

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERA E INGENIERO CIVIL

**TEMA:
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA
MITIGACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA EN EL DRENAJE
URBANO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS**

**AUTORES:
JOHANNA MIREYA AMAGUA CRIOLLO
GERARDO DAVID HUAYRACocha VEGA**

**TUTOR:
CHRISTIAN GONZALO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ**

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

Nosotros, Johanna Mireya Amagua Criollo y Gerardo David Huayracocha Vega, con documentos de identificación N° 1719162644 y N° 1721443867 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA MITIGACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA EN EL DRENAJE URBANO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, marzo del 2021



Amagua Criollo Johanna Mireya
CI: 1719162644



Huayracocha Vega Gerardo David
CI:1721443867

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, con el tema: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA MITIGACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA EN EL DRENAJE URBANO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS, realizado por Johanna Mireya Amagua Criollo y Gerardo David Huayracocha Vega, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021



Domínguez González Christian Gonzalo

CI: 1716568785

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA MITIGACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA EN EL DRENAJE URBANO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS

EVALUATION OF GREEN ROOFS IMPACT ON THE MITIGATION OF RUNOFF VOLUMES IN URBAN DRAINAGE USING HYDROLOGICAL MODELS

Mireya-Amagua Criollo¹, Gerardo-Huayracocha Vega², Christian-Domínguez Gonzalez³

Resumen

En el proceso de urbanización, las superficies naturales se han visto reducidas provocando el incremento de superficies impermeables que impiden la infiltración del agua y aumentan el escurrimiento superficial. Una alternativa para solucionar este problema es reemplazar los techos comunes de edificaciones por techos verdes. En este artículo se propone evaluar el impacto del techo verde en la mitigación del volumen de escorrentía mediante ensayos experimentales de un techo verde tipo extensivo y un techo convencional con pendientes del 2% y 5%. Para recrear los eventos de precipitación, se construyó un simulador de agua lluvias. Con la simulación de estos eventos, se midió el caudal de escorrentía de los techos para construir hidrogramas experimentales, los cuales fueron usados para calibrar los parámetros del modelo SCS y del Hidrograma Unitarios. Como resultados, se demostró que la implementación de techos verdes con pendientes del 2% reduce el volumen de escorrentía en un 15.6% y el caudal pico en un 32.6%; para el caso de techos con pendientes del 5% la reducción del volumen es de 11.3% y el caudal pico de 27.2%. En la calibración del método SCS, se obtuvieron números de curva (CN) con rangos de 88.9 a 96.5, un porcentaje de retención (z) de 1% a 10% y un tiempo de concentración (Tc) de 5.7 a 7.5 minutos. El método más eficiente resultó ser el hidrograma unitario presentando índices de NSE iguala a 0.98 en comparación al

método SCS que presenta valores de NSE igual al 0.96. Sin embargo, el método SCS es más sencillo de aplicar y no necesita hidrogramas experimentales. Los resultados de esta investigación permiten aportar pautas para la evaluación del impacto de techos verdes en el drenaje urbano.

Palabras Clave: Techo verde, hidrograma, parámetros hidrológicos, hidrograma unitario, número de curva, optimización.

Abstract

In the process of urbanization, natural surfaces are reduced while impervious surfaces are increased. Such conditions, prevent water infiltration and increase surface runoff. An alternative to solve this problem is to replace the common building roofs with green roofs. In this article, we propose to evaluate the impact of green roofs on the mitigation of the runoff volumes using pilot experiments of an extensive green roof type and a conventional roof with slopes of 2% and 5%. In order to recreate precipitation events, we built a rainwater simulator. With these simulations, we measured the roof runoff discharge to set up experimental hydrograms. These hydrograms were used to calibrate the SCS method parameters and to determine the Unit Hydrograph. As a result, we showed that the implementation of green roofs with 2%-slope reduces runoff volumes by 15.6% and the

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

² Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

³ Docente de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: jamaguac@est.ups.edu.ec, ghuayracocha@est.ups.edu.ec

peak flow by 32.6%; whereas green roofs with 5% slope the reduction in volume reaches 11.3% and the peak flow reduction reaches 27.2%. In the parameters calibration of the SCS method, the curve number (CN ranges from 88.9 to 96.5, the retention percentage (z) ranges from 1% to 10% and time of concentration (Tc) from 5.7 to 7.5 minutes. The most efficient method is the Unit Hydrograph, which presents NSE equal to 0.96 comparing to the SCS method that presents NSE values equal to 0.96. Nevertheless, the SCS method is easier to use and it does not need the use of experimental hydrograms. The results of this research, provide guidelines to the evaluation of green roofs impact in the urban drainage.

Keywords: Green roof, hydrograph, hydrological parameters, unit hydrograph, curve number, optimization.

1. Introducción

En los últimos años debido al acelerado crecimiento urbano, se han generado una serie de problemas ambientales, que han provocado modificaciones en el ciclo hidrológico natural de esta manera dificultado los problemas relacionados al drenaje urbano, los cuales han sido más evidentes en las ciudades [1]. En el proceso de urbanización las superficies naturales se han visto reducidas provocando el incremento de superficies impermeables que impiden o reducen significativamente la infiltración, intercepción, detención, retención, transpiración y la evapotranspiración del agua [2], repercutiendo en el comportamiento natural del sistema hidrológico. Otra de las consecuencias es la respuesta de una cuenca bajo cualquier evento de lluvia, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el flujo máximo de descarga, lo que produce la intensificación de inundaciones y en el caso de cuencas urbanas problemas en el sistema de drenaje pluvial [3].

Una alternativa para solucionar esta problemática ha sido la implementación de techos verdes, esto se debe a que este tipo de construcción genera una disminución en los impactos antes mencionados. Alemania ha sido unos de los países que hace ya

varios años ha implementado este sistema de techos o cubiertas verdes, brindando beneficios relacionados con el control de inundaciones y mejoramiento en el medio ambiente [4]. En la actualidad este sistema también está siendo implementado en Latinoamérica, tal es el caso de Argentina donde se han construido conjuntos residenciales con techos verdes [4]. En países como Colombia, Venezuela y Chile, el tema de techos verdes apenas empieza a tener interés ya que han visto en este tipo de sistema una solución al impacto ambiental y al déficit de áreas verdes.

El techo verde es un sistema artificial que brinda un espacio verde natural, sea tipo intensivo o extensivo, el primer caso requiere de un espesor del sustrato mayor a 30cm que alojan una variedad de plantas que van desde arbustos hasta árboles los cuales requieren de un cuidado continuo, mientras que el segundo caso requiere de un menor sustrato entre 5-15 cm con plantas nativas que crecen sin ningún cuidado y pueden subsistir con el agua lluvia[1].

Este sistema se instala en el tejado del inmueble, el cual queda total o parcialmente cubierto de vegetación incrementando la cobertura de áreas verdes en los núcleos urbanos, con el propósito de generar beneficios ambientales, estéticos y de confort.

Un techo verde contribuye con grandes beneficios al medio ambiente, influyendo en el mejoramiento del clima, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de molinos de polvo, reducción del efecto isla de calor a través del proceso de transpiración de las plantas obteniendo una reducción promedio de 4°C durante el día [5, 6]. Por otra parte ayudan a la regulación de humedad haciendo que las plantas disminuyan la humedad que hay en el aire con la formación del rocío, condensando la niebla sobre la capa vegetal y después de un determinado tiempo esto pasara al sustrato en forma de gotas de agua, esto para lograr un clima urbano saludable [7]. Actúan como un aislador térmico y sirve de ahorro energético, evitando el calentamiento excesivo durante el verano, y las pérdidas de calor durante el invierno. En un estudio realizado en la ciudad de Toronto [8], se mostró que el flujo de calor se redujo de un 70 a 90% en comparación a un techo convencional .

Adicionalmente, los techos verdes tienen el potencial de retención hidráulica, permitiendo la disminución del volumen de escorrentía. Mediante el análisis de diversos estudios [9]–[11], podemos observar que la retención de agua lluvia de los techos verdes varía de 30% a 60%, esto podría evitar que exista una saturación en el drenaje pluvial y aumento del flujo de agua, de esta manera se mitigaría los efectos de inundación en zonas urbanas. Se debe tomar en cuenta que la capacidad de retención de agua lluvia también dependerá el grosor y tipo de material del sustrato, al igual que la inclinación de la cubierta. Por lo cual se observa que para los techos verdes tipo extensivos se podría disminuir el volumen de escorrentía en un 65%, en cambio los techos verdes tipo intensivos podrían disminuir el volumen de escorrentía en un 85% [11]. Así mismo la implementación de techos verdes tendrá una repercusión en el caudal pico de descarga retardándolo y disminuyendo la intensidad, en un techo tipo extensivo la reducción del caudal máximo podría disminuirse en un 52% con respecto a un techo convencional [12]. Estos efectos podrían permitir aliviar las redes de alcantarillado y mitigar las inundaciones pluviales en zonas urbanas.

Un estudio realizado por la EPA [13, 14], se muestra los resultados del retardo y reducción del flujo para una lluvia de 75 mm/h, al comparar un techo con membrana asfáltica y uno verde, el primer techo muestra un retardo de 5 min desde el pico de intensidad de agua lluvia, mientras que por otra parte el techo verde presenta un retardo de 10 min después del pico de intensidad. De igual manera el pico de lluvia se ha reducido a 41 mm en el techo verde y 53 mm en la membrana asfáltica. Otro estudio en la ciudad de Buenos Aires [15], demuestra que, con datos obtenidos durante varios años, para precipitaciones de 20 mm el techo verde presenta una retención de aguas lluvia del 73% al 100%, mientras que para precipitaciones de 35 mm a 40 mm, presenta una retención del 60% y para precipitaciones cercanas a 100 mm presenta una retención del 30%.

Mediante los estudios mencionados anteriormente se puede observar que el techo verde es una de las mejores herramientas y alternativas que se puede implementar en la gestión del manejo de escorrentía, reducción de temperatura y humedad en el medio de desarrollo urbano, sin

embargo, las principales limitaciones que se observa en los estudios, es no tener en cuenta de manera directa las propiedades de interacción del suelo, este estudio es necesario ya que mediante el uso del suelo y la condición hidrológica que presenta, podremos conocer la lluvia que se transformará en escorrentía directa o en infiltración. Otra de las limitantes es la representación de los modelos hidrológicos, esto es necesario para una mejor comprensión de los componentes que actúan dentro del ciclo hidrológico en un área determinada, y se pueda considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros.

