

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO TECNOLÓGICO DE TECHOS VERDES PARA EL CLIMA TROPICAL ANDINO

PROPOSAL FOR TECHNOLOGICAL IMPROVEMENT OF GREEN ROOFS FOR THE ANDEAN TROPICAL CLIMATE

Alejandro Gómez Cubillos*

Sandra Galarza-Molina**

Andrés Torres***

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2016

Fecha de revisión: 27 de julio de 2017

Fecha de aprobación: 18 de septiembre de 2017

Cómo citar: A. Gómez Cubillos, S. Galarza-Molina y A. Torres, "Propuesta de mejoramiento tecnológico de techos verdes para el clima tropical andino," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 73-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2672>

RESUMEN

La gestión de riesgos por el aumento de la escorrentía superficial en zonas urbanas requiere intervención desde múltiples enfoques, ambientales, sanitarios, sociales y económicas. La infraestructura verde aporta soluciones de creciente interés por sus beneficios ambientales y potencial aprovechamiento económico. Este artículo propone un mejoramiento tecnológico para la adaptación de los techos verdes al clima tropical andino, en términos de su comportamiento hidrológico, para lo cual se desarrolló un montaje experimental con seis módulos de techos verdes extensivos y un módulo testigo (solo cubierta). El montaje experimental

* Ingeniero Ambiental y Sanitario, candidato a magíster en Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: gomez-alejandro@javeriana.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8285-009X>

** Ingeniera Civil, magíster en Hidrosistemas y estudiante de Doctorado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: sgalarza@javeriana.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0002-1915>

*** Ingeniero Civil y especialista en Sistemas Gerenciales de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; magíster en Ingeniería Civil y doctor en Hidrología Urbana, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, INSA-Lyon, Francia. Profesor titular, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: andres.torres@javeriana.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8693-8611>

permitió la obtención de datos de 21 eventos de precipitación, modificando la configuración de dos factores experimentales, tipo de planta con seis variaciones y altura de sustrato con tres variaciones y tres eventos más para verificar el efecto de la variación de la pendiente de la cubierta, como tercer factor. Los datos obtenidos se procesaron para el cálculo de las variables hidrológicas de interés (precipitación, escorrentía, duración del evento, tiempo anterior seco), que expresan las características del evento y los indicadores del comportamiento hidrológico (coeficientes de escorrentía basado en volumen C_v y en el caudal pico C_p y tiempo de retraso K) y su análisis estadístico permitió identificar cuáles factores experimentales tienen o no influencia significativa en dichos indicadores. Finalmente, se desarrollaron herramientas para la simulación de variables e indicadores hidrológicos a partir de series de precipitación externas y su implementación en una herramienta de diseño que seleccione las configuraciones de techos verdes que presenten el mejor comportamiento hidrológico.

Palabras clave: techos verdes, hidrología urbana, máquina de soporte vectorial, sistemas urbanos de drenaje sostenible, simulación, diseño.

ABSTRACT

Risk management through increased surface run-off in urban areas requires intervention from multiple environmental, public health, social and economic approaches. The green infrastructure provides solutions of growing interest for its environmental benefits and potential financial advantage. This article proposes a technological improvement for the adaptation of green roof to the Andean tropical climate, regarding its hydrological behavior, for which an experimental setup was developed with six modules of extensive green roof and one control module (roofing sheet only). The experimental setup allowed the obtaining twenty-one data precipitation events, modifying the configuration of two experimental factors, plant species with six variations and substrates heights with three variations and three additional events to verify the effect of the roof slope variation as a third factor. The obtained data were processed for the calculation of hydrological variables of interest (precipitation, run-off, duration of the event, previous dry time) expressing event characteristics and the hydrological behavior indicators (runoff coefficients based on volume C_v and peak flow C_p and lagtime K) and their statistical analysis, allowed to identify which experimental factors have or do not have significant influence on these indicators. Finally, tools were developed for the simulation of hydrological variables and indicators from external precipitation series and their implementation in a design tool that selects the green roof configurations that present the best hydrological behavior.

Keywords: Green roof, urban hydrology, support vector machines, sustainable drainage systems, simulation, design.



INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano, usualmente incontrolado y con brechas en la planeación trae como consecuencia el hecho de que los problemas relacionados con el manejo de la escorrentía superficial en cantidades cada vez mayores sigan generando pérdidas económicas y humanas, a pesar de las inversiones en el mejoramiento del drenaje urbano [1]. Se estima que de forma natural la proporción de agua que se gestiona sin producir escorrentía es del 95 %, pero en cambio en urbes altamente densificadas esa proporción se invierte, lo que genera escorrentía del 95 % de la precipitación, la cual debe gestionarse adecuadamente para asegurar las condiciones de habitabilidad [2]. La gestión del recurso hídrico en zonas urbanas ha tenido cambios significativos en las dos últimas décadas, pasando del enfoque estricto de solución de problemáticas relacionadas con el control de inundaciones y la protección de la salud pública, a una visión de múltiples objetivos en materia ambiental, sanitaria, social y económica [3]. Hoy en día se reconoce que este nuevo enfoque podría impactar positivamente el desarrollo urbano al proveer abastecimiento adicional de agua, incrementar la biodiversidad y mejorar microclimas, entre otros [3]. En el marco de estos nuevos enfoques, los techos verdes se han convertido en una tendencia de la arquitectura moderna, como un elemento clave del urbanismo, muy promovido en países como Alemania, Suecia, Estados Unidos, Japón y Singapur [4], por sus amplios beneficios ambientales [5]-[6]. Los techos verdes se clasifican en intensivos, semiintensivos y extensivos. Los intensivos tienen gruesas capas de sustratos, que van de los 20 cm a los

200 cm; los extensivos, con capas de sustrato menores a los 15 cm y los semiintensivos tienen una capa de sustrato moderada. De las tres clasificaciones, los techos verdes extensivos son los más utilizados, debido a las restricciones de peso en infraestructura, costos y requisitos de mantenimiento [7].

A pesar de los resultados y los aportes de los diferentes enfoques de investigación, siguen existiendo brechas en el conocimiento respecto a las variables de diseño y los rendimientos hidrológicos de los techos verdes [8]; incluso se reporta que los resultados de diferentes estudios no son aplicables a factores de diseño para techos verdes nuevos [9]. Muchas de estas publicaciones concluyen que se requiere continuar investigando la selección de especies adecuadas para condiciones locales específicas [10]. También se afirma que es necesario, entre otros: 1) involucrar el análisis de la incertidumbre y sensibilidad en los modelos hidrológicos [11]; 2) desarrollar y calibrar modelos lluvia-escorrentía, debido a la falta de datos en diferentes contextos climáticos [12], 3) mejorar el rendimiento de modelos que expliquen el comportamiento del agua en el suelo, su humedad y evapotranspiración [13].

Por otra parte, la mayoría de resultados de investigación publicados internacionalmente no han sido aplicados en nuestro contexto climático. La región andina por su posición geográfica y factores físico-geográficos particulares, como el relieve, definen las características específicas de su régimen climático [14]-[15], el cual presenta particularidades que no permiten una aplicación directa de las conclusiones y desarrollos en otros contextos. De acuerdo con

lo anterior, la tecnología de techos verdes, vista como un elemento arquitectónico que puede contribuir en la regulación hidrológica, necesita ser adaptada a las condiciones que impone el régimen climático local, que para este caso particular es el clima tropical andino. Por tal razón, esta publicación pretende mostrar una propuesta que involucre el análisis del comportamiento hidrológico, respecto a diferentes factores de diseño.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Factores experimentales

Como factores experimentales se establecieron el tipo de planta, la altura del sustrato y la pendiente de la cubierta. Para el primero se seleccionaron seis clases de planta, Suculenta (*Sedum pachyphyllum*), Pensamientos (*Viola x wittrockiana*), Bergenia (*Bergenia ciliata*), Reseda (*Libolaria maritima*), Sedum (diferentes variedades) y Lechuga Batavia (*Lactuca sativa*) y como altura del sustrato, 5 cm, 10 cm y 15 cm. Las combinaciones de estos dos factores conformaron los tres primeros grupos de tratamiento experimental, para lo cual se fijó la pendiente en 20 % para todos los módulos y se necesitaron como mínimo 18 eventos de lluvia para la obtención de datos (aunque durante el desarrollo del proyecto se colectó información de 21 eventos). Finalmente, se conformó un tratamiento para evaluar el efecto de la pendiente, con variaciones de 5 %, 20 % y 45 %, manteniendo por cada pendiente dos tipos de planta y la misma altura de sustrato, para utilizar los seis módulos experimentales, y requiriendo tres eventos de lluvia para la obtención de datos.

