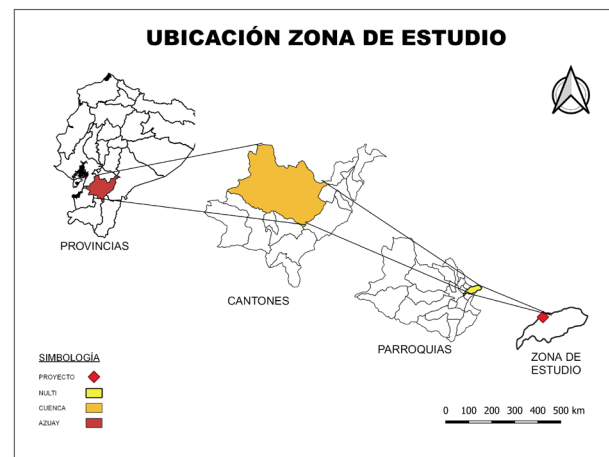
cordillera Occidental. Este ecosistema está dominado por pajonales de *Calamagrostis* sp. y *Gynoxys* sp., así como parches de *polylepis* cerca de montañas [11].

2.1.2. Sitio de estudio

La urbanización Ecovilla Challuambamba está ubicada al este de la ciudad de Cuenca. Su superficie es de 6.040 m². La urbanización se compone de 15 lotes, donde existen 7 casas tipo: vivienda 1, vivienda tipo A: 2, 4 y 6, vivienda tipo B: 3 y 5, vivienda 7, vivienda 8, vivienda tipo C: 9-14 y la vivienda 15. Todas las casas tienen una altura de 6.6 m, su distribución arquitectónica es planta baja, planta alta y la losa inaccesible (cubiertas impermeables) como se indica en la Figura 1 y en el Anexo-Figura 2.

Figura 1.

Provincia Azuay, cantón Cuenca, parroquia Nulti, zona de estudio Challuabamba.



El sistema de alcantarillado es combinado, es decir, confluyen caudales de aguas residuales y pluviales, el diámetro de la tubería principal es de 300 mm, y material PVC, la longitud es de 81.5 m y tiene una pendiente del 1%, además cuenta con acometidas domiciliarias y de sumideros, con diámetro de 200 mm y material de PVC.

Figura 2.

Diseño Sistema de alcantarillado urbanización Ecovilla. Elaborado por autores.



Nota: tubería colectora: alcantarillado combinado de PVC 300 mm (color amarillo), ramales de descarga: acometidas domiciliarias (color amarillo) y sumideros de PVC 200 mm (color verde). Elaborado por autores.

2.2. METODOLOGÍA

En este acápite se analizó la determinación del caudal, basado en una dotación de 120 litros por habitante por día, dado que se trata de una zona en proceso de urbanización sin variabilidad o crecimiento poblacional significativo, la población asignada para el cálculo se determinó de acuerdo con la densidad poblacional de la ciudad. Dado que el sistema de alcantarillado es combinado, para determinar el caudal sanitario se consideró el caudal de infiltración, de conexiones ilícitas y doméstico, y se obtuvo el caudal sanitario total de 2.385 lt/s, en cambio para determinar el caudal pluvial el diseñador consideró el método racional, en función del coeficiente de escorrentía, la intensidad de lluvia y el área de drenaje de la cuenca, obteniendo un valor de 105,86 l/s.

Con los caudales descritos se evaluó el diseño de la red de alcantarillado combinado con un diámetro comercial de 300 mm en la red principal, a esta descargan las aguas provenientes de las viviendas con un diámetro comercial de 200 mm.

El diseño consideró dos pozos para el mantenimiento y cambios de pendiente, como se observa en la Figura 5, que inicia en el costado derecho de la vía de la urbanización y el otro está ubicado a 81.5 metros, esto de acuerdo a la normativa de diseño nacional Norma CO 10.7-602 [12].