Este trabajo tiene como objetivo predecir la respuesta hidrológica del techo verde utilizando diferentes métodos hidrológicos para evaluar su impacto en la mitigación del volumen de escorrentía en el drenaje urbano. Partiendo del desarrollo de un modelo físico experimental que simula eventos de precipitación, generando hidrogramas que permiten la calibración de los parámetros de los modelos hidrológicos SCS e Hidrograma Unitario usados en el techo verde.

2. Marco teórico y Metodología

2.1. Marco teórico

Hidrograma

El hidrograma representa la variación que existe del caudal con respecto al tiempo, constituida por dos partes: el flujo base que proviene del agua subterránea y la escorrentía directa que es aquella que proviene de las últimas precipitaciones [16].

Hidrograma de escorrentía directa

Para el estudio de un hidrograma es necesaria la separación de escorrentía directa y flujo base aplicando la Ecuación (1) con el fin de establecer la precipitación efectiva y escorrentía directa sobre la cuenca.

$$Q_{ed} = Q_{ec} - Q_b \quad (1)$$

Donde Q_{ed} es el caudal de escorrentía directa, Q_{ec} es el caudal de escorrentía y Q_b es el caudal base.

Dado que el caudal base no es un flujo que pueda pertenecer a la precipitación caída de manera

directa sobre la superficie de drenaje [17], es necesario separarlo de la porción generada por la escorrentía directa.

En la separación, se contempla que el tiempo base de la escorrentía directa se encuentra parcialmente constante de tormenta a tormenta, lo cual se obtiene finalizando la escorrentía directa en un tiempo predeterminado después del pico del hidrograma [16]. El tiempo base se determinó con la siguiente relación empírica:

$$N = 0.827 A^b \quad (2)$$

Donde N es el tiempo entre el pico del hidrograma hasta el final de la escorrentía directa, A es el área de la cuenca en km^2 y b es un coeficiente empírico que puede variar dependiendo de las características de la cuenca como la pendiente, vegetación, condiciones geológicas [16].

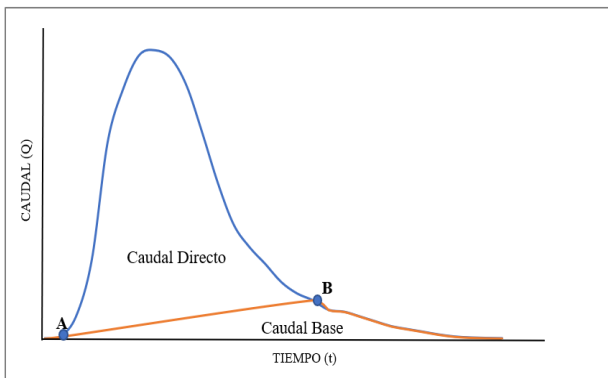


Figura 1: Componentes del Hidrograma

La grafica está compuesta de dos partes, en la parte superior de la recta AB se observa el caudal directo y en la parte inferior se observa el caudal base.

2.1.1. Métodos para simular el hidrograma de escorrentía directa

Método SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), permite determinar el caudal máximo de crecida, relacionando la precipitación neta (P_n) con la precipitación total (P) y la capacidad de almacenamiento de la cuenca (S), a partir de un número hidrológico o número de curva (CN), asociado a varios factores relacionados con la cuenca de estudio [18].

$$P_n = \frac{(P - z * S)^2}{P + (4 * z * S)} \quad (3)$$

Es posible aplicar la Ecuación (3) cuando $P_n > I_a$, caso contrario $P_n = 0$, no se genera escorrentía; ya que la precipitación se queda retenida en la superficie o se infiltra [19].

Donde P_n precipitación neta, P precipitación total registrada, z porcentaje de la capacidad máxima de retención de la cuenca.

La abstracción inicial I_a (mm) o umbral de escorrentía difiere según las condiciones ambientales, pendiente y uso del suelo de la cuenca estudiada [20]. La abstracción inicial antes del escurrimiento se expresa en función de S :

$$I_a = zS \quad (4)$$

donde, el valor de z es puesto generalmente como 0.2 y S es estimado como:

$$S = 25.4 * \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5)$$

Donde CN número de curva y toma valores de 1 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Los valores próximos a 1 representan las condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores aproximados a 100 representan las condiciones de impermeabilidad.

Para obtener el valor del hidrograma real de la cuenca, se calcula la distribución de la escorrentía en el tiempo aplicando el hidrograma adimensional SCS, que es un hidrograma sintético que se expresa como la relación entre la descarga con la descarga máxima (Q/q_p) y la relación del tiempo con el tiempo hasta el pico del hidrograma (t/T_p) [21].

Para transformar las ordenadas adimensionales del hidrograma en valores reales, se debe conocer el tiempo hasta el pico (T_p) y los caudales de descarga máxima (q_p) aplicando las Ecuaciones (6) y (7) respectivamente.

$$T_p = 0.7 * T_c \quad (6)$$

$$q_p = 0.208 * \frac{(A * P_n)}{T_p} \quad (7)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca, q_p es la descarga máxima (m^3/s) y T_p es el tiempo hasta el pico (horas).

Método Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario, es un hidrograma de escorrentía directa generado por un volumen de 1 mm de precipitación efectiva homogénea sobre la cuenca durante un lapso de tiempo. La teoría del hidrograma unitario consiste en un modelo conceptual que supone a la cuenca como un sistema lineal e invariable en el tiempo en el que la entrada es la lluvia y la salida el caudal de escorrentía directa [22, 23].

Para estimar las ordenadas del Hidrograma Unitario se ha utilizado el método de mínimos cuadrados suavizados, la misma parte de la ecuación de convolución discreta que permite calcular la escorrentía directa Q_{ed} dado un exceso de lluvia P_i y el hidrograma unitario U_{j-i+1} . El proceso inverso, llamado de convolución, es necesario para deducir un hidrograma unitario dado una información Q_{ed} y P_i [24].

$$Q_{ed} = \sum_{i=1}^{j \leq m} P_i U_{j-i+1} \quad (8)$$

$$P_i = \frac{\sum Q_{ed} / \Delta t}{A} \quad (9)$$

Donde Q_{ed} es el caudal de escorrentía directa, Δt es el intervalo de tiempo.

Para minimizar el error en el en hidrograma de escorrentía se utiliza el ajuste de mínimos cuadrados suavizados.

$$[\hat{U}] = [[P]^T [P] + K [I]]^{-1} [P]^T [Q] \quad (10)$$

Donde $[\hat{U}]$ es el vector resultante de las l ordenadas del HU, $[P]$ es la matriz de precipitación de n por l elementos, $[Q]$ es el vector de valores de n ordenadas del hidrograma, $[I]$ es la matriz identidad de l por l elementos y K es el parámetro escalar con valores positivos que representa la

incertidumbre del usuario sobre la calidad de los datos además controla el grado de restricción impuesto sobre la estimación final [23].

2.2. Metodología

2.2.1. Diseño experimental

El diseño experimental se basó en la construcción de un modelo físico de techo verde Figura 2, que fue sometido a un simulador de aguas lluvias, el cual analiza el efecto de la cubierta verde.

Instrumentación

Se construyó un modelo físico experimental de techo verde utilizando la tipología de cubierta tipo extensiva, compuesta de distintas capas la cual requiere menor cuidado y no necesita mantenimiento, Figura 2.

Como primer paso se colocó la capa impermeabilizante, para ello se utilizó el polietileno de espesor 1 mm, que evita la absorción de agua en las paredes del cajón. Posteriormente se acomodó la barrera de raíces fabricada en poliestireno con un espesor de 10mm, que previene el crecimiento de raíces. Luego se sitúa la capa drenante constituida de piedra pómez de espesor 2 cm, la misma que permite el paso del agua hacia el sistema de evacuación cuando se satura el sustrato. En seguida se encuentra la capa filtrante, que es un geotextil, la cual permite la evacuación del agua y retiene los materiales sólidos que se dirigen al sistema de drenaje. Después se colocó el sustrato de arena, arcilla y humus, propio de la sierra ecuatoriana y es de fácil obtención [25]. El mencionado sustrato concentra los nutrientes, el agua y es soporte de la vegetación, tiene una altura de 15 cm. Finalmente, se colocó distintas variedades de vegetación de fácil obtención en la sierra ecuatoriana como: Begonias de flor (Begoniaceae), que viven en lugares cálidos y húmedos, tienen una gran capacidad de absorción. Otra de las especies seleccionadas son las Sedum Acre y Sagina procumbens, las cuales no requieren mantenimiento, viven en condiciones extremas, es decir lluvias intensas y sequías, manteniendo la cobertura vegetal durante todo el año [26].



Figura 2: Elementos del techo verde. Donde (a) Membrana impermeabilizante, (b) Barrera de raíces, (c) Capa drenante, (d) Capa filtrante, (e) Sustrato y (f) Capa de vegetación.

Para el montaje del simulador de agua lluvia que se muestra en la Figura 3, se construyó una mesa de hierro de dimensiones (80*160) cm con altura regulable para modificar su pendiente, y un cajón de madera (80*160*25) cm que se utilizó como base para el techo verde. Se fabricó un sistema de agua utilizando tubería PVC de 1/2”, entre la válvula y los aspersores punta de lanza, que regulan el flujo

de aspersión. Luego se conectó una bomba de agua de 0.5 Hp a un tanque, el cual se encarga de mantener un flujo constante durante el ensayo. Finalmente se ubicó una tubería a media caña en la pared frontal inferior del cajón, siendo el medio de descarga para la escorrentía dada por la precipitación, la misma que será depositada en un recipiente cúbico graduado (24*24*65) cm.