1.2. Montaje experimental

El montaje experimental se ubicó en la terraza del Edificio No. 67 José Rafael Arboleda, de la Pontificia Universidad Javeriana (ver Fig. 1). Consta de siete mesas en perfil metálico, niveladas en plano horizontal y con un marco interno móvil, el cual reposa en un apoyo por un extremo y en una celda de carga por el otro. Sobre cada una de las siete mesas se dispuso una cubierta de zinc de 0,80 m por 0,80 m, inclinada con una pendiente determinada, y sobre ellas se tiene la posibilidad de instalar un módulo unitario de techo verde, dejando uno de los módulos únicamente con la cubierta de zinc, con el objeto de que obre como testigo. Cada módulo cuenta con un recipiente para el almacenamiento de la escorrentía superficial, suspendido por un soporte conectado a una celda de carga. Las celdas de carga son sensores de peso que transforman la energía mecánica que ejerce el peso de la cubierta o del recipiente, en energía eléctrica enviando la señal en miliamperios (mA); por lo tanto, es necesario un proceso de calibración para transformar dicha señal eléctrica en volumen de agua. El sistema de adquisición de los datos del monitoreo en continuo permite almacenar un dato (de la señal eléctrica en mA) por minuto y consta de: 1) 8 entradas por módulo; 2) un sistema de alimentación por puerto USB; 3) comunicación modbus, sobre red rs-485; 4) resolución del conversor ADC: 12 bits, y 5) software de captura y visualización de *national instruments* [16]. Los datos adquiridos con el sistema se almacenan en archivos CSV para su posterior procesamiento.



Fig. 1. Montaje experimental de techos verdes para el proyecto
Fuente: elaboración propia.

1.3. Fuentes de información externas

Para el desarrollo de pruebas que permitan la inferencia de resultados a partir de otras fuentes de información climatológica, se tomaron los registros de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de la Secretaría Distrital de Ambiente –(RMCAB). Para el interés de este proyecto de investigación se realizó la descarga de las series multianuales de precipitación para la estación Sagrado Corazón, la cual es la más cercana al montaje experimental (a 600 m aproximadamente). La serie de precipitación tiene un periodo de obtención de uno por minuto.

1.4. Método de calibración

El proceso de obtención de los datos de calibración se realizó registrando al menos cinco datos de la señal observada en el momento que se coloca el recipiente usado para el almacenamiento de la escorrentía, inicialmente vacío y luego con volúmenes de dos, cuatro, seis y finalmente ocho litros.

Cada uno de los datos presenta una fuente de incertidumbre para los resultados del monitoreo en continuo, no solo por la precisión de los instrumentos de medición, sino también por la manipulación de los elementos utilizados para la calibración (botella aforada, probeta, celda de carga, entre otros) y la secuencia aplicada y las réplicas de las mediciones (aforo, montaje de los diferentes volúmenes, registro de datos). Teniendo como base este escenario, se implementó un método numérico para calcular la propagación de la incertidumbre [17]. Se asume que cada dato aislado (de cada réplica y de cada elemento) de volumen y su señal, presentan una distribución normal y que la incertidumbre asociada a su medición es la mitad de la precisión que ofrece el aparato con el que se mide (probeta y celda de carga, respectivamente), con un 95 % de confianza.

Por cada dato aislado se generaron 1000 datos aleatorios utilizando el método de Monte Carlo, teniendo como promedio el dato aislado original y como desviación estándar, la mitad de la precisión del equipo utilizado en su medición [17]. Posteriormente, para cada módulo se calibraron

1000 posibles regresiones lineales, con lo cual se tienen 1000 valores de intercepto y pendiente, que representan en conjunto la relación funcional más probable entre la señal eléctrica de la celda de carga y el volumen de agua correspondiente.

1.5. Procesamiento de datos

En el proyecto de investigación se requiere determinar las variables hidrológicas de interés para los eventos de lluvia, y para este propósito el monitoreo en continuo del módulo experimental de referencia permite determinar las variables que definen el evento, como 1) la precipitación; 2) la duración; 3) la intensidad, y 4) el tiempo anterior seco, como el periodo entre la ocurrencia de los eventos monitoreados. De manera complementaria, los seis módulos experimentales de techos verdes aportan la información de respuesta lluvia-escorrentía. Adicionalmente, a través del monitoreo en continuo, es posible realizar los cálculos sincronizados de estas variables y hacer las comparaciones entre el volumen total de escorrentía, el caudal pico y el centroide del hidrograma, lo cual se mide a través de los indicadores del comportamiento hidrológico: 1) coeficiente de escorrentía basado en el volumen (C_v) que se determina por la relación entre el volumen de escorrentía superficial generado por cada módulo de techo verde y el volumen de precipitación medido en el módulo de referencia, 2) el coeficiente de escorrentía basado en el caudal pico o de atenuación (C_p), que corresponde a la relación entre el caudal máximo obtenido en el monitoreo de cada uno de los módulos y la referencia, y 3)

el tiempo de retraso (K) que se calcula como el desfase del centroide del hidrograma de precipitación de cada módulo, respecto a la referencia. A pesar de que estas variables son de uso común en la gestión del recurso hídrico, el proceso de obtención de información primaria a partir de un montaje experimental y las necesidades particulares de procesamiento de datos han requerido la adaptación y complementación de los métodos convencionales, para la inclusión del método numérico de propagación de la incertidumbre, el suavizado de la señal eléctrica, entre otros.

El cálculo del volumen de escorrentía en cada módulo, expresado en [l], se realiza mediante la aplicación del método de calibración descrito anteriormente; sin embargo, el monitoreo en continuo necesita la aplicación de un filtro que suavice las fluctuaciones de la señal eléctrica, propia del equipo de adquisición de datos. Estas fluctuaciones, al ser convertidas a diferencias de volúmenes y posteriormente a caudales de escorrentía podrían estar indicando pérdidas y ganancias muy importantes del volumen acumulado en el recipiente y posteriormente caudales de escorrentía negativos o demasiado altos en muy corto tiempo. Al ser esta una situación poco realista, se decidió adaptar y aplicar un filtro que permitiera el suavizado de la señal eléctrica original. El procedimiento LoWeSS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing), propuesto originalmente por Cleveland en 1979 [18], permite cumplir este objetivo, aplicando un modelo de regresión no paramétrico utilizado como suavizado de una señal [19]-[20]. Se seleccionó el parámetro $f=0.04$ del procedimiento LoWeSS a partir del comparativo entre diferentes valores.