2.2.1. Intensidad - Curvas IDF

Para el análisis hidrológico, se seleccionó tormentas sintéticas con base en las curvas IDF de la estación meteorológica M0067 Cuenca-Aeropuerto, siguiendo las recomendacio-

nes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [10], que proporciona las siguientes ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación.

$$i = 201.93 * T^{0.1845} * t^{-0.4926} \quad (5 < 60) \quad (1)$$

$$i = 1052.78 * T^{0.1767} * t^{-0.892} \quad (60 < 1440) \quad (2)$$

Donde i es la intensidad de la lluvia de diseño (mm/h), T es el periodo de retorno (años) y t es el tiempo de duración (min).

A partir de las curvas IDF se consideraron periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. La obtención de las intensidades para cada periodo de retorno, cada 5 minutos de análisis, permitió la construcción del hietograma de diseño, utilizando el método de bloque alterno para duraciones de 10 min, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas.

Este proceso implicó organizar los valores de intensidad parcial de la precipitación obtenidos en función del tiempo. Para lograr esto, los valores de intensidad de precipitación parcial se ordenaron desde los más bajos en los extremos hasta los más altos en el centro. Esta técnica de alternancia garantizó una representación adecuada de la variabilidad espacial de la precipitación en el análisis hidrológico. La intensidad parcial alternada se ingresó en el software SWMM en función de los intervalos de tiempo de 5 minutos, cubriendo así el periodo completo de las duraciones de acuerdo a los eventos de precipitación descritos.

2.2.2. Configuración del modelo en el software SWMM

Se utilizó el software SWMM para modelar tanto el sistema de alcantarillado actual como los escenarios propuestos con techos verdes.

En SWMM, el modelado de un sistema de alcantarillado se realiza configurando primero la red de nodos y tuberías que forman el sistema. Cada nodo y tubería se define con propiedades físicas como elevación, tipo de conexión y características como diámetros, material y rugosidad. Se establecen condiciones iniciales de borde que afectan el comportamiento del sistema, como niveles de agua iniciales y entrada de caudal sanitario. Luego, SWMM realiza el análisis hidráulico simulando el flujo de agua a través de la red, calculando variables como velocidades y niveles de agua. Estas simulaciones fueron fundamentales para evaluar el comportamiento hidráulico (ver Anexo-Figura 3).

El primer escenario fue el diseño tradicional incorporando los hietogramas para cada duración 10 min, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas, con el fin de obtener los resultados de caudal con intervalos de 5 minutos y así comparar con los resultados que se obtendrán al implementar techos verdes.

El segundo escenario fue con la implementación de techos verdes tipo extensivos, ya que requieren menor mantenimiento y costo de implementación que los otros tipos de cubiertas verdes; se configuran las propiedades de la subárea en el menú del subcatchment ingresando el área del techo y otros parámetros asociados como el porcentaje de inclinación (1%), porcentaje de área impermeable (75%), además la conexión al módulo de LID control y método de estimación de la infiltración que para el caso de estudio fue con los que el software estima como Green y Ampt, Clásico Horton, Modificado Green y Ampt, y Número de Curva de Infiltración.

Para establecer los parámetros de techos verdes de manera específica en el sustrato se consideró el software Soil Water Characteristics [13], para la evaluación de las propiedades del suelo margo areno-arcilloso, taxonomía de suelos en el cantón Cuenca parte de la Clasificación del Soil Taxonomy, que fue desarrollada y coordinada internacionalmente por el Ministerio de Agricultura de los

Estados Unidos (USDA, acrónimo (en inglés) para el United States Department of Agriculture [11]). Este software proporciona datos detallados sobre la capacidad de infiltración del suelo, la retención de agua y otros parámetros relevantes. Incorporar estas propiedades del suelo en las simulaciones permitió una evaluación más precisa del rendimiento de sustratos y su impacto en la gestión del agua pluvial.

Los parámetros utilizados para la simulación del techo verde se indican en la Tabla 1.