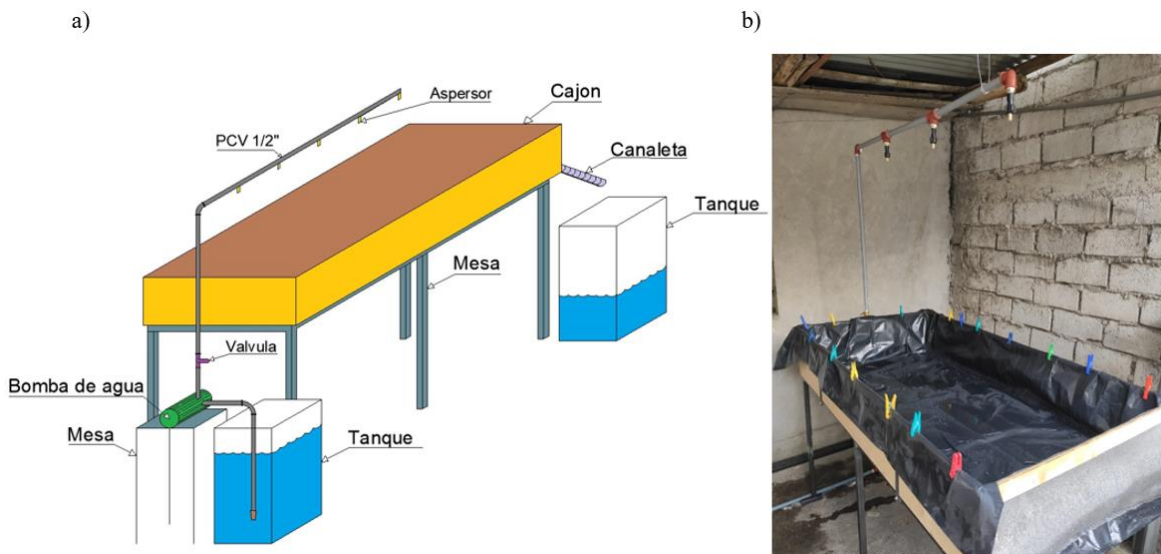


Figura 3: Diseño del simulador de agua lluvia; (a) esquema de techo verde y simulador de aguas lluvia, (b) Estructura de techo verde y simulador de agua lluvia

2.2.2. Recopilación de datos

Se desea analizar el efecto del techo verde ante altas intensidad de precipitación, para lo cual se estableció como zona de estudio la ciudad de Quito debido a las características climáticas que presenta, ya que en esta zona es posible evidenciar el efecto del fenómeno del Niño, que como consecuencia presenta altas intensidades de precipitación.

Se trabajó con las ecuaciones de intensidades máximas de precipitación con periodos de retorno de 5, 10 y 25 años debido a que son periodos que se utilizan en las normativas de varios países para el diseño de alcantarillado. Se utilizó la estación M-002 “La Tola”, obtenida del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI (Ecuador) [27], ya que presenta intensidades de lluvias altas en relación a las demás estaciones que se encuentran en la ciudad de Quito, con el fin de conseguir las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) de la región de estudio Figura 4.

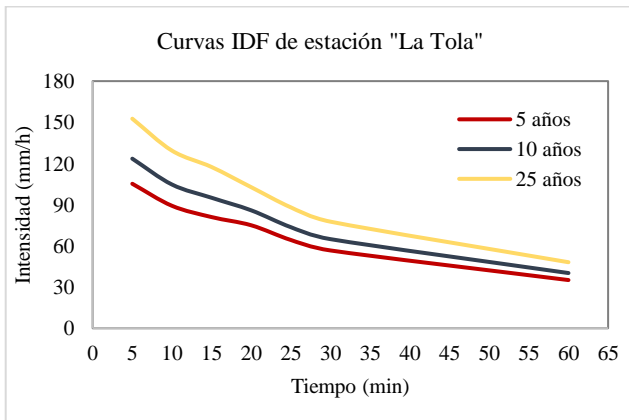


Figura 4: Curvas IDF estación meteorológica "La Tola" M-002, para periodos de retorno de 5,10 y 25 años.

A partir de las curvas IDF se obtuvieron las distintas intensidades de lluvia que se muestran en la Tabla 1 para cada periodo de retorno con duraciones de 5, 10, 15 y 20 minutos, con estos datos se realizaron los ensayos para calibrar el simulador de aguas lluvia.

Tabla 1: Intensidades de luvias Teóricas

TR (años)	Duración (minutos)			
	5	10	15	20
0				
5	105.24	89.20	80.98	74.98
10	123.52	104.69	95.04	85.87
25	152.54	129.37	117.44	102.71

Intensidades teóricas obtenida de la estación meteorológica M-0002 (INAMHI) para diferentes periodos de retorno y duración
TR = Periodo de retorno

Para calibrar las intensidades de lluvia requeridas se practicaron varios ensayos a partir de la apertura de válvula durante un intervalo de 10 minutos, tomando en consideración que el volumen total de lluvia se midió sin sustrato y únicamente con la capa impermeabilizante. Una vez culminado el escurrimiento, se realizó la medición del volumen en el recipiente cúbico.

La intensidad de la lluvia se calculó en función del volumen del recipiente, la descarga, el tiempo y el área aplicando las Ecuaciones (11), (12) y (13).

$$V = Ac * h \quad (11)$$

Donde V es el volumen, Ac es el área del recipiente cúbico, h es la altura de la lámina de agua en un intervalo de tiempo.

$$Q = \frac{V_f - V_o}{\Delta t} \quad (12)$$

Dónde Q es la descarga en un intervalo de tiempo, V_f es el volumen final, V_o es el volumen inicial y Δt es el intervalo de tiempo.

$$I = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

Donde I es la intensidad (mm/h), Q es la descarga en un intervalo de tiempo.

Se debe obtener intensidades experimentales aproximadas a las intensidades teóricas, caso contrario se debe variar la apertura de la válvula en el simulador de agua lluvias y repetir el proceso hasta obtener una intensidad aproximada a la teórica. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Intensidad de lluvia Experimental

TR (años)	Duración (minutos)			
	5	10	15	20
0				
5	105.6	89.82	80.87	74.33
10	123.21	104.24	95.33	86.87
25	149.71	129.74	118.73	103.59

Intensidades experimentales obtenidas a partir de la calibración en el simulador de aguas lluvia, para diferentes periodos de retorno y duración
TR = Periodo de retorno

Cada dato obtenido de manera experimental presenta un margen de error menor al 1%, como resultado de la calibración, manipulación y toma de medidas del equipo utilizado al ensayar.

2.2.3. Aplicación

Con el simulador de aguas lluvia calibrado, se realizó el ensayo en techo convencional de material galvalumen plástico (80*160) y techo verde durante 10 min, previo al ensayo con techos verdes se saturó el suelo con el simulador de aguas lluvia durante 10 minutos y se esperó 4 horas y 30 minutos para comenzar a ensayar en el techo verde, tiempo que será tomado para realizar cada ensayo. En el ensayo de techo verde se tomó la lámina de agua del recipiente cúbico cada 20 segundos durante 1 hora, después cada minuto durante 2 horas y 30 minutos, dando un total de 330 datos en 3 horas y 30 minutos, tiempo en el cual finalizó el escurrimiento. En el ensayo de techo convencional se tomó la lámina de agua cada 20 segundos durante 15 minutos, tiempo en el cual culminó el escurrimiento alcanzando un total de 45 datos.

Se practicaron tres ensayos por intensidad con pendientes de 2% y 5% dando un total de 72 ensayos por techo. A partir de estos datos y usando las ecuaciones (11) y (12) se obtuvo el hidrograma para cada ensayo. Cabe aclarar que se obtuvo un hidrograma por cada intensidad usada.

Con los hidrogramas obtenidos se calculó el hidrograma de escorrentía directa, flujo base y pérdida utilizando las ecuaciones (1) y (2), que fueron útiles para la aplicación de los métodos SCS e Hidrograma Unitario.

2.2.4. Modelación hidrológica

Método SCS

El método en mención presenta tres parámetros, el número de curva (CN), tiempo de concentración (Tc) y el porcentaje de la capacidad máxima de retención de la cuenca (z), que fueron calibrados respecto a los hidrogramas observados en el ensayo experimental. Se tomó cada una de las doce intensidades de la Tabla 1, porcentaje de capacidad máxima de retención (z) del 20%, valores estimados del número de curva (CN) en base a tablas del SCS [28] y tiempo de concentración Tc obtenido de manera visual en el hidrograma del ensayo experimental.

Se calculó el valor del tiempo hasta el pico (Tp) con la Ecuación (6), el cual se utilizó como intervalo en la distribución de la precipitación efectuada durante 10 minutos. Luego se calculó la precipitación neta (Pn) aplicando la Ecuación (3).

Posteriormente se calculó la descarga máxima (Qp) con la Ecuación (4) y tiempo hasta el pico del hidrograma (Tp), se multiplicaron por los valores adimensionales dados por el hidrograma sintético, de esta manera se obtuvo un hidrograma simulado.

Se utilizó el software HEC-HMS con el propósito de optimizar los parámetros: número de curva (CN), tiempo de concentración (Tc) y porcentaje de la capacidad máxima de retención de la cuenca (z), ya que el programa da valores de CN, Tc y z, generando un hidrograma simulado que es aproximado al hidrograma experimental, cuando se ingresan los parámetros de: área de la cuenca (A), precipitación neta (Pn), número de curva (CN), tiempo de concentración (Tc).

Método Hidrograma Unitario

Se tomó los caudales de la escorrentía directa del ensayo experimental para una intensidad, que se encuentra en intervalos de un minuto, se realizó la sumatoria de los caudales, este total se multiplicó por el área de estudio y el intervalo de tiempo con la Ecuación (9), se obtuvo la precipitación neta total. Esta precipitación se distribuyó de manera uniforme a lo largo del intervalo de 10 minutos, teniendo en consideración que la distribución inició cuando comenzó la escorrentía directa.

Con la precipitación neta distribuida y los valores de escorrentía directa se utilizó la Ecuación (10), obteniéndose los valores del hidrograma unitario $[\hat{U}]$, estos valores pueden llegar a ser negativos debido al error sistemático en las mediciones de escorrentía del experimentales. Por este motivo, se utilizó el parámetro escalar (K) para obtener resultados positivos en el hidrograma unitario.

Así mismo las ordenadas del hidrograma unitario y precipitación neta fueron usadas para generar el hidrograma de escorrentía directa aplicando la Ecuación (8).

2.2.5. Evaluación de modelos.

La evaluación del comportamiento y rendimiento de los modelos hidrológicos se realizó comparando el hidrograma calculado con los modelos y el hidrograma observado en los experimentos, mediante cinco métricas estadísticas.