Las diferencias del volumen de escorrentía en el periodo de obtención de datos corresponden al caudal de la escorrentía, y lo convierte en unidades de [ml/s]. Para el cálculo de la precipitación, se realiza el cálculo de la acumulación de agua y se divide en el área de la cubierta (sin techo verde, ni componentes que generen interceptación, retención o infiltración de agua), expresado en [mm]. La intensidad de la precipitación corresponde al cociente entre la precipitación monitoreada

y el tiempo, expresado en [mm/h]. A manera de ejemplo, la Fig. 2 presenta el hidrograma para el módulo de referencia correspondiente al evento del 6 noviembre de 2015: las 1000 generaciones de datos se grafican con líneas grises y la mediana del caudal en [ml/s] se presenta con color rojo. Los puntos de inicio y fin del evento se ubican en los puntos de inflexión de la curva de pendiente del volumen acumulado y su diferencia corresponde a la duración del evento.

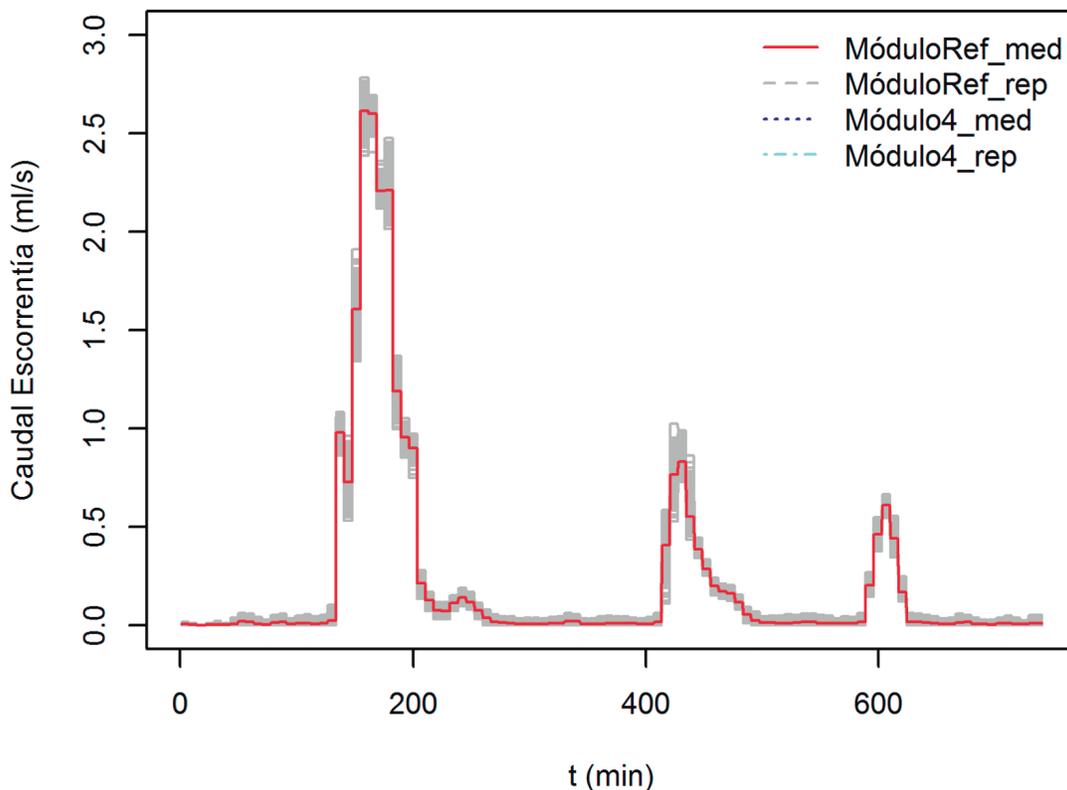


Fig. 2. Hidrograma del módulo de referencia. Evento del 6 noviembre de 2015

Fuente: elaboración propia.

Otras variables de interés son el volumen total de escorrentía, que se calcula como la sumatoria de los deltas de volumen. El caudal pico corresponde al valor máximo de los

volúmenes de escorrentía en cada delta de tiempo y el tiempo al pico, es el valor en la absisa del tiempo del hidrograma que corresponde al caudal pico, para cada una de

las 1000 series desacumuladas de volumen obtenidas en el proceso de calibración. El centroide del hidrograma se halló a partir del método geométrico.

La Fig. 3 muestra con el hidrograma del módulo de referencia (rojo) el pulso de la precipitación de un evento determinado y como ejemplo se compara con el hidrograma del módulo 4 (azul) del montaje experimental, lo que evidencia la reducción del volumen total de escorrentía, la atenuación del caudal máximo y el retraso del hidrograma.

El coeficiente de escorrentía basado en el volumen total (C_v) se determina por la relación entre el volumen de escorrentía superfi-

cial generado por cada módulo de techo verde y el volumen de precipitación del módulo de referencia. Como una diferenciación de la variable de respuesta anterior, se calculó el coeficiente de escorrentía basado en el caudal pico (C_p), que corresponde a la relación entre el caudal máximo obtenido en el monitoreo de cada uno de los módulos de techos verdes y el módulo de referencia. El desfase presentado en comparación con el centroide del hidrograma de la precipitación medido en el módulo de referencia y el centroide del hidrograma de la escorrentía superficial de los módulos con techos verdes es interpretado como el tiempo de retraso (LagTime o K).

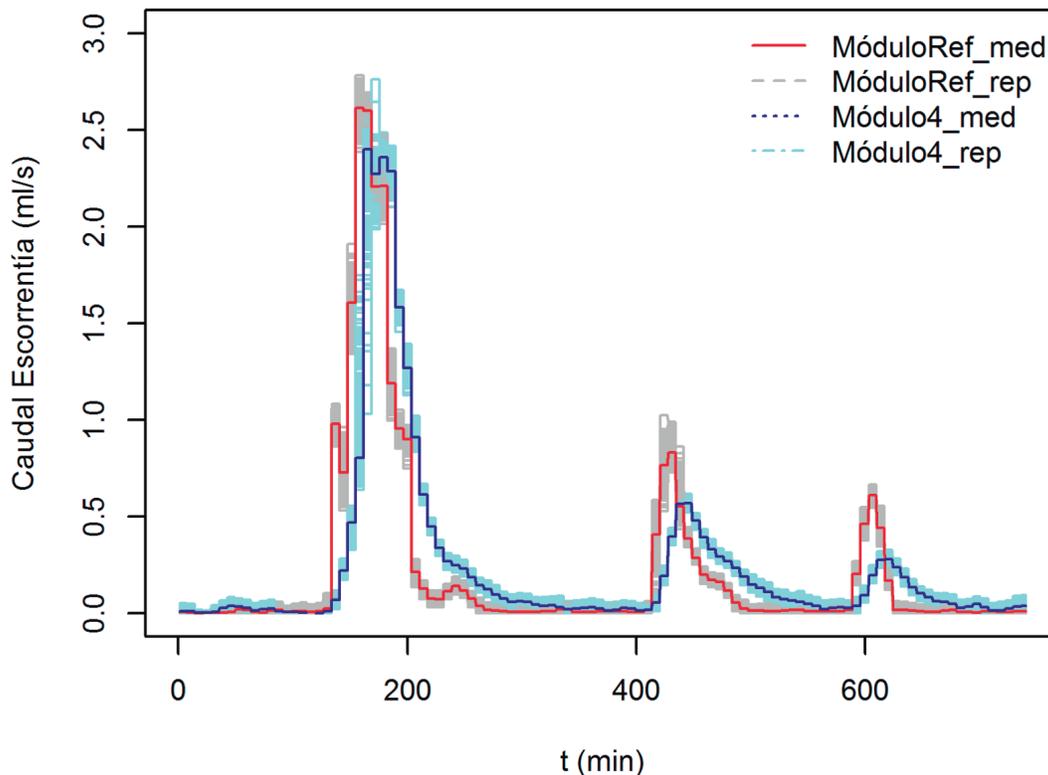


Fig. 3. Comparación de los hidrogramas de referencia y el módulo 4 para el 6 de noviembre de 2015

Fuente: elaboración propia.