Para los escenarios de simulación se utilizaron cuatro modelos hidrológicos de infiltración, que propone el software SWMM, considerando los siguientes parámetros de acuerdo a las condiciones de la zona de estudio (Tabla 2).

Esta simulación permitió una evaluación de los sistemas de alcantarillado para escenarios de 10 minutos, 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas y 24 horas, lo que

Tabla 1.

Parámetros utilizados en software SWMM para techos verdes

Parámetro	Valor	Descripción	
Sustrato superficial	Altura superficial	50 mm	Reflejar la presencia de suculentas, plantas comúnmente utilizadas en techos verdes extensivos.
	Fracción de volumen de vegetación	0.1	Indica la densidad de la vegetación en relación con el volumen total del sustrato.
	Rugosidad de Manning	0.05	Representa la resistencia superficial del sustrato.
	Pendiente	1%	Relación altura y longitud.
Suelo	Espesor	75 mm	Indica la profundidad del suelo utilizado en el techo verde.
	Porosidad	0.46	Representa el volumen de espacios porosos en el suelo.
	Capacidad de campo	0.25	Indica el contenido de agua del suelo cuando todos los poros están llenos.
	Punto de marchitez	0.11	Indica el contenido de humedad del suelo por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua con facilidad.
	Conductividad hidráulica	2.5 mm/h	Indica la capacidad de drenaje del suelo.
	Succión	88.9 mm/h	Señala la capacidad de almacenamiento del suelo en función de la tensión superficial del agua.
	Pendiente de conductividad	5	Hace referencia a cómo el suelo absorbe y drena el agua.
Material de drenaje	Espesor	25 mm	Indica la profundidad del material utilizado.
	Fracción de vacío	0.7	Representa el espacio disponible para que el agua fluya a través del material de drenaje.
	Rugosidad	0.3	Refleja la irregularidad de la superficie del material de drenaje, que afecta la velocidad de flujo del agua a través del sistema.

Tabla 2.

Parámetros utilizados en software SWMM para modelos de infiltración en los techos verdes

Método	Parámetro	Valor	Descripción
Green AMPT/ Modificado Green AMPT	Altura de succión	220 mm	Valor medio de la capacidad de succión capilar del suelo a lo largo del frente mojado [14].
	Conductividad	1.52 mm/h	Conductividad hidráulica del suelo completamente saturado [14].
	Déficit inicial	0.154	Diferencia entre la porosidad del suelo y la humedad inicial [14].
Horton	Tasa infiltración máxima	25 mm/h	Tasa máxima de infiltración en la curva de Horton (mm/h o in/h) [14].
	Tasa infiltración mínima	1.52 mm/h	Es equivalente a la conductividad hidráulica del suelo saturado [14].
	Constante de decaimiento	4	Constante de decaimiento del índice de infiltración para la curva de Horton (1/seg.) [14].
	Tiempo de secado	7 días	Tiempo necesario (en días) para que un suelo completamente saturado se seque [14].
	Volumen máximo	0.296	Máximo volumen de infiltración posible (0 si no es aplicable) [14].
Número de Curva	Número de curva	90	Este es el número de curva del SCS [14].
	Conductividad	1.52 mm/h	Conductividad hidráulica del suelo completamente saturado [14].
	Tiempo de secado	7 días	Tiempo necesario (en días) para que un suelo completamente saturado se seque [14].

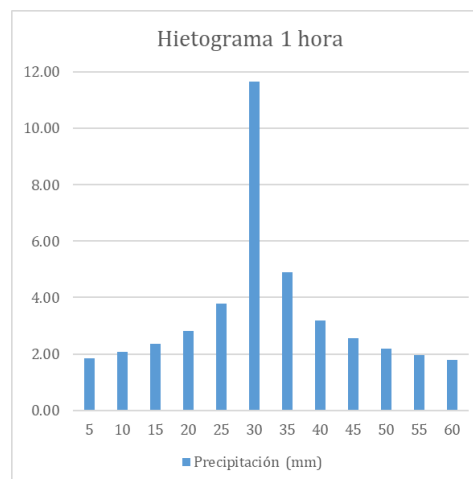
proporcionó información valiosa para comprender el impacto de la implementación de techos verdes en el dimensionamiento del sistema y su comportamiento hidráulico.