Para determinar la eficiencia al generar un hidrograma se tomó en cuenta tres aspectos importantes del mismo, forma del hidrograma con Nash-Sutcliffe (NSE), encargado de indicar el

índice de similitud entre el hidrograma calculado y el hidrograma observado. Estimador de picos del hidrograma (PF), muestra el índice de ajuste entre los caudales pico del hidrograma calculado y observado. Estimador volumétrico (VF), da a conocer el índice respecto al volumen total entre hidrogramas aplicando las Ecuaciones (14), (15) y (16):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (14)$$

$$VF = 1 - \frac{|\sum_{i=1}^N Q_{obs,i} - \sum_{i=1}^N Q_{sim,i}|}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \quad (15)$$

$$PF = 1 - \frac{|\max_{1 \leq i \leq N} \{Q_{obs,i}\} - \max_{1 \leq i \leq N} \{Q_{sim,i}\}|}{\max_{1 \leq i \leq N} \{Q_{obs,i}\}} \quad (16)$$

Donde NSE es el proceso de flujo, Q_{obs} es el caudal medido, Q_{sim} que es el flujo simulado y \bar{Q}_{obs} es el caudal medido promedio [29].

De igual manera se analizó con Kling Gupta (KGE) Ecuación (17) obteniendo el rendimiento que tendrá el hidrograma:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (17)$$

Donde $\alpha = \sigma_{sim}/\sigma_{obs}$, $\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs}$ siendo σ la desviación estándar, μ la media de los caudales y r es la correlación lineal coeficiente entre los Q_{obs} de flujo medidos y el simulado Q_{sim} [29].

Finalmente se utilizó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para medir la magnitud de la desviación entre hidrogramas con la siguiente expresión.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{n}} \quad (18)$$

Donde n es el número de datos simulados.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados

3.1.1. Escurrimiento base y directo

Con los hidrogramas encontrados en el ensayo experimental y aplicando las ecuaciones (1) y (2) se obtuvo la escorrentía directa con valores promedio de 49.1% y 43.4% con pendiente del 2% y 5%, flujo base de 17.8% y 16.9% y volumen de pérdida para cada intensidad. Cabe aclarar que el valor empírico (b) fue de 0.3 debido a que el área de estudio presentaba dimensiones pequeñas y en la mayoría de hidrogramas experimentales se logró un aporte similar de escorrentía base, como se observa en la Tabla 3.

3.1.2. Método SCS

Después de comparar el hidrograma observado en el ensayo experimental y el hidrograma generado por el método SCS con las distintas pendientes de 2% y 5%, se obtuvo valores calibrados de CN, que están entre 88.9 a 96.5. Tiempo de concentración (T_c), que está entre 7.7 a 7.5 minutos y porcentaje de capacidad máxima de retención de la cuenca (z) entre 0.7% a 10% por cada intensidad, mostrados en la Tabla 4. Estos parámetros pueden ser usados para el desarrollo de hidrogramas. En las Figuras 5 y 6, se ejemplifica los hidrogramas observados y generados por el SCS utilizando valores calibrados.

Tabla 3: Porcentaje del volumen de escorrentía para cada intensidad

Pendiente 2%						Pendiente 5%					
TR	I	P	Esc. Directo	Esc. Base	Perdida	TR	I	P	Esc. Directo	Esc. Base	Perdida
(años)	(mm/h)	(%)	(%)	(%)	(%)	(años)	(mm/h)	(%)	(%)	(%)	(%)
5	105.24	100	48.7	23.3	28.0	5	105.24	100	49.9	15.8	34.3
5	89.2	100	46.5	19.5	34.0	5	89.2	100	47.9	17.9	34.3
5	80.98	100	48.6	19.8	31.6	5	80.98	100	46.2	21.2	32.6
5	74.98	100	48.6	15.2	36.2	5	74.98	100	45.9	17.6	36.5
10	123.52	100	43.5	12.4	44.1	10	123.52	100	54.2	15.7	30.1
10	104.69	100	48.5	19.3	32.2	10	104.69	100	70.6	18.5	10.9
10	95.04	100	49.9	15.4	34.6	10	95.04	100	55.2	13.3	31.5
10	85.87	100	50.4	19.8	29.9	10	85.87	100	58.4	14.6	27.0
25	152.54	100	54.3	13.9	31.8	25	152.54	100	53.2	18.5	28.3
25	129.37	100	49.4	20.2	30.4	25	129.37	100	57.2	15.0	27.9
25	117.44	100	48.4	19.4	32.2	25	117.44	100	50.4	18.2	31.3
25	102.71	100	52.4	14.9	32.7	25	102.71	100	51.5	16.6	31.9
Porcentaje (%)		100	49.1	17.8	33.1	Porcentaje (%)		100	53.4	16.9	29.7

Los valores mostrados son de hidrogramas experimentales obtenidos del ensayo a techos verdes y representan los valores de escurrimientos en cada hidrograma y las pérdidas por ensayo. TR = Periodo de retorno; I = Intensidad; P = Precipitación

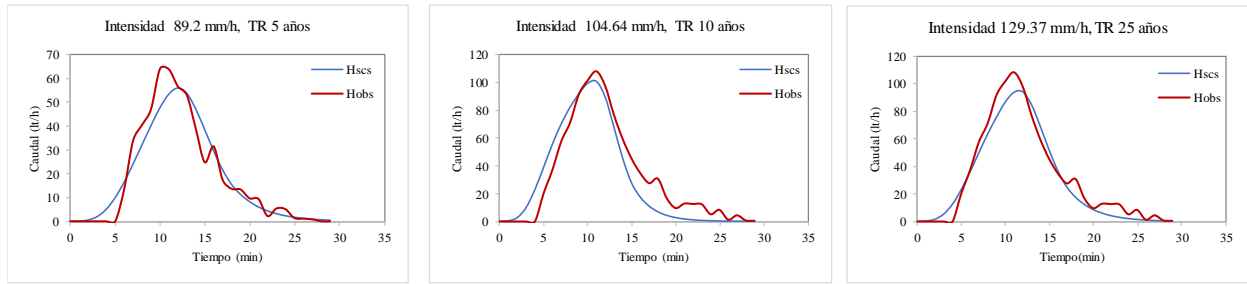


Figura 5: Hidrogramas con el uso de parámetros calibrados por el Método SCS e hidrogramas observados del ensayo experimental para cada intensidad con pendiente 2%. Hscs = Hidrograma a partir del SCS, Hobs = hidrograma observado del ensayo experimental

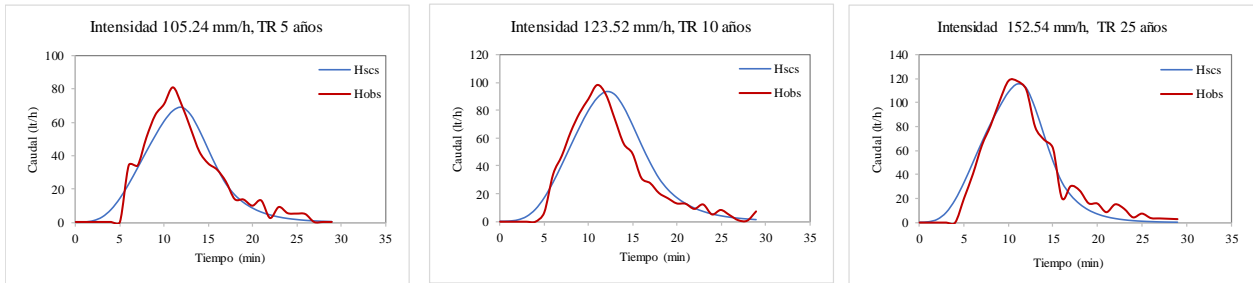


Figura 6: Hidrogramas con el uso de parámetros calibrados por el Método SCS e hidrogramas observados del ensayo experimental para cada intensidad con pendiente 5%. Hscs = Hidrograma a partir del SCS, Hobs = hidrograma observado del ensayo experimental

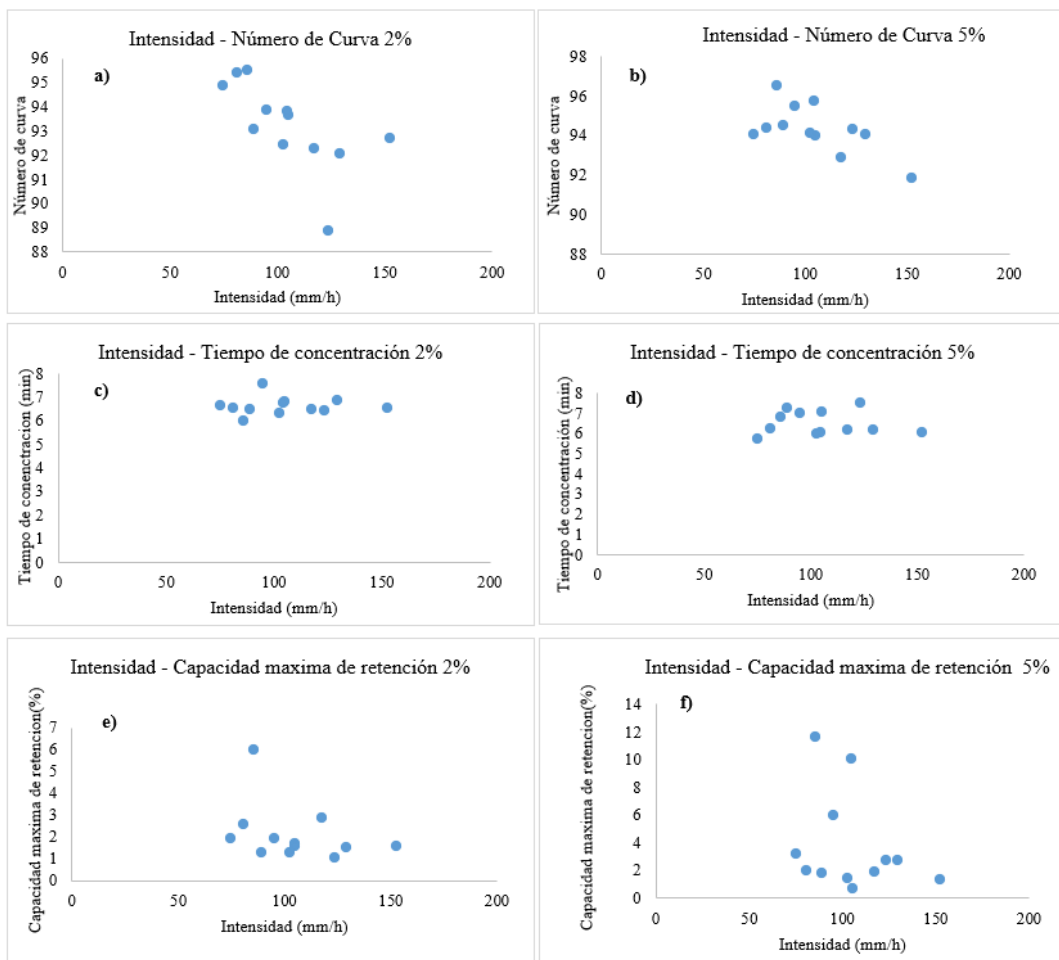


Figura 7: Relación entre los diferentes criterios como: (a) Intensidad - Número de curva en pendiente del 2%; (b) Intensidad - Número de curva en pendiente del 5%; (c) Intensidad - Tiempo de concentración en pendiente del 2%; (d) Intensidad - Tiempo de concentración en

pendiente del 5%; (e) Intensidad – capacidad máxima de retención en pendiente del 2%; (f) Intensidad – capacidad máxima de retención en pendiente del 2%.