1.6. Análisis estadístico

Para el propósito del proyecto es necesario determinar si el diseñador a través de los factores experimentales (planta, sustrato y pendiente) puede alterar el comportamiento hidrológico y de forma complementaria analizar si las variables independientes y aleatorias relacionadas con el evento de lluvia (precipitación, escorrentía, duración del evento, tiempo anterior seco) tienen un impacto significativo en las variables de respuesta (coeficientes de escorrentía C_v y C_p y tiempo de retraso K).

En consecuencia, se requiere la aplicación de análisis estadísticos, a través de pruebas no paramétricas que permitan determinar el grado de significancia de los factores experimentales sobre los indicadores del comportamiento hidrológico, la diferencia entre la variación de dichos factores y su correlación con los mencionados indicadores, para lo cual se seleccionaron las pruebas de Kruskal-Wallis, de Wilcoxon y de Spearman, respectivamente. Sin embargo, la aplicación de estas pruebas sobre un resultado en particular no es suficiente para la investigación; por lo tanto, en el test estadístico se involucra el método numérico de propagación de incertidumbre, lo cual permite realizar un análisis detallado de los resultados, no en función de un único valor, sino de una serie de posibles valores en cada caso.

El código de programación para el test de Kruskal-Wallis toma el set de datos y extrae la primera réplica del factor/variable independiente y aplica el test uno a uno contra el indicador de comportamiento hidrológico o variable de salida, como parejas de datos. Por ejemplo, el test se aplica para el factor

“tipo de planta” contra el “coeficiente de escorrentía del volumen total (C_v)” tomando la primera réplica de los resultados, incluyendo todos los eventos de los tratamientos de 1 a 3 y todos los módulos, y se extrae el valor p (P -value). Luego la operación se repite para la segunda réplica y así hasta completar las 1000 generaciones de datos, para posteriormente pasar a otro factor o variable independiente con el “coeficiente de escorrentía para el caudal pico” y luego con el “tiempo de retraso o LagTime”. Funciona igual para el tratamiento 4, pero el código se ejecuta aparte. El test de Wilcoxon se aplicó de la misma forma, comparando las parejas de datos de los factores experimentales y de las variables relacionadas con el evento para determinar si existe una diferencia estadística y significativa entre ellas. El test de Spearman se realiza para identificar la probabilidad de significancia de la correlación y el análisis del coeficiente de correlación.

En los tres test, la hipótesis nula fue planteada de tal manera que los valores P (p -values), inferiores a 0,05 determinarían que había una influencia significativa de los factores experimentales y las variables relacionadas con el evento, en los indicadores del comportamiento hidrológico. El desarrollo de 1000 réplicas para cada comparación de variables permite calcular la probabilidad que presente dicha influencia significativa, lo que robustece el análisis estadístico de los resultados.

1.7 Herramientas de simulación y diseño

Es importante resaltar que este proyecto no pretende comprender ni modelar los procesos

o mecanismos que determinan el balance hídrico, ni reproducir a partir de datos pluviométricos de entrada la respuesta de escorrentía observada. La herramienta de simulación propuesta corresponde más bien a una herramienta de diseño, que contribuye a la toma de decisiones que orienten el diseño, en cuanto a las combinaciones de alturas de sustratos y plantas para el objetivo hidrológico específico perseguido por el diseñador. La pendiente no se incluyó en la herramienta debido a que presentó una probabilidad nula de ser significativa en la respuesta lluvia – escorrentía como se reporta en la sección “Resultados y discusión”. Por otra parte, cabe resaltar que este proyecto contó con un diseño y montaje experimental que permitió obtener datos sobre la respuesta lluvia-escorrentía en condiciones reales del clima tropical andino durante un periodo de un año, los cuales se quieren sintetizar en las herramientas de simulación presentadas en esta sección.

Con el objetivo de reducir la dimensionalidad del problema, se seleccionó un grupo de variables de entrada y uno de salida, que representan la dinámica del problema de análisis. Entonces, de los 21 eventos de lluvia, mediante el procesamiento de datos descrito en la sección “Análisis estadístico”, se obtuvo el valor de la mediana de las variables que caracterizan el evento, como la precipitación, duración, intensidad, centroide del hidrograma y tiempo anterior seco que, concatenado con la altura de sustrato y tipo de planta correspondiente a los seis módulos instalados para dicho evento, se consiguen los grupos de datos de entrada de la simulación. Cada uno de estos módulos generó la

información relacionada con la escorrentía y los indicadores del comportamiento hidrológico, calculados con los resultados del módulo de referencia o testigo, que se configuraron como los datos de salida. En total se tienen 124 grupos de datos, debido a que durante dos eventos uno de los módulos no generó información.

Dadas las variables de entrada y salida para la simulación, se selecciona la máquina de soporte vectorial (SVM, por sus siglas en inglés) como método para procesar estas variables. Las SVM se desarrollaron por Vapnik con base en la teoría de aprendizaje estadístico y derivan la hipótesis de reducción del riesgo estructural, para minimizar el error empírico y el intervalo de confianza de la máquina, así como para lograr un buen nivel de generalización, dotado de un algoritmo robusto y eficiente, tanto para clasificación, como para regresión. La regresión estándar utiliza una función de pérdidas $L\varepsilon(v, g(u))$, que describe la desviación de la función estimada de la original [21].

La SVM es cada vez más aceptada en la resolución de problemas hidrológicos [22]. Los grupos de datos se dividieron en proporciones de 70 % y 30 % para conformar los conjuntos de calibración y validación. La librería kernlab contiene diferentes funciones núcleo o kernel; por lo tanto, se procedió a ejecutar el entrenamiento de una SVM para cada variable de salida, lo que permitió identificar la función kernel de mejor aproximación a los resultados del conjunto de validación, teniendo como criterio la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Con las variables e indicadores hidrológicos simulados con la aplicación de las SVM

se construyen los hidrogramas sintéticos para cada combinación de los factores de diseño, seis tipos de planta y tres alturas de sustrato, para un total de 18 combinaciones, que se denominarán para este estudio *tipo de techo verde*. El hidrograma sintético se construye a partir de dos rectas, como se muestra en la Fig. 4. La primera es ascendente y está conformada por el punto de origen (0,0) y el punto conformado por los va-

lores del caudal pico y tiempo al caudal pico (Q_p, T_p). La segunda es descendente, inicia en el punto anterior (caudal y tiempo pico) y el punto de intersección al eje de caudal, es decir, el caudal donde cesan los efectos de la escorrentía y el tiempo final (0, T_x), que es específico para cada tipo de techo verde y se calcula de forma que el volumen simulado en la SVM sea igual al volumen calculado en el hidrograma sintético.

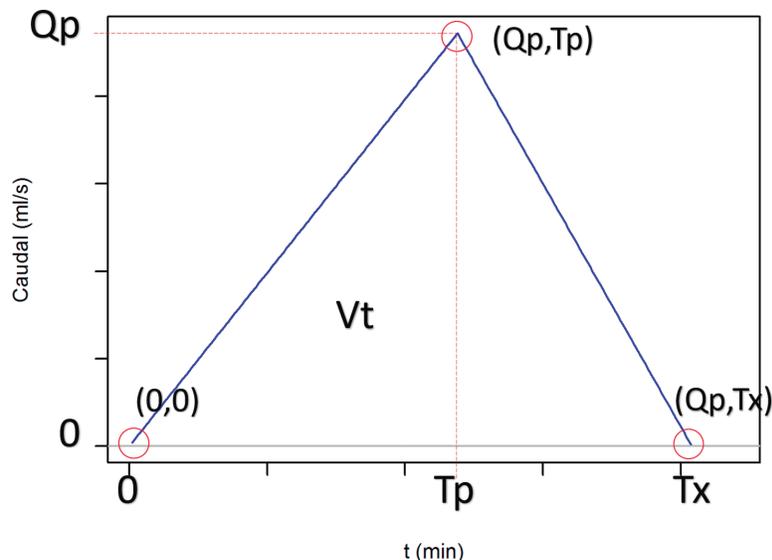


Fig. 4. Ejemplo de hidrograma sintético, generado en la herramienta de simulación

Fuente: elaboración propia.