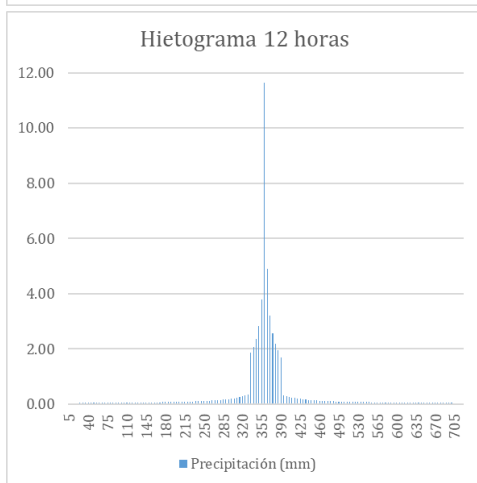
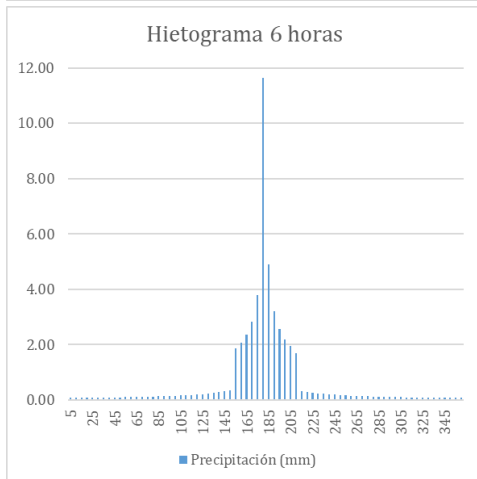
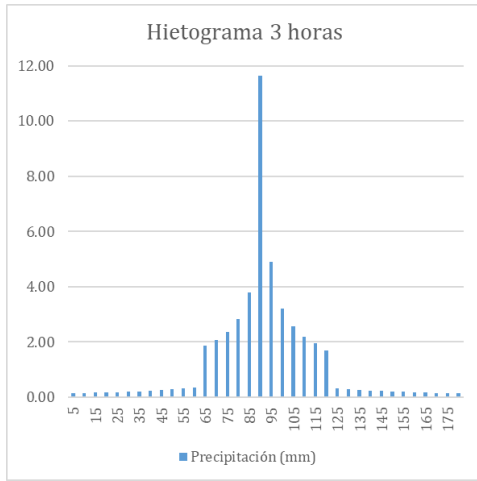
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el análisis del método de bloque alterno, de acuerdo a las curvas IDF, se obtienen los hietogramas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. A continuación, se presentan las gráficas para un periodo de retorno de 10 años, ya que según normativa nacional e internacional es el tiempo recomendado de acuerdo al área y grado de protección del sistema.

Figura 3.

Hietogramas de diseño, método de bloque alterno (período de retorno 10 años).