Tabla 4: Rangos de parámetros optimizados SCS

Parámetros	Rango Pendiente 2%	Rango pendiente 5%
CN	92.3 - 95.5	91.86 - 96.53
z (%)	1 - 6	0.7 - 11.7
Tc (min)	5.96 - 7.56	5.71 - 7.47

Los parámetros fueron obtenidos a partir de los hidrogramas generados por el SCS tomando desde el menor valor al mayor para cada pendiente. CN = Numero de Curva, z = porcentaje de capacidad máxima de retención de la cumeca, Tc = Tiempo de concentración.

Los índices de las métricas estadísticas son favorables teniendo promedios de NSE= 0.96 en pendientes de 2% y 5%, VF de 0.77 y 0.78 en pendientes de 2% y 5% respectivamente, PF de 0.91 y 0.93 en pendientes 2% y 5% respectivamente. Las métricas mencionadas son las más relevantes Tabla 5.

3.1.3. Método del Hidrograma unitario

Al utilizar el método de mínimos cuadrados suavizados el parámetro K de la ecuación (10) tomó valores en un rango de 0.2 a 19.9, hasta obtener resultados positivos en las ordenadas del hidrograma unitario $[\hat{U}]$ de cada intensidad, para una mejor comprensión se muestran las Figuras 8 y 9, que contienen los hidrogramas observados y los hidrogramas generados con el hidrograma unitario al ser suavizado con el parámetro K.

Para cada pendiente de 2% y 5% se adquirió un hidrograma unitario final $[\hat{U}f]$ como se muestra en la Tabla 6 calculado de la media de los hidrogramas unitarios $[\hat{U}]$, el hidrograma unitario final $[\hat{U}f]$ sirve para generar hidrogramas utilizando cualquier intensidad.

Tabla 5: Indicadores estadísticos para el método SCS

Pendiente 2%							Pendiente 5%						
TR (años)	I (mm/h)	NSE	VF	PF	KGE	RMSE (lt/h)	TR (años)	I (mm/h)	NSE	VF	PF	KGE	RMSE (lt/h)
5	105.24	0.96	0.77	0.96	0.95	6.38	5	105.24	0.96	0.78	0.86	0.92	6.33
5	89.2	0.95	0.77	0.83	0.85	5.78	5	89.2	0.96	0.78	0.88	0.90	5.41
5	80.98	0.97	0.79	0.89	0.87	4.51	5	80.98	0.97	0.80	0.86	0.91	4.59
5	74.98	0.94	0.74	0.91	0.93	5.25	5	74.98	0.96	0.78	0.89	0.87	4.66
10	123.52	0.95	0.75	0.96	0.87	6.91	10	123.52	0.94	0.74	0.95	0.88	9.18
10	104.69	0.96	0.77	0.87	0.87	6.20	10	104.69	0.94	0.70	0.93	0.88	11.65
10	95.04	0.96	0.77	0.91	0.92	5.34	10	95.04	0.96	0.76	0.91	0.91	6.31
10	85.87	0.95	0.73	0.91	0.87	6.35	10	85.87	0.96	0.78	0.98	0.93	5.62
25	152.54	0.97	0.81	0.99	0.91	8.14	25	152.54	0.98	0.81	0.97	0.97	8.21
25	129.37	0.96	0.77	0.90	0.94	8.04	25	129.37	0.97	0.82	0.87	0.90	7.26
25	117.44	0.96	0.78	0.91	0.92	7.31	25	117.44	0.97	0.82	0.86	0.92	6.68
25	102.71	0.95	0.74	0.91	0.83	7.47	25	102.71	0.97	0.79	0.93	0.89	5.96
Promedio		0.96	0.77	0.91	0.89	6.47	Promedio		0.96	0.78	0.91	0.91	6.82

Los índices mostrados del SCS se obtuvieron al comparar caudales de escorrentía directa del hidrograma del SCS con el hidrograma observado TR= Periodo de Retorno, I= Intensidad, NSE=eficiencia Nash-Sutcliffe, VF=índice de ajuste volumétrico, PF= índice de diferencia pico; KGE=Kling- Gupta; RMSE=Raíz del error cuadrado medio.

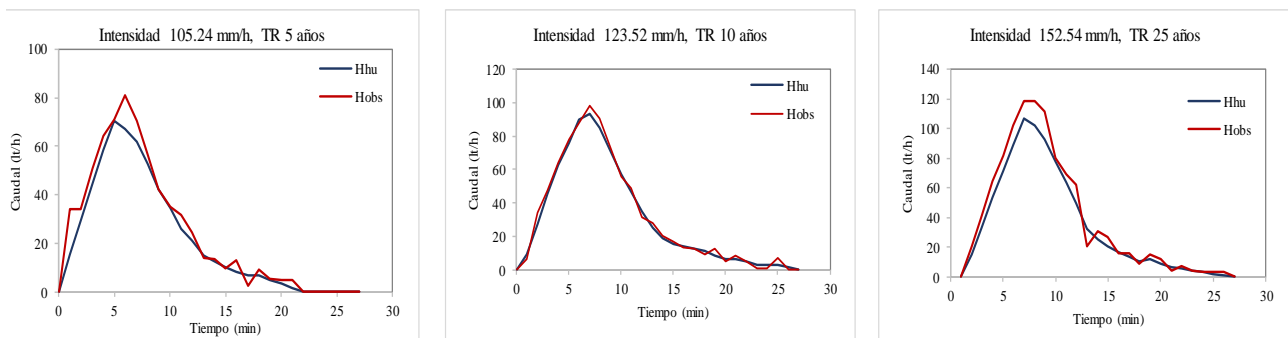


Figura 8: Hidrogramas con el uso de hidrogramas unitarios e hidrogramas observados del ensayo experimental para cada intensidad con pendiente 2%. Hhu = Hidrograma partir del hidrograma unitario, Hobs = Hidrograma observado del ensayo experimental

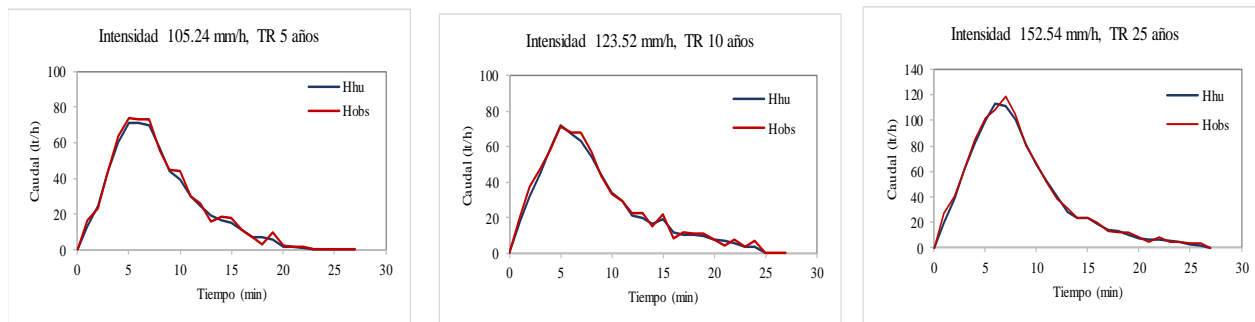


Figura 9: Hidrogramas con el uso de hidrogramas unitarios e hidrogramas observados del ensayo experimental para cada intensidad con pendiente 5% Hhu = Hidrograma partir del hidrograma unitario, Hobs = Hidrograma observado del ensayo experimental

Tabla 6: Hidrograma Unitario final [Ūf]

Ordenadas	Pendiente 2%	Pendiente 5%
	Hidrograma final	Hidrograma final
	m ³ /s/mm	m ³ /s/mm
1	2.49E-06	2.45E-06
2	2.15E-06	2.26E-06
3	2.39E-06	2.48E-06
4	2.34E-06	2.33E-06
5	2.10E-06	2.09E-06
6	2.04E-06	2.05E-06
7	1.39E-06	1.48E-06
8	8.90E-07	9.81E-07
9	6.29E-07	5.71E-07
10	6.44E-07	5.65E-07
11	7.98E-07	5.87E-07
12	5.50E-07	3.41E-07
13	2.66E-07	2.82E-07
14	2.14E-07	3.21E-07
15	4.30E-07	9.92E-08
16	2.58E-07	2.36E-07
17	1.69E-07	1.65E-07
18	1.38E-07	1.09E-07
19	9.05E-08	7.22E-08
20	1.35E-07	5.16E-08
21	8.20E-08	4.90E-08
22		1.91E-08

[Ūf] Hidrograma unitario final. Los hidrogramas unitarios mostrados permiten generar hidrogramas de escorrentía directa.

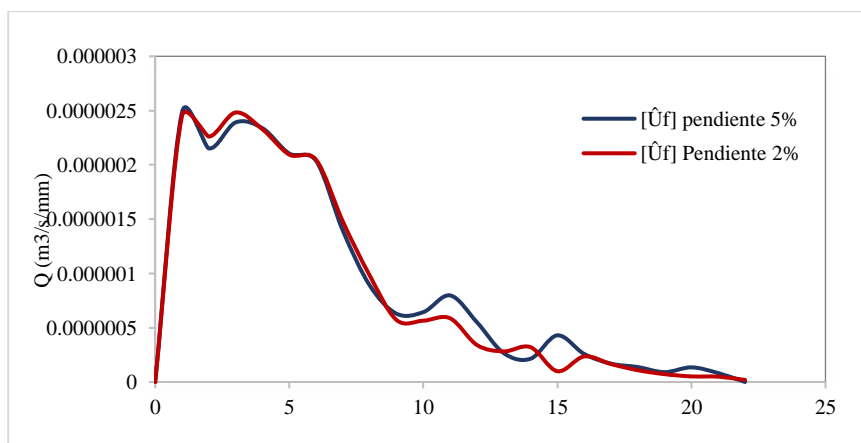


Figura 10: Representación de los hidrogramas unitarios promedio finales para pendientes del 2% y 5%. La grafica se realizó para una mejor apreciación de la variación de los datos de acuerdo con la pendiente utilizada.