La aplicación de este método permite generar hidrogramas sintéticos y simplificados a partir de la simulación de pocas variables que caracterizan un módulo experimental. Estos módulos tienen un área de 0,64 m², pero es necesario el desarrollo de una herramienta de diseño de los techos verdes que permita acoplar los resultados obtenidos en la simulación a áreas mayores en las que suelen construirse este tipo de sistemas.

Para este propósito se parte de la superposición de los hidrogramas, que permite analizar el comportamiento de las variables hidrológicas cuando estos efectos se producen en serie o en paralelo. Los arreglos de techos verdes en serie, generan un hidrograma acumulado, sumando los valores de caudal en cada instante. Para el caso de los arreglos en paralelo, la acumulación de los caudales se desplaza en el equivalente al

tiempo de retraso o LagTime calculado para cada tipo de techo, con el método descrito.

La herramienta de diseño se programó en lenguaje R [23], para la selección aleatoria de los tipos de techo verde que permitan el mayor aprovechamiento de los beneficios hidrológicos. El espacio dado para el diseño se discretiza en un tamaño de malla igual al tamaño de los módulos experimentales (cuadrados de 0,8 m de lado) y el programa ejecuta un algoritmo que selecciona combinaciones aleatorias de los 18 tipos de techos verdes disponibles en el estudio. La herramienta de diseño construye los hidrogramas sintéticos y procede a superponerlos en serie y luego en paralelo, según su ubicación y la orientación de la inclinación de la cubierta. Al hidrograma resultante se le aplican los métodos de cálculo descritos anteriormente, para determinar los valores de los indicadores de comportamiento hidrológico (Cv, Cp y K) y ordenar los resultados del mayor al menor desempeño, para generar las 10 mejores combinaciones, como opciones para el diseñador.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se reportan los resultados obtenidos de los métodos desarrollados

para el cálculo de las variables hidrológicas (respuesta lluvia-escorrentía) y los indicadores del comportamiento hidrológico (Cp, Cv y K); adicionalmente, se presenta el análisis estadístico respecto a la influencia significativa o no de los factores experimentales (altura de sustrato, tipo de planta y pendiente de la cubierta) y el evento de precipitación y sus subfactores (duración, tiempo anterior seco, precipitación e intensidad), respecto a la respuesta lluvia-escorrentía.

Posteriormente, se presentan los resultados de las herramientas de simulación y de diseño, con las cuales se pretende, a partir de información de eventos de precipitación obtenidos por otras fuentes diferentes al montaje experimental, proponer una configuración de techo verde que presente el mejor comportamiento hidrológico en términos de escorrentía superficial.

2.1. Comportamiento hidrológico

Mediante los resultados del monitoreo en continuo y la aplicación de los métodos descritos, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados por evento para el grupo de tratamiento con variación de planta y sustrato

Evento	Tiempo anterior seco	Precipitación	Duración	Intensidad máxima	Intensidad mediana	Volumen total	Cp	Cv	K
	horas	mm	min	mm/h	mm/h	l	adim	adim	min
27/04/2015	58	2,24	152	1,05	0,89	0,09 a 0,33	0,1 a 0,27	0,06 a 0,23	0 a 9,13
15/05/2015	15	3,12	324	0,60	0,58	0,28 a 0,89	0,19 a 0,71	0,14 a 0,45	10,51 a 29,74

Evento	Tiempo anterior seco	Precipitación	Duración	Intensidad máxima	Intensidad mediana	Volumen total	Cp	Cv	K
	horas	mm	min	mm/h	mm/h	l	adim	adim	min
11/06/2015	38	1,49	422	0,27	0,22	0,25 a 0,47	0,18 a 0,36	0,27 a 0,5	42,06 a 121,75
13/06/2015	32	4,87	694	0,45	0,42	0,23 a 1,07	0,09 a 0,22	0,07 a 0,34	0 a 162,05
15/06/2015	49	3,06	156	1,31	1,18	0,19 a 0,35	0,11 a 0,2	0,1 a 0,18	0 a 5,4
21/06/2015	33	5,30	991	0,34	0,32	0,87 a 1,78	0,23 a 0,5	0,26 a 0,52	45,5 a 119,2
14/07/2015	36	1,97	814	0,16	0,14	0,28 a 0,61	0,22 a 0,42	0,22 a 0,48	46,41 a 283,14
16/07/2015	12	3,01	296	0,72	0,61	0,35 a 0,55	0,19 a 0,34	0,18 a 0,29	6,14 a 13,17
18/07/2015	41	1,39	92	1,17	0,90	0,27 a 0,32	0,36 a 0,45	0,3 a 0,36	3,73 a 6,34
20/07/2015	33	1,42	137	0,73	0,63	0,19 a 0,22	0,22 a 0,28	0,2 a 0,24	3,83 a 8,63
27/07/2015	62	0,88	310	0,20	0,17	0,15 a 0,54	0,15 a 1	0,26 a 0,95	36,81 a 116,68
29/07/2015	57	1,82	134	1,02	0,82	0,2 a 0,28	0,2 a 0,28	0,17 a 0,24	10,52 a 45,56
30/07/2015	10	1,51	436	0,23	0,21	0,18 a 0,71	0,11 a 0,42	0,18 a 0,73	0 a 11,7
17/09/2015	115	1,25	72	1,54	1,02	0,55 a 1,25	0,31 a 1	0,69 a 1	10,21 a 34,24
2/10/2015	27	4,05	156	1,94	1,56	0,33 a 0,77	0,15 a 0,24	0,13 a 0,3	1,21 a 42,17
14/10/2015	25	2,15	366	0,65	0,36	0,26 a 0,4	0,22 a 0,33	0,19 a 0,29	0 a 16,71
5/11/2015	97	6,01	674	0,60	0,54	1,51 a 2,35	0,55 a 0,82	0,39 a 0,61	48,95 a 67,65
6/11/2015	10	11,20	226	4,84	2,98	8,07 a 9,38	0,84 a 1	1 a 1	0 a 13,74

Continúa →

Evento	Tiempo anterior seco	Precipitación	Duración	Intensidad máxima	Intensidad mediana	Volumen total	Cp	Cv	K
	horas	mm	min	mm/h	mm/h	l	adim	adim	min
7/11/2015	23	5,32	197	1,80	1,62	2,67 a 4,18	0,52 a 1	0,78 a 1	7,81 a 44,14
19/11/2015	282	7,35	268	2,11	1,64	0,8 a 1,96	0,19 a 0,32	0,17 a 0,42	1,9 a 46,64
20/11/2015	21	4,39	254	1,05	1,04	0,95 a 2,6	0,42 a 0,98	0,34 a 0,93	26,13 a 78,97

Fuente: elaboración propia

2.1.1. Factor 1. Tipo de planta

El tipo de planta es uno de los factores que contienen un valor representativo en los otros beneficios de los techos verdes que, aunque no hacen parte de la presente investigación, vale la pena resaltar, como el paisaje, la absorción de carbono y otros contaminantes del aire, la reducción del efecto de isla de calor y de temperatura en el interior de las edificaciones; además dicha planta promueve el aumento de la biodiversidad local [7], [13].

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis presentados en la Tabla 2 mues-

tran que el factor “planta” tiene una probabilidad cierta (100 %) de ser altamente significativa para los indicadores de Cv y Cp, pero en contraste se tiene una probabilidad nula respecto al K. Se desarrolló una agrupación de las tres variables de respuesta mediante el análisis de componentes principales y se obtuvo que el factor “planta” tiene una probabilidad de 1 (100 %) de ser altamente significativa para el componente principal que representa los tres indicadores del comportamiento hidrológico.