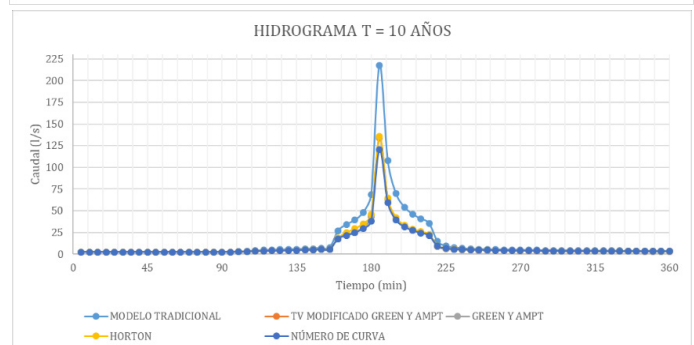
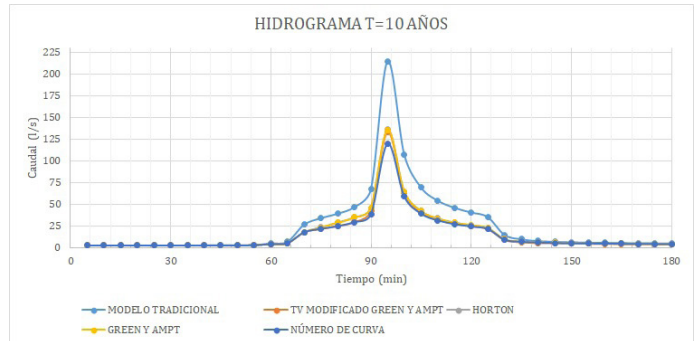
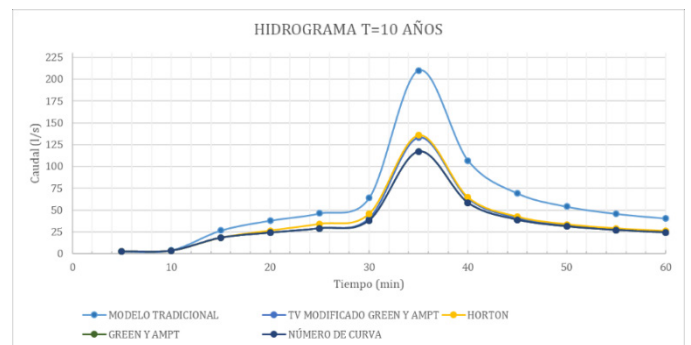


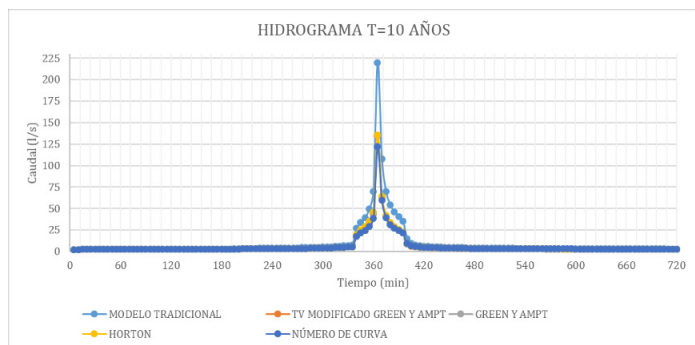
Se ha considerado las duraciones de tormentas de 1, 3, 6 y 12 horas; se descartó los valores de 10 minutos, ya que de acuerdo al análisis que presentan las ecuaciones del INAMHI, es válido desde 5 minutos y en el análisis para el bloque alterno se hizo desde tiempo 0 hasta 10 minutos con intervalos de 5 segundos, por lo que no se recomienda continuar con el análisis. Adicional, el hietograma de 24 horas arrojó valores de error superiores al 10% en el software SWMM, razón por la cual se descarta también esta duración.

En la Figura 3 se observa que las precipitaciones tienen un valor máximo de 11.65 mm. A medida que se amplía la duración de la tormenta, tanto los valores iniciales como los finales de las precipitaciones tienden a reducirse. Esto se debe a que, aunque las tormentas más cortas son más intensas, el volumen total de agua aumenta con la duración. Por ejemplo, la precipitación acumulada es de 41.09 mm en una hora, incrementándose a 53.60 mm en un período de 12 horas.

Con base en los modelos hidrológicos de infiltración analizados, considerando el periodo de retorno de 10 años y las duraciones de tormentas mencionadas se obtienen los hidrogramas a la salida del sistema de alcantarillado.

Figura 4.
Hidrogramas - Periodo de retorno de 10 años.





En la Figura 4 se presenta los hidrogramas contemplando el tradicional y los techos verdes considerando diferentes modelos hidrológicos de infiltraciones, se evidencia una disminución significativa en el caudal pico al implementar los techos verdes por cualquiera de los métodos de infiltración, siendo el método de Número de Curva del SCS el que mayor reducción presenta.