Tabla 7: Indicadores estadístico para el Hidrograma Unitario

Pendiente 2%							Pendiente 5%						
TR (años)	I (mm/h)	NSE	VF	PF	KGE	RMSE (lt/h)	TR (años)	I (mm/h)	NSE	VF	PF	KGE	RMSE (lt/h)
5	105.24	0.99	0.93	0.96	0.96	2.36	5	105.24	0.94	0.87	0.87	0.85	5.99
5	89.2	0.95	0.88	0.92	0.87	4.41	5	89.2	0.95	0.87	0.90	0.84	4.34
5	80.98	0.99	0.94	0.99	0.97	1.81	5	80.98	0.94	0.87	0.93	0.93	4.40
5	74.98	0.92	0.81	0.79	0.77	4.38	5	74.98	0.88	0.78	0.83	0.79	5.39
10	123.52	0.99	0.93	1.01	0.96	2.14	10	123.52	0.99	0.93	0.95	0.96	2.74
10	104.69	1.00	0.96	1.00	0.99	1.39	10	104.69	0.98	0.91	0.91	0.89	4.73
10	95.04	0.99	0.93	0.94	0.97	2.02	10	95.04	0.96	0.87	0.92	0.86	4.52
10	85.87	0.97	0.89	0.91	0.88	3.25	10	85.87	0.97	0.89	0.95	0.89	3.65
25	152.54	0.99	0.95	0.95	0.97	2.71	25	152.54	0.96	0.85	0.90	0.83	7.85
25	129.37	0.98	0.91	0.92	0.93	4.21	25	129.37	0.98	0.91	0.91	0.89	4.73
25	117.44	0.99	0.94	0.96	0.94	3.08	25	117.44	0.99	0.94	0.94	0.96	3.36
25	102.71	0.99	0.93	1.01	0.96	2.29	25	102.71	0.98	0.92	1.04	0.96	3.22
Promedio		0.98	0.92	0.95	0.93	2.84	Promedio		0.96	0.88	0.92	0.89	4.58

Los índices mostrados del SCS se obtuvieron al comparar caudales de escorrentía directa del hidrograma del HU con el hidrograma observado. TR= Período de Retorno, I= Intensidad, NSE=eficiencia Nash-Sutcliffe, VF=índice de ajuste volumétrico, PF= índice de diferencia pico; KGE=Kling- Gupta; RMSE=Raíz del error cuadrado medio.

La validez de los valores del hidrograma unitario [Ū] se realizaron con métricas estadísticas teniendo promedios de NSE = 0.98 y 0.96 en pendientes de 2% y 5% respectivamente, VF de 0.92 y 0.88 en pendientes de 2% y 5% respectivamente, PF de 0.95 y 0.92 en pendientes 2% y 5% respectivamente las métricas mencionadas son las más relevantes Tabla 7.

3.1.4. Techo verde Vs Techo convencional

De los hidrogramas observados de los ensayos en el techo verde y techo convencional se compararon elementos entre hidrogramas como el caudal pico (Qp), el volumen de escorrentía (V), los cuales permitieron determinar la reducción, retención del techo verde y la demora en llegar al caudal pico como se muestra en la Tabla 8 y 9.

Tabla 8: Comparación de elementos del hidrograma, techo verde Vs convencional. Pendiente 2%

TR (años)	Intensidad (mm/h)	Techo verde			Sin techo verde			Diferencia de volumen (lt)	Reducción de Volumen (%)	Reducción de Qmax (%)
		Qmax (lt/h)	Volumen (lt)	tiempo al pico (min)	Qmax (lt/h)	Volumen (lt)	tiempo al pico (min)			
5	105.24	106.69	25.01	2	75.72	16.18	11	8.83	35.32%	29.03%
5	89.2	99.81	13.88	2	65.39	12.56	10	1.32	9.50%	34.49%
5	80.98	89.48	13.42	2	58.51	11.82	11	1.61	11.97%	34.61%
5	74.98	106.69	12.16	4	55.07	10.21	11	1.95	16.04%	48.39%
10	123.52	127.34	20.48	4	72.27	14.74	10	5.74	28.01%	43.24%
10	104.69	106.69	17.15	3	75.72	15.14	10	2.01	11.71%	29.03%
10	95.04	96.36	15.66	3	68.83	13.25	11	2.41	15.38%	28.57%
10	85.87	92.92	14.63	3	65.39	12.85	11	1.78	12.16%	29.63%
25	152.54	158.31	25.01	1	120.46	22.20	11	2.81	11.24%	23.91%
25	129.37	130.78	21.45	3	99.81	19.22	11	2.24	10.43%	23.68%
25	117.44	120.46	19.39	3	89.48	16.98	11	2.41	12.43%	25.72%
25	102.71	106.69	16.86	4	72.27	14.74	10	2.12	12.59%	32.26%
Promedio								2.93	15.6%	31.9%

Los valores mostrados en la tabla fueron obtenidos de los hidrogramas observados a partir del ensayo experimental. TR =Período de retorno; Qmax = Caudal Máximo

Tabla 9: Comparación de elementos del hidrograma, techo verde Vs convencional. Pendiente 5%

TR (años)	Intensidad (mm/h)	Techo verde			Sin techo verde			Diferencia de volumen (lt)	Reducción de Volumen (%)	Reducción de Qmax (%)
		Qmax (lt/h)	Volumen (lt)	tiempo al pico (min)	Qmax (lt/h)	Volumen (lt)	tiempo al pico (min)			
5	105.24	110.1	17.2	3	82.60	16.18	11	0.98	5.69%	25.00%
5	89.2	99.8	15.0	2	65.39	12.50	10	2.47	16.48%	34.49%
5	80.98	89.5	13.6	2	65.39	11.64	11	1.95	14.35%	26.92%
5	74.98	106.7	12.3	2	55.07	10.15	11	2.12	17.29%	48.39%
10	123.52	127.3	20.5	2	99.81	18.41	11	2.12	10.34%	21.62%
10	104.69	106.7	16.9	2	75.72	15.14	11	1.72	10.20%	29.03%
10	95.04	96.4	15.8	2	75.72	13.88	12	1.95	12.32%	21.42%
10	85.87	99.8	14.6	3	68.83	13.36	12	1.26	8.63%	31.04%
25	152.54	158.3	25.0	1	120.46	23.33	10	1.68	6.71%	23.91%
25	129.37	134.2	21.6	3	110.13	19.90	11	1.72	7.96%	17.95%
25	117.44	120.5	19.7	2	99.81	17.21	11	2.52	12.79%	17.15%
25	102.71	106.7	17.2	2	75.72	14.91	12	2.24	13.04%	29.03%
Promedio								1.9	11.3%	27.2%

Los valores mostrados en la tabla fueron obtenidos de los hidrogramas observados a partir del ensayo experimental. TR =Periodo de retorno; Qmax = Caudal Máxima

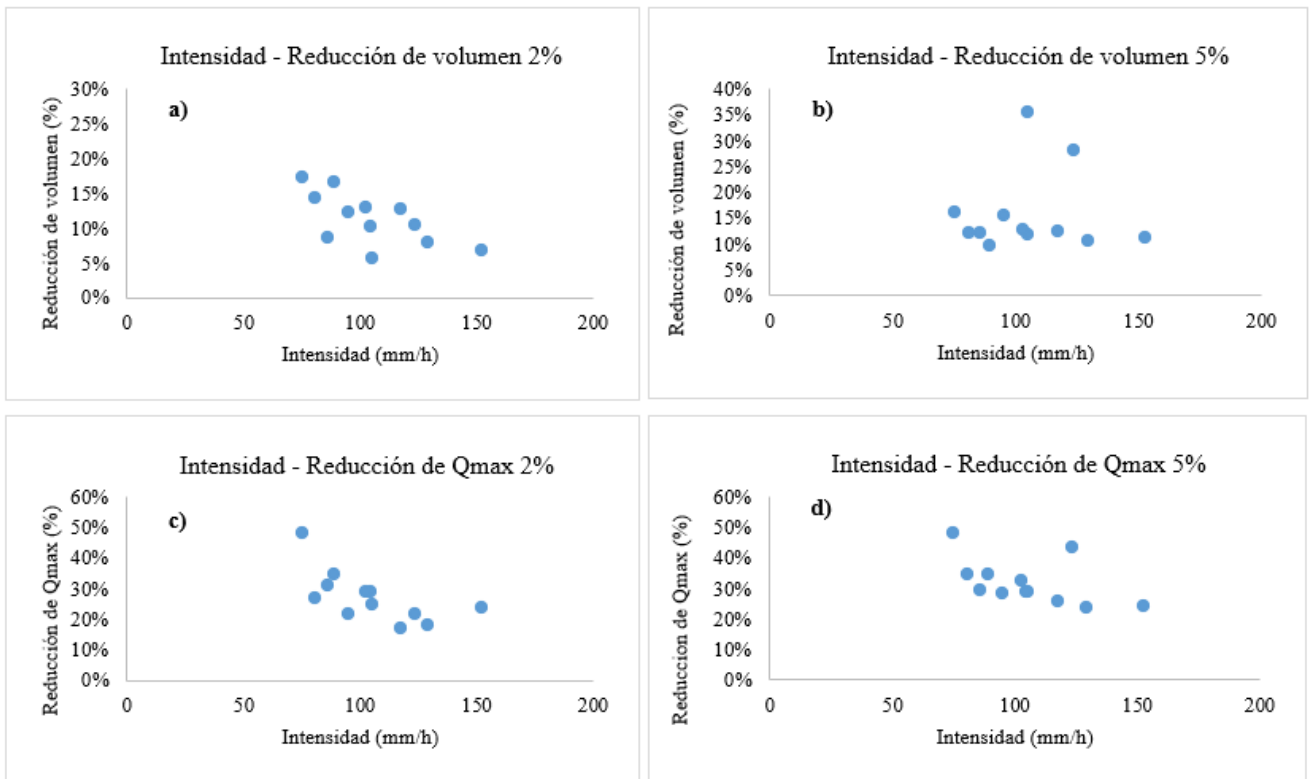


Figura 11: Relaciones entre los diferentes criterios como: (a) Intensidad - Reducción del volumen en pendiente del 2%, (b) Intensidad - Reducción de volumen en pendientes del 5%, (c) Intensidad – reducción de Qmax en pendiente del 2%, (d) Intensidad – reducción de Qmax en pendiente del 5%.