Tabla 2. Probabilidad de los factores “planta”, “sustrato”, “evento” y “pendiente2, de ser altamente significativo en cada indicador del comportamiento hidrológico

Kruskal-Wallis factores experimentales	Planta	Sustrato	Evento	Pendiente*
Cv	1	0	1	0
Cp	1	0,254	1	0,005
K	0	0	1	0
Multivariado (PCA)	1	0,274	1	0,003

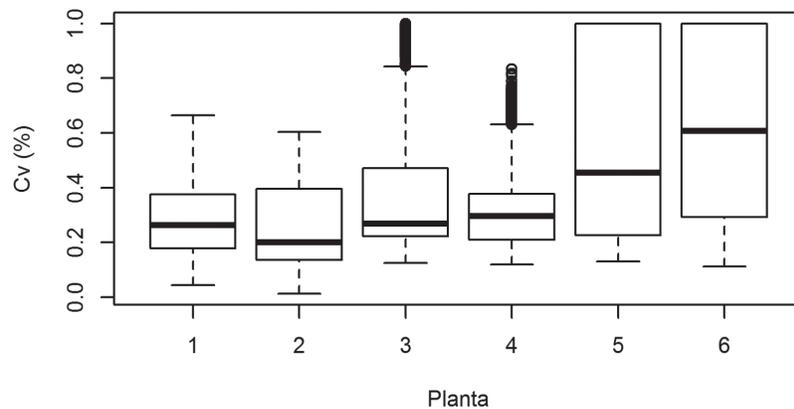
* El factor pendiente se analizó en un grupo de tratamiento experimental aparte.

** Los valores corresponden a la probabilidad de obtener $p\text{-value} < 0.05$

Fuente: elaboración propia.

Con la aplicación de la prueba de Wilcoxon se puede determinar que también se presentan diferencias significativas entre los diferentes tipos de plantas utilizados para la investigación (ver Figs. 5 y 6). Entre los resultados más relevantes, se tienen las mayores probabilidades (superiores a 0,99) de encontrar diferencias entre el Sedum y los pensamientos y el Sedum y las suculentas. También se encontró diferencia entre la le-

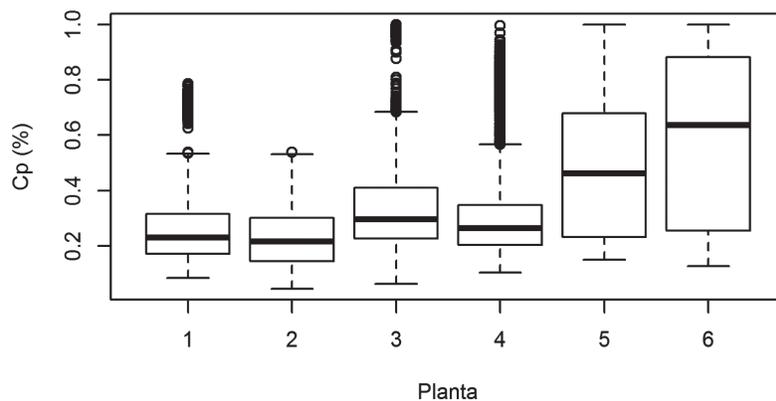
chuga batavia y las suculentas (probabilidad de 0,67 para Cv y 0.99 para Cp). El test no se aplicó para el tiempo de retraso (K), debido a que el factor “planta” no lo influye de forma significativa. Respecto al test de Spearman, se encontró que tienen probabilidad cierta de correlación con el Cv y el Cp, pero su coeficiente *rho* está por debajo del 50 % (0,39 para Cv y 0,42 para Cp).



1) pensamientos; 2) suculentas; 3) recedas; 4) bergenias; 5) lechuga; 6) sedum

Fig. 5. Boxplot del Factor Planta para el Cv

Fuente: elaboración propia.



1) pensamientos; 2) suculentas; 3) recedas; 4) bergenias; 5) lechuga; 6) sedum

Fig. 6. Boxplot del Factor Planta para el Cp

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados anteriores, la Tabla 3 presenta el consolidado de los resultados de los indicadores del comportamiento hidrológico, obtenidos con cada una de las seis plantas seleccionadas para el proyecto, y se relacionan los valores máximo, mediano y mínimo que corresponden al límite superior del

diagrama de caja, segundo cuartil y límite inferior de toda la serie de datos disponible. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, en la Tabla 4 se presenta un consolidado de los tipos de plantas que presentan los mejores y menores desempeños para la atenuación de la escorrentía, por cada indicador hidrológico.

Tabla 3. Resultados consolidados de los valores máximo, mediano y mínimo estadístico para los indicadores de comportamiento hidrológico, respecto a cada tipo de planta

Indicador	Variable	Máximo	Mediana	Mínimo
Cv	Pensamientos	0,67	0,26	0,04
	Suculentas	0,60	0,20	0,01
	Recedas	1,00	0,27	0,12
	Bergenias	0,83	0,30	0,12
	Lechuga	1,00	0,45	0,13
	Sedum	1,00	0,61	0,11
Cp	Pensamientos	0,79	0,23	0,08
	Suculentas	0,54	0,22	0,04
	Recedas	1,00	0,30	0,06
	Bergenias	1,00	0,26	0,10
	Lechuga	1,00	0,46	0,15
	Sedum	1,00	0,64	0,13
K	Pensamientos	186	35	0
	Suculentas	127	17	0
	Recedas	305	12	0
	Bergenias	254	11	0
	Lechuga	97	10	0
	Sedum	78	18	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Tipos de plantas que presentan los mejores y menores desempeños, por tipo de indicador

Indicador hidrológico	Mejor desempeño	Menor desempeño
Cv	Suculentas y pensamientos	Sedum y lechuga batavia
Cp	Suculentas y pensamientos	Sedum y lechuga batavia
K	Pensamientos y sedum	Bergenia y lechuga

Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Factor 2. Altura de sustrato

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis muestran que el factor “altura de sustrato” tiene una probabilidad nula de ser altamente significativa para los indicadores de Cv y K y muy baja para el Cp, de 0.254 (ver Tabla 2). Se desarrolló una agrupación de las tres variables de respuesta mediante el análisis de componentes principales y se obtuvo que este factor tiene una probabilidad de 0,274 de ser altamente significativa para el componente principal que representa los tres indicadores del comportamiento hidrológico. El test de Wilcoxon aplicado para el indicador Cp, muestra que no hay diferencia significativa entre las alturas de sustratos seleccionadas para el proyecto de investigación, excepto entre la altura de sustrato de 10 cm y la de 15 cm, en las que se obtuvo una pequeña probabilidad de 0,126 de presentar dichas diferencias.

2.1.3. Factor 3. Evento

El factor Evento es el que corresponde a las características particulares de cada precipitación monitoreada, es decir, cada evento es único y comprende lo relacionado con otras variables independientes y que no son susceptibles de modificación por parte de un diseñador

de techos verdes, como el tiempo anterior seco, la duración, la precipitación, la intensidad total y la intensidad máxima. Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis muestran que el factor “evento” tiene una probabilidad cierta de ser altamente significativa para los tres indicadores del comportamiento hidrológico, incluyendo la respuesta multivariada correspondiente a la agrupación de los tres señalados mediante el análisis de componentes principales (ver Tabla 2). Con la aplicación de la prueba de Wilcoxon se puede determinar que no se presentan diferencias significativas entre los diferentes eventos monitoreados en la investigación, para ninguno de los tres indicadores (Cv, Cp y K). Respecto al test de Spearman, se obtienen probabilidades ciertas de presentar correlación entre el evento monitoreado y el Cv y Cp, pero nula para el K. En los dos primeros indicadores, la mediana del coeficiente de correlación ρ es igual para los dos casos, con un valor de 0,43.