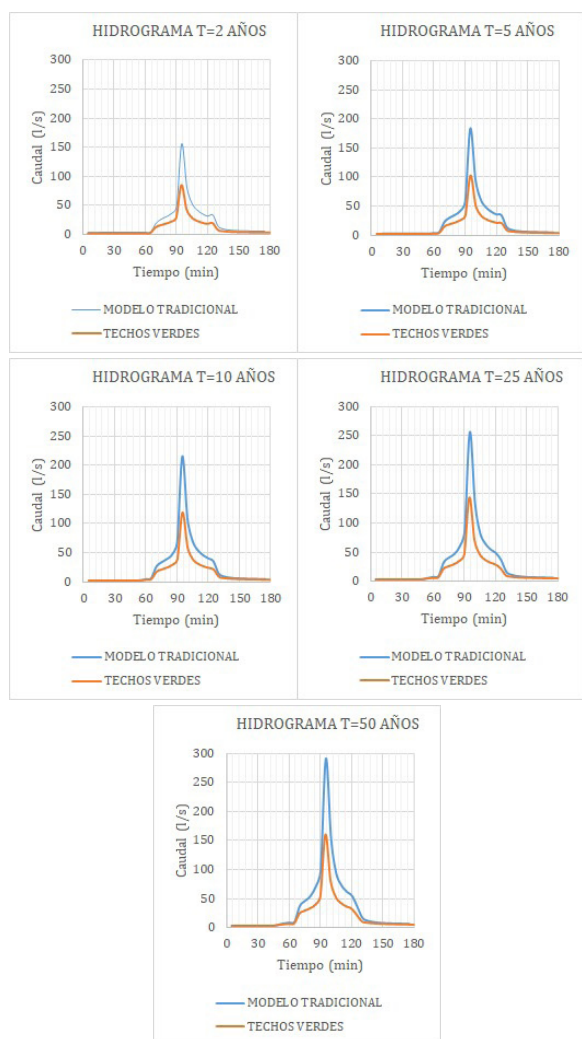
Sin embargo, como se muestra en la figura el tiempo de duración de las tormentas no incide en el porcentaje de eficiencia de reducción de caudal, debido a que es una superficie muy pequeña de análisis donde el tránsito no es importante, por lo tanto, el hidrograma reacciona directamente con la precipitación. Para mayor análisis se detalla en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se presentan todos los tiempos de retorno para comparar con las duraciones de tormenta, analizando la eficiencia de los techos verdes (Número de Curva). Se determina que, en promedio, el mayor porcentaje de reducción del caudal se da en una tormenta con una duración de 3 horas, alcanzando un 44,5%. Sin embargo, al examinar cómo varía el caudal pico en función de cada periodo de retorno, se observan pequeñas fluctuaciones sin una tendencia clara de aumento o disminución significativa. Este resultado sugiere que los techos verdes son efectivos en la reducción del caudal en una amplia gama de periodos de retorno.

Tabla 3.
Porcentaje de reducción en el caudal Techo Convencional y Techos Verdes (Modelo Número de Curva)

Período de retorno	Caudal (l/s)											
	Duración de tormenta= 1 hora			Duración de tormenta= 3 horas			Duración de tormenta= 6 horas			Duración de tormenta= 12 horas		
	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)	MT (l/s)	TV (l/s)	Por. Red. (%)
T=2 Años	152.2	83.5	45.1	155.4	84.6	45.6	154.3	85.6	44.5	157.9	86.7	45.1
T=5 Años	179.9	101.0	43.9	183.5	102.9	43.9	185.9	104.2	43.9	188.3	105.5	43.9
T=10 Años	210.2	117.2	44.2	214.8	119.3	44.5	217.7	120.6	44.6	220.1	121.9	44.6
T=25 Años	252.4	142.1	43.7	255.9	144.5	43.5	257.5	145.7	43.4	259.0	146.8	43.3
T=50 Años	288.8	163.1	43.5	290.6	160.0	44.9	291.6	161.3	44.7	292.4	162.7	44.4

Figura 5.
Hidrogramas duración 3 horas - Diferentes periodos de retorno.