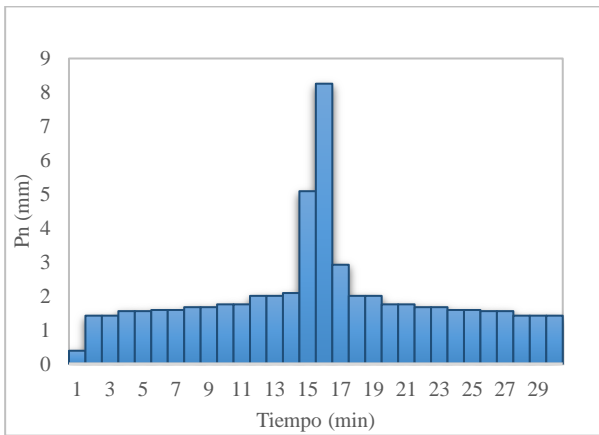


Figura 12: Tormenta de diseño para un evento de precipitación con diferentes intensidades, en intervalos de un minuto, para el desarrollo de la banda de errores de los modelos SCS e HU.

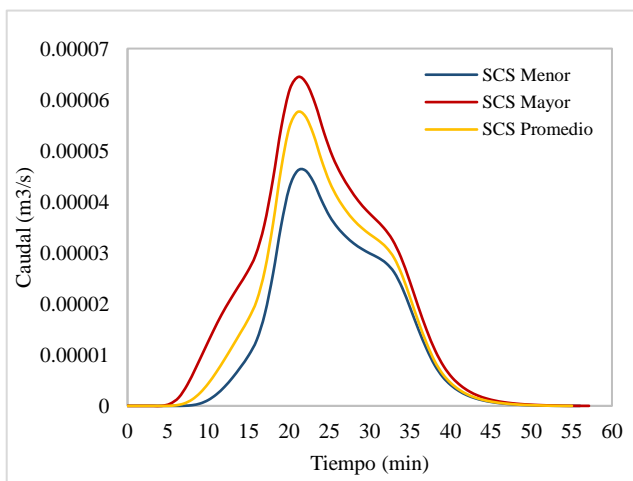


Figura 13: Banda de error del modelo SCS para un evento de precipitación con diferentes intensidades, indicando los hidrogramas al utilizar los rangos mínimos, máximos y promedios.

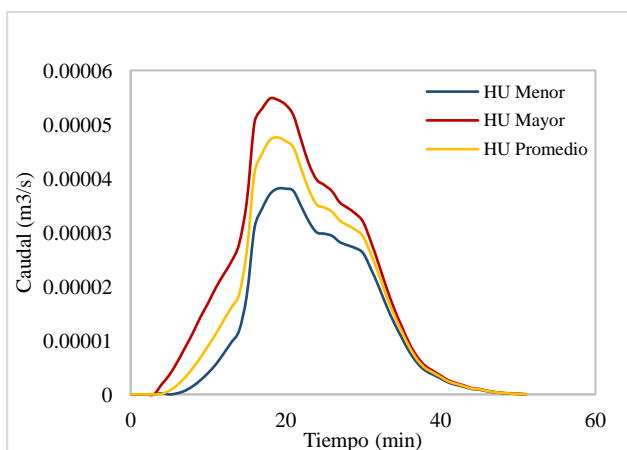


Figura 14: Banda de error para el modelo del HU de un evento de precipitación con diferentes intensidades, indicando los hidrogramas al utilizar los rangos mínimos, máximos y promedios.

3.2. DISCUSIÓN

3.2.1. Esguerrimiento base y directo

Como se puede observar en la Tabla 3 se presentan los componentes para cada hidrograma. Se puede apreciar que al simular el techo verde con pendiente del 2% y 5 % existen cambios mínimos en el esguerrimiento base, teniendo valores promedios de 17.8% para la pendiente del 2% y 16.9 % del esguerrimiento base para una pendiente al 5%.

En la Tabla 3, la esguerrencia directa para una pendiente de 2% es del 49%, mientras que para la pendiente de 5% la esguerrencia directa es 53%, en este caso las pendientes no tienen gran influencia sobre el esguerrimiento directo. Los valores obtenidos sirvieron para el desarrollo de los hidrogramas por los diferentes métodos SCS e hidrograma unitario.

El valor de las pérdidas obtenidas en la Tabla 3 superan el 30% de la precipitación total, esto se debe a que pudo existir una retención de flujo en la vegetación y el sustrato, o se debe a la variación del flujo por manipulación de la válvula y uso constante de la bomba al momento de ensayar.

3.2.2. Modelos hidrológicos

En la investigación se utilizaron dos modelos hidrológicos con el objetivo de obtener parámetros esenciales de cada uno. Como se puede observar los valores del número de curva varían en un rango de 92.3 a 96.5, teniendo un único valor de 88.9, esto se debe a un error en la toma de medidas durante el ensayo en el techo verde. Los rangos obtenidos indican un índice alto de permeabilidad siendo comparado con una superficie de pastizales en condiciones pobres de acuerdo a las tablas del SCS [28] . Los estudios para la estimación del número de curva en techos verdes aún son limitados. A partir de un estudio realizado por I. Alyaseri [30] se tiene que los valores del número de curva se encuentran en un rango de 91.4 a 94.9 para un sustrato de espesor 20 cm, igual que el ensayo experimental realizado en este estudio.

En la investigación realiza por W. Liu [31] se estima un rango de CN de 96 a 98 en completa saturación, con sustratos de 5, 10 y 15 cm en contraste al rango encontrado en la presente investigación.

Se observó en la Figura 7 que el CN tiende a disminuir entre mayor sea su intensidad, mientras que el Tc y z no se ven afectados por la intensidad, permaneciendo casi constantes para cada ensayo realizado, también se observa que las pendientes de 2% y 5% no tienen mayor incidencia. en los resultados de los parámetros.

Para el porcentaje de capacidad máxima de retención de la cuenca (z) se encontraron valores en el rango de 1% al 11.7%, dentro del cual el valor repetitivo es de 2%, sin embargo en varios estudios realizados utilizan un valor fijo del 20% [30]–[32]. El rango obtenido en la investigación indica que al utilizar el 20% se puede estar sobrestimando la abstracción. El estudio realizado por E.L. Villarreal y L. Bengtsson [33] indica que el porcentaje de retención máxima de la cuenca a utilizar debería ser del 5%.

Los hidrogramas unitarios promedios observados en la Tabla 6 sirven para estimar la forma del hidrograma resultante de una precipitación. Los resultados muestran que no existe mucha variabilidad en los datos al utilizar pendientes de 2% o 5% (Figura 10), es decir que las pendientes no tienen mayor incidencia en los resultados. En la Figura 10 se observa los hidrogramas unitarios promedios, los cuales no se asemejan a la forma real del hidrograma unitario debido a la falta de precisión en la toma de datos.

Estos hidrogramas pueden utilizarse para estimar la respuesta de la cubierta verde para cualquier evento de lluvia, siempre y cuando se tenga los datos de precipitación neta y caudal de escorrentía directa.

Los índices mostrados en las Tablas 5 y 6 para los métodos SCS e hidrograma unitario indicaron que la aproximación que tiene el hidrograma simulado con respecto al hidrograma observado NSE es alta, teniendo para el método SCS un NSE promedio de 0.96 y en el caso del hidrograma unitario un NSE promedio de 0.98. El método más eficiente para tener un ajuste volumétrico (VF) es el hidrograma unitario que presenta índices mayores al 0.88 en relación al SCS que tiene índices mayores al 0.77, esto se debe a que en el desarrollo del método SCS influyen más variables como: CN, z, Tc y Pn, por lo tanto, disminuye el índice estadístico, mientras que en el hidrograma unitario se usa dos variables Pn y Q_{ed} .

Por otra parte, los índices del caudal pico entre los dos métodos son similares, pero no son precisos con respecto a los hidrogramas observados teniendo los siguientes valores en base a la diferencia de pico (PF), para la pendiente del 2% $PF_{HU}=0.95$, $PF_{SCS}=0.91$ y para la pendiente del 5% un $PF_{HU}=0.92$, $PF_{SCS}=0.91$.

Para una mejor comprensión se realizó una banda de errores de un evento de precipitación con seis intensidades diferentes Figura 12, utilizando los valores mínimos, máximos y promedios de los parámetros: CN, Tc, z, del modelo hidrológico SCS y los parámetros del HU. Se observó que el método SCS Figura 13, muestra un caudal pico mayor con respecto al método del HU Figura 14, sin embargo, el método del HU tiene un tiempo de retardo menor en relación al método SCS.

Los parámetros del método SCS e hidrograma unitario obtenidos del estudio realizado pueden emplearse para estimar hidrogramas ante cualquier evento de precipitación. Cabe destacar que el método SCS es de fácil aplicación y el más eficiente para el desarrollo de hidrogramas.

3.2.3. Techo verde Vs techo convencional

Con el suelo parcialmente saturado se tiene una reducción de volumen de escorrentía en techos verdes mostrados en las Tablas 8 y 9 que oscilan entre el 5% y 35%, los porcentajes son similares a la investigación realizada por N. A. Lopez Machado [3], que obtiene entre 10% y 16% de reducción de volumen de escorrentía en suelos saturados.

El uso de techos verdes retrasa el tiempo pico de 8 a 9 minutos como se observa en las tablas 8 y 9 esto resultados difieren en relación a la investigación realizada por N. Andrés *et al.* [34], los ensayos obtienen un retraso de 1.14 minutos, esto se debe a varios factores entre ellos el espesor de techo verde utilizado, humedad del suelo al ensayar y capa drenante.

La reducción del caudal pico en techos verdes se encuentra entre 17% y 34% mostrado en las Tablas 8 y 9, indica que al usar techos verdes el caudal pico se reduce considerablemente con respecto al techo convencional, estos resultados no presentan coincidencia con investigaciones realizadas por A. Lopez Machado [3] quien obtiene valores entre 7% a 17% para sustratos saturados de espesor 10 cm,

mientras que K. De Cuyper [12] y S. Mariana [35], estiman valores que se encuentra entre 59% a 81% para suelos no saturados con espesor 21 cm.