Para el factor “evento” se realizó el análisis de subfactores considerados de interés para el proyecto como la duración, el tiempo anterior seco, la precipitación, la intensidad total y la intensidad máxima, a los cuales se les aplicaron las pruebas no paramétricas, para sus resultados clasificados en tres grupos: alto, medio y bajo, divididos a partir de

los cuartiles 1 y 3; es decir, que los resultados para estos subfactores que se encuentran por encima del tercer cuartil (75 %) se consideran con clasificación “alto” y se les asigna un valor de 3. El segundo grupo comprende desde el primero hasta el tercer cuartil (inclusive), clasificado como “medio” y con la asignación del valor 2, y al grupo restante, debajo del primer cuartil, le corresponde el valor de uno y la clasificación de “bajo”. En la Tabla 5 se presentan los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para los subfactores del evento, en la que se muestra que

todos los subfactores aportan significativamente en la respuesta de los indicadores del comportamiento hidrológico.

2.1.4. Factor 4. Pendiente de la cubierta

El factor “pendiente” se analizó mediante un grupo de tratamientos aparte de los utilizados para los factores “planta” y “sustrato”, como se describió en la sección 2.1. y sus resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5. Probabilidad de los subfactores del evento, duración, tiempo anterior seco, precipitación, intensidad total y máxima

Kruskal-Wallis subfactores evento	Duración	Tiempo anterior seco	Precipitación	Intensidad del evento	Intensidad máxima
Cv	0,999	1	1	1	1
Cp	0,95	1	1	1	1
K	0,998	1	1	1	1
Multivariado (PCA)	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados de las variables hidrológicas de interés y los indicadores de comportamiento hidrológico, por evento. Tratamiento experimental para la variación de la pendiente

Evento	TA-seco	Prec	Durac	Int. Máx	Int. Med	Vol total	Cp	Cv	K
	horas	mm	min	mm/h	mm/h	l	adim	adim	min
11/03/2016	12	16,48	282	24,59	3,50	8,15 a 15,15	0,29 a 1,00	0,41 a 1,00	0,0 a 37,9
28/03/2016	126,8	5,41	100	6,37	3,26	0,57 a 2,35	0,15 a 0,66	0,13 a 0,67	0,0 a 16,30
1/04/2016	93,6	11,76	58	19,20	11,33	2,25 a 20,57	0,11 a 1,00	0,17 a 1,00	0,0 a 21,6

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de determinar si este factor presenta una alta significancia en la res-

puesta lluvia-escorrentía a través de los indicadores del comportamiento hidrológico,

se emplearon las pruebas no paramétricas tratadas en los factores anteriores. En los resultados de la aplicación de la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo como resultado que el factor “pendiente” no influye de manera significativa en ninguno de los indicadores del comportamiento hidrológico, de manera independiente, ni agrupados y representados en un componente, mediante el análisis de componentes principales (ver Tabla 2). Teniendo como argumento el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis, no se procede a la aplicación de la prueba de Wilcoxon.

2.2. Perspectivas de simulación y diseño

Para la implementación de la herramienta de simulación, se desarrolla un estudio de

caso para un evento de precipitación diferente a los monitoreados por el montaje experimental, a partir de los datos de precipitación registrados por la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá (RMCAB), de la Secretaría Distrital de Ambiente. Para el caso de aplicación, se utilizó el registro del evento de precipitación presentado el 7 de mayo de 2012, el cual se seleccionó arbitrariamente de los años de registro de la estación Sagrado Corazón o MinAmbiente de la RMCAB. Se asume que este evento corresponde a una precipitación de diseño; sin embargo, corresponde al diseñador realizar los cálculos correspondientes a los requerimientos específicos en cada proyecto. El hietograma del evento se presenta en la Fig. 7.

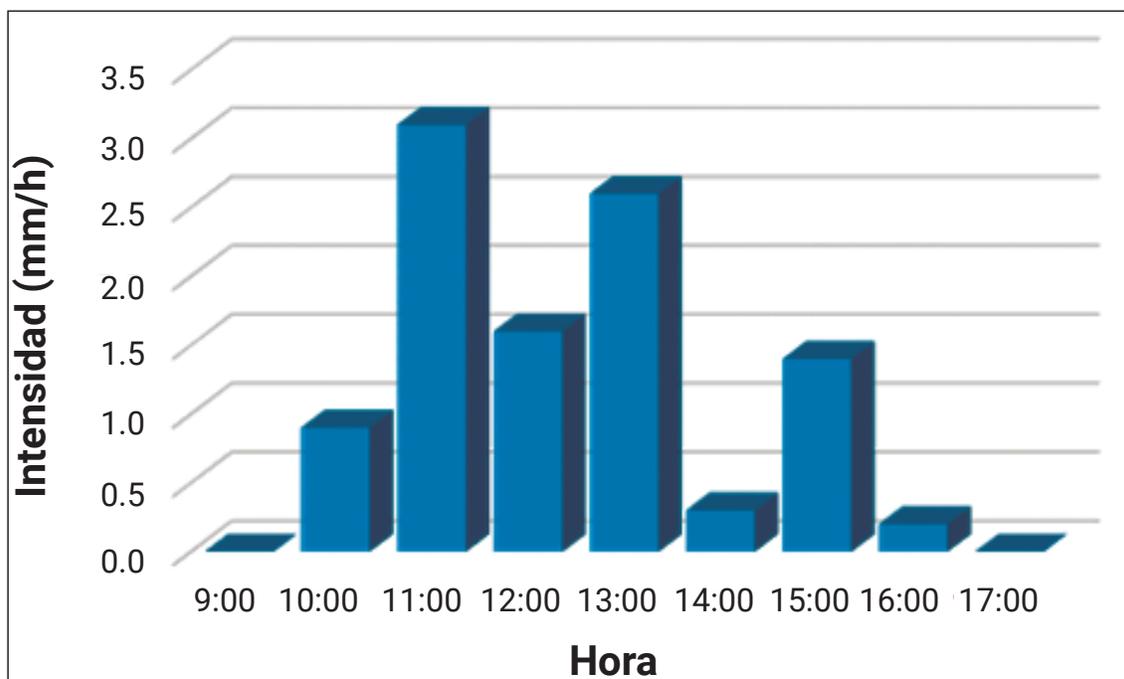


Fig. 7. Hietograma de precipitación del 7 de mayo de 2012

Fuente: elaboración propia, a partir de los datos de la RMCAB.

Con la información de las variables hidrológicas del evento de precipitación seleccionado, se procede a la simulación de las variables hidrológicas de interés y los indicadores del comportamiento hidrológico de cada una de las 18 configuraciones de techo verde estudiadas. A partir de las variables hidrológicas de interés se construyen los hidrogramas sintéticos de cada módulo, para lo cual se modifica la duración de los efectos de precipitación, con el objetivo de mantener el mismo valor del volumen total de escorrentía, como se explicó en el desarrollo del método. Lo anterior debido a que en los resultados mostrados en la calibración del método, el volumen total presenta mejores resultados en la herramienta de simulación.

Para el diseño del techo verde en condiciones reales, se tiene un área de 40 m², con 8 m de largo y 5 m de ancho, y se requiere dividir en dos inclinaciones (a dos aguas) a lo largo. Aplicando el método de discretización, para asimilar el tamaño de los módulos experimentales de forma cuadrada de 0,8 m de lado, se tiene una malla con cinco módulos a lo largo, para cada inclinación y seis módulos a lo ancho. Con el mallado del área definido, se realiza el cálculo del hidrograma resultante o acumulado de los cinco módulos en serie, para cada una de las 1000 combinaciones aleatorias de los 18 tipos de techo verde (ver Fig. 8).