En la Figura 5 se observa los hidrogramas del modelo tradicional versus modelo con TV (Número de Curva) para los diferentes periodos de retorno en una duración de tres horas, en donde se aprecia la reducción del caudal pico en todos los eventos analizados, el porcentaje de reducción oscila de 43.5% al 44.9%, siendo el mayor para 50 años, no es un resultado significativo, ya que el porcentaje de reducción aumenta el 1.4%, por lo que se puede manejar diferentes periodos de retorno.

Además del caudal pico, también se ha realizado el análisis de otros parámetros que son importantes en el diseño de sistema de alcantarillado, como son el calado y la velocidad en las tuberías.

En la Tabla 4 se observa una reducción del calado al implementar techos verdes. Analizando los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, se registran disminuciones del 31%, 17.2% y 6.9%, respectivamente. Esto se debe a que el diámetro del tubo considerado en el proyecto fue diseñado para un periodo de retorno de 10 años, permitiendo que opere con flujo a gravedad. Sin embargo, para los periodos de retorno de 25 y 50 años, se requiere un diámetro mayor, lo que explica la ausencia de una reducción significativa del calado en estos casos, ya que la tubería en la simulación realizada trabaja a presión. Adicional, se observa que las cubiertas verdes pueden ralentizar el caudal de las aguas pluviales en comparación con las cubiertas convencionales. Para una tormenta con un periodo de retorno de 2 años, se estimó una disminución del 20% en la velocidad del flujo. En el caso de un periodo de retorno de 50 años, los techos verdes muestran una reducción en la velocidad del flujo del 45.7% en comparación con los techos convencionales. Esta reducción en la velocidad del flujo se debe a la disminución del caudal pico lograda mediante la implementación de techos verdes, ya que la velocidad del flujo está directamente relacionada con el caudal.

Tabla 4.
Parámetros de calado, velocidad y capacidad de tuberías en una duración de tormenta de 3 horas

Período de retorno	Calado (m)		
	Techos convencionales	Techos verdes	Porcentaje de reducción (%)
T=2 años	0.29	0.2	31.0%
T=5 años	0.29	0.24	17.2%
T=10 años	0.29	0.27	6.9%
T=25 años	0.29	0.29	0.0%
T=50 años	0.29	0.29	0.0%
Período de retorno	Velocidad (m/s)		
	Techos convencionales	Techos verdes	Porcentaje de reducción (%)
T=2 años	2.4	1.92	20.0%
T=5 años	2.84	1.95	31.3%
T=10 años	3.33	2.06	38.1%
T=25 años	3.97	2.45	38.3%
T=50 años	4.51	2.45	45.7%

4. CONCLUSIONES

En conclusión, la implementación de cubiertas verdes en la urbanización Ecovilla Challuambamba en Cuenca, Ecuador, demuestra ser una solución efectiva y sostenible para la gestión de aguas pluviales. En el análisis del sistema de alcantarillado, se evaluaron dos escenarios: uno con el diseño tradicional y otro con techos verdes. Utilizando el software SWMM, se modelaron ambos sistemas para comparar su comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones de lluvia. Los parámetros específicos de los techos verdes se determinaron utilizando el software Soil Water Characteristics del USDA, adaptando las propiedades del suelo local. La simulación mostró que la implementación de cubiertas verdes puede reducir el caudal pico y mejorar la gestión del agua pluvial, sugiriendo que esta solución es efectiva y sostenible para diferentes proyectos.

Los resultados indican que la instalación de techos verdes impacta significativamente en la atenuación del caudal al retener el agua de las precipitaciones en su capa vegetativa y en el sustrato en alrededor del 44.5%. También se evidencia una reducción en calado de 6.9%, y velocidad en 38.1%. Esto puede contribuir a la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas al reducir la velocidad y volumen de agua que fluye directamente hacia los sistemas de drenaje. Al absorber y retener el agua de lluvia, los techos verdes ayudan a mitigar el riesgo de inundaciones urbanas al disminuir la carga de agua que podría saturar rápidamente las alcantarillas y provocar desbordamientos.