En la Figura 11 se observa que el techo verde tiende a reducir el volumen y el caudal pico mientras menor sea su intensidad, dando a comprender que el techo verde es más efectivo en intensidades bajas.

3.2.4. Limitaciones y aplicación de la metodología

La metodología utilizada en la investigación presentó limitaciones al momento de ensayar el techo verde con el simulador de aguas lluvia, debido a que no se contaba con caudalímetros para poder regular el flujo de manera precisa. Otra limitación que se puede observar es no haber tenido cortinas a los costados del simulador, con la finalidad de evitar pérdida de flujo de agua al momento de la simulación de esta manera se reducirían las pérdidas al momento de ensayar.

Otra limitante a considerar es el espesor y uso de techo verde, una cubierta vegetal con menor espesor utiliza plantas al ras del suelo generando una menor retención de aguas lluvia a comparación de una cubierta con un espesor mayor en la que se puede utilizar diferentes tipos de planta que ayuden a retener más aguas lluvia, sin embargo, este tipo de techos verdes aplican más peso al soporte del simulador.

La metodología planteada en la investigación servirá de ayuda para poder definir los diámetros de tuberías en zonas urbanas que contemplen techos verdes, los mismos que a través de la capa vegetal y el sustrato amortiguan el impacto del agua de lluvia, absorbiendo y reteniendo una parte del caudal, disminuyendo de así el flujo hacia el drenaje. En base a la última mención se puede desarrollar una investigación que nos permita conocer cuál será el porcentaje de disminución en los diámetros del sistema de drenaje urbano.

4. Conclusiones

La investigación tuvo por objetivo predecir la respuesta hidrológica del techo verde utilizando diferentes métodos hidrológicos y experimentales para evaluar su impacto en la mitigación de volúmenes de escorrentía. Partiendo del desarrollo de un modelo físico experimental que simula

precipitaciones, generando una relación lluvia-escorrentía en el techo verde para pendientes de 2% y 5%. A partir de datos obtenidos del ensayo se llevó a cabo la generación de hidrogramas teniendo un total de 12 hidrogramas por pendiente, siendo evaluados mediante modelos hidrológicos para el cálculo de sus parámetros y la obtención de hidrogramas unitarios únicos.

Los parámetros (CN), (Tc), (z) y [Ūf] fueron estimados usando la escorrentía directa de cada hidrograma observado, los cuales representan el 50% del hidrograma estudiado, el restante está distribuido en el caudal base con 20% y pérdidas del 30%. Las pérdidas son significativas y pueden ser debido a los equipos utilizados. Se recomienda que para el desarrollo de estudios similares se debe utilizar caudalímetros para evitar la calibración en las válvulas y cortinas para captar toda la precipitación de los aspersores.

Los parámetros obtenidos del método SCS e hidrograma unitario pueden ser usados directamente para estimar la respuesta de los techos verdes, debido a que sus índices de ajuste entre hidrogramas simulado y observado NSE, VF y PF son mayores de 0.77. Los dos modelos estudiados son viables para el desarrollo de hidrogramas, se pueden aplicar en cualquier tipo de zona geográfica, para diferentes intensidades y bajo el rango de pendientes del 2% al 5% establecidas en el presente estudio. Se debe tener en cuenta que el método más eficiente a utilizar es el hidrograma unitario siempre y cuando se disponga de las precipitaciones efectivas y datos de escorrentía.

Se recomienda realizar un estudio de techos verdes donde se analice el número de curva CN utilizando distintos espesores en el sustrato, con el objetivo de verificar si el CN varía considerablemente con relación a los rangos establecidos en el estudio desarrollado.

Referencias

- [1] P. Singleton, “Green roofs”, *Building Engineer*, vol. 79, no. 8, pp. 14–16, 2004, doi: 10.4324/9781315270326-93.
- [2] A. Trapote Jaume, “Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible”, *Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2,

- pp. 26–40, 2016, doi: 10.22507/jet.v5n2a1.
- [3] N. A. Lopez Machado, W. J. Barreto Cordero, E. D. Rodriguez Alvarado, and J. R. Romero Cabrera, “Evaluacion del impacto de un techo verde sobre la escorrentia urbana usando un modelo a escala”, *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, vol. ve2020, no. 1, pp. 26–34, 2020, doi: 10.22209/rt.ve2020a04.
- [4] C. López Serna, “Un acercamiento a las Cubiertas Verdes”, *F.B.P S.A*, vol. 1, p. 108, 2010.
- [5] M. J. Leveratto, F. G. Otharán, O. F. Bados, and M. Propati, “Cubiertas verdes como herramienta para la mitigación de isla de calor en áreas urbanas de la Ciudad de Buenos Aires”, no. Oke 1987, 2010.
- [6] W. Liu, C. Ji, J. Zhong, X. Jiang, and Z. Zheng, “Temporal characteristics of the Beijing urban heat island”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 87, no. 1–4, pp. 213–221, 2007, doi: 10.1007/s00704-005-0192-6.
- [7] G. Minke, *Techos verdes: sencillo y eficaz ; planificación, ejecución, consejos prácticos.*, 2nd ed. Alemania, 2005.
- [8] J. Sonne, “Evaluación de techo verde Rendimiento energético”, 2006.
- [9] H. Kasmin, V. R. Stovin, and E. A. Hathway, “Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs”, *Water Science and Technology*, vol. 62, no. 4, pp. 898–905, 2010, doi: 10.2166/wst.2010.352.
- [10] B. G. Gregoire and J. C. Clausen, “Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality”, *Ecological Engineering*, vol. 37, no. 6, pp. 963–969, 2011, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.02.004.
- [11] M. R. Gavilanes Albán, “Techos verdes: prácticas de gestión ambiental en áreas urbanas”, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2015.
- [12] K. De Cuyper, K. Dinne, and L. Van De Vel, “Rainwater discharge from green roofs”, *Plumbing Systems and Design*, vol. Nov/Dec, pp. 10–16, 2005.
- [13] D. J. Beattie and A. R. Jarrett, “Green Roofs for Stormwater Runoff Control”, *Environmental Protection*, vol. EPA/, no. February, p. 81, 2009, [Online]. Available: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r09026/600r09026.pdf>.
- [14] P. Castaño, “PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA Techos verdes y sistemas de procesamiento de agua de lluvia”, UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA, 2014.
- [15] H. Rosatto *et al.*, “Eficiencia en la retención del agua de lluvia de cubiertas vegetadas de tipo ‘extensivo’ e ‘intensivo’”, *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, vol. 45, no. 1, pp. 169–183, 2013.
- [16] W. C. Morán, *Hidrologia para estudiantes de ingenieria civil*, Segunda Ed. Lima - Peru, 1989.
- [17] A. Bateman, “Hidrología básica y aplicada”, *Brazilian Journal of Biology*, vol. 71, no. 1, pp. 241–253, 2011, [Online]. Available: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>.
- [18] J. Sanchez, “Calculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S.”, *Bosque*, pp. 1–6, 2009.
- [19] V. Mockus, “Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall”, *National Engineering Handbook*, p. 24, 2004.
- [20] V. Castillo, M. Martinez, and J. Albadalejo, “Validez del metodo del numero de curva para el calculo de caudales de escorrentia en areas mediterraneas semiarida”, pp. 235–240, 2018.
- [21] A. Y. Günal and A. Güven, “Synthetic unit hydrograph of small catchments by using GIS”, *Acta Physica Polonica A*, vol. 130, no. 1, pp. 130–132, 2016, doi: 10.12693/APhysPolA.130.130.
- [22] Universidad Nacional del Nordeste, “Tema VII: Hidrograma Unitario”, 2018, pp. 1–19,

- 2018, [Online]. Available: http://ing.unne.edu.ar/pub/TEMA_VII.pdf.
- [23] J. L. Ayuso, A. Peña, and M. P. Montesinos, “Estimación del hidrograma unitario. Estudio comparativo de cuatro métodos lineales”, *Ingeniería del agua*, vol. 1, no. 2, 1994, doi: 10.4995/ia.1994.2635.
- [24] V. Te Chow, D. R. Maindment, and L. Mays, “Hidrología-Aplicada-Ven-Te-Chow.” p. 300, 2000.
- [25] F. Sánchez, “Caracterización geotécnica del centro norte de Quito relacionada con el uso y ocupación del suelo por obras civiles”, p. 50, 2018.
- [26] J. Verticales, G. P. Urrego, K. Yamhure, and H. Edición, “Techos verdes y jardines verticales”, 2017.
- [27] INAMHI, “Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación”, *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*, vol. 2, p. 282, 2015, [Online]. Available: http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FINAL.pdf.
- [28] J. Flórez Gálvez and A. Bolaños Mora, *Manual de Drenaje en Carreteras 2009*, no. 1. 2009.
- [29] B. Pang, J. Yue, Z. Huang, and R. Zhang, “Parameter uncertainty assessment of a flood forecasting model using multiple objectives”, *Journal of Flood Risk Management*, vol. 12, no. S1, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1111/jfr3.12493.
- [30] I. Alyaseri, “Effect of green roof media depth on curve number calculation”, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, no. 8, pp. 1471–1477, 2019.
- [31] W. Liu, Q. Feng, W. Chen, and W. Wei, “Assessing the runoff retention of extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate moisture”, *Hydrology Research*, vol. 51, no. 4, pp. 635–647, 2020, doi: 10.2166/NH.2020.167.
- [32] R. Tassi, F. Lorenzini, and D. G. Allasia, “Tool to address green roof widespread implementation effect in flood characteristics for water management planning”, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, vol. 370, pp. 217–222, 2015, doi: 10.5194/piahs-370-217-2015.
- [33] E. L. Villarreal and L. Bengtsson, “Response of a Sedum green-roof to individual rain events”, *Ecological Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1–7, 2005, doi: 10.1016/j.ecoleng.2004.11.008.
- [34] L. Nelson *et al.*, “ROOFS”, *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.*, vol. 32, no. 2, pp. 54–71, 2020.
- [35] da S. Mariana, E. Vazquez, M. K. Najjar, A. W. A. Hammad, and A. Haddad, “Assessing the Retention Capacity of an Experimental”, no. Lid, 2019.