Es importante destacar que los resultados obtenidos varían según la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia. En este artículo se ha analizado para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años y se pudo observar que para los más críticos, 25 y 50 años, hay una reducción del volumen al implementar techos verdes, del 60% y 57.1%, respectivamente, lo que permitiría dimensionar tuberías de menores diámetros.

En el análisis de los modelos de infiltración se escogió el número de curva que destaca por su capacidad para estimar la infiltración basado en el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la intensidad de la lluvia. Este enfoque puede llevar a una gestión más eficaz de las aguas pluviales en entornos urbanos, mitigando los riesgos de inundaciones y mejorando la sostenibilidad ambiental.

En resumen, la falta de una regulación que hable acerca de la inclusión de techos verdes no deja de fomentar la degradación urbanística que implica, hasta el momento, incluir una solución viable para la mitigación de inundaciones dentro de las ciudades, sucediendo que la implementación de techos verdes no deja de ser sino un remedio paliativo, el cual se puede ejecutar para mejorar la situación planteada.

Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar los efectos de los techos verdes en diferentes condiciones climáticas y geográficas, así como su viabilidad

económica y ambiental a largo plazo. Estos datos pueden proporcionar información valiosa para mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras urbanas frente al cambio climático y otros desafíos emergentes.

REFERENCIAS

- [1] A. y T. E. Ministerio del Ambiente, «Dirección de Comunicación Ministerio del Ambiente», 21 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-fomenta-la-construccion-ciudades-verdes-saludables/#>.
- [2] Rodríguez Emmanuel, Villagra Karolina, «Evaluación de un techo verde bajo eventos de precipitación sintéticos para caracterizar el comportamiento del flujo por escorrentía», 2019. [En línea].
- [3] Lanarc Consultants Ltd, Kerr Wood Leidal Associates Ltd., and Ngan, G., «Stormwater Source Control Design Guidelines 2005», 2005. [En línea]. Available: http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/Storm_Source_Control_P.
- [4] B. Woods-Ballard, R. Kellagher, P. Martin, C. Jefferies, R. Bray y P. Shaffer, Site handbook for the construction of SUDS, Londres: Ciria, 2007.
- [5] Groundwork Sheffield and Environment Agency, «The GRO green roof code», 2011. [En línea]. Available: <http://www.thegreenroofcentre.co.uk/Library/Default/Documents/GRO%20ONLINE.pdf>.
- [6] J. Aguillón y G. Arista, «ResearchGate-Monitoreo y Simulaciones del Hábitat», 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/337620911_Monitoreo_y_Simulaciones_del_Habitat.
- [7] Galarza et al., «Propuesta de mejoramiento tecnológico de techos verdes para el clima tropical andino». *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, p. 99, 2017.
- [8] K. Lockett, *Green Roof Construction and Maintenance*, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2009.
- [9] Camacho et al., «Techos verdes: una estrategia sustentable Green». *Tecnología en Marcha*, p. 79, 2020.
- [10] INAMHI, Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación, Quito, 2015.
- [11] Alcaldía de Cuenca, Dirección de Planificación, «Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca», 2022. [En línea]. Available: https://www.cuenca.gob.ec/sites/default/files/planificacion/1_4_Documentos%20complementarios%20del%20PDOT_07_01_2022.pdf.
- [12] Secretaría del Agua. Normas de Diseño para Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, Disposición de Excretas y Residuos Líquidos en el Área Rural, Quito, 1992.

- [13] Servicio de Investigación Agrícola USDA, «Laboratorio de hidrología y teledetección: Beltsville, MD», 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10>.
- [14] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Manual del Usuario, SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE, National Risk Mangement Research Laboratory, 2005.