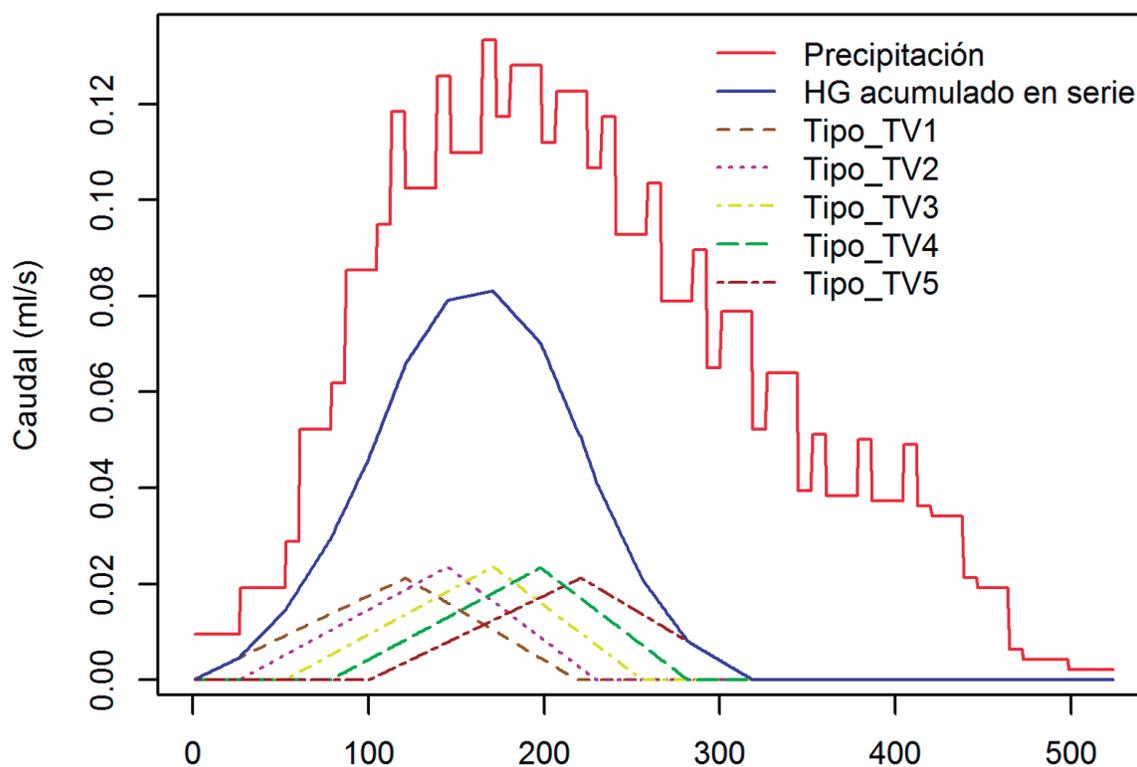


Fig. 8. Hidrograma resultante para una de las configuraciones aleatorias en serie. Caso ejemplo

Fuente: elaboración propia.

Continuando con el caso de aplicación, se utilizó el mejor desempeño respecto al Cv para establecer la mejor combinación de tipos de techos verdes, es decir, que presente la mayor reducción del volumen de escorrentía. Al aplicar el criterio se ordenaron los resultados de las 1000 combinaciones posibles para el arreglo de cinco módulos en serie y se tomaron los 100 primeros (10 %) para ejecutar la si-

guiente actividad. De manera aleatoria, se seleccionan seis combinaciones, de las mejores 100, con las cuales se cubre el enmallado del área de diseño y se aplican los métodos de cálculo para la acumulación de los hidrogramas, y así determinar los indicadores del comportamiento hidrológico (ver hidrograma resultante en la Fig. 9). Esta actividad se repite hasta completar 1000 iteraciones.

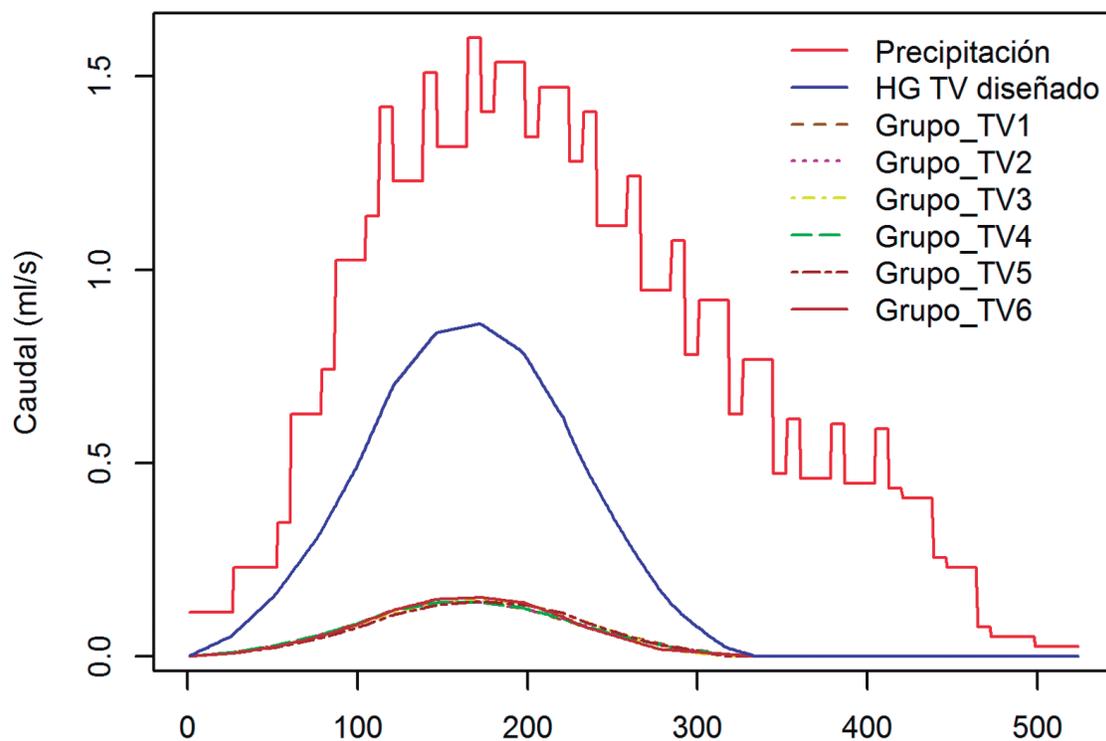


Fig. 9. Hidrograma resultante del techo verde diseñado (mejor combinación). Caso de aplicación

Fuente: elaboración propia.

Mediante la aplicación del criterio de mejor desempeño del Cv, se seleccionan las mejores 10 combinaciones (1 %). Igualmente, los tipos de techo verde, combinación de planta y sustrato, que ocuparon el primer puesto en la selección para ocupar el área de diseño, se exponen en la Fig. 10 y en la

Tabla 7 se relaciona el requerimiento del tipo de techo verde, según el diseño, y el hidrograma resultante se muestra en la Fig. 9. La precipitación se presenta con una mayor magnitud y tiempo de duración, debido a que la herramienta de simulación presentó como resultados del volumen total de esco-

rentía valores entre 2 y 3 veces menores al volumen de precipitación para la misma área, y la duración de los hidrogramas sintéticos se ve afectada por este valor.

Tabla 7. Requerimiento de tipos de techos verdes, según selección. Caso de aplicación

Tipo de techo verde	Tipo de planta	Altura de sustrato	Cantidad requerida
5	Suculentas	10 cm	2
6	Suculentas	15 cm	8
7	Recedas	5 cm	2
9	Recedas	15 cm	12
11	Bergenias	10 cm	2
12	Bergenias	15 cm	20
13	Lechuga	5 cm	2
15	Lechuga	15 cm	8
18	Sedum	15 cm	4

Fuente: elaboración propia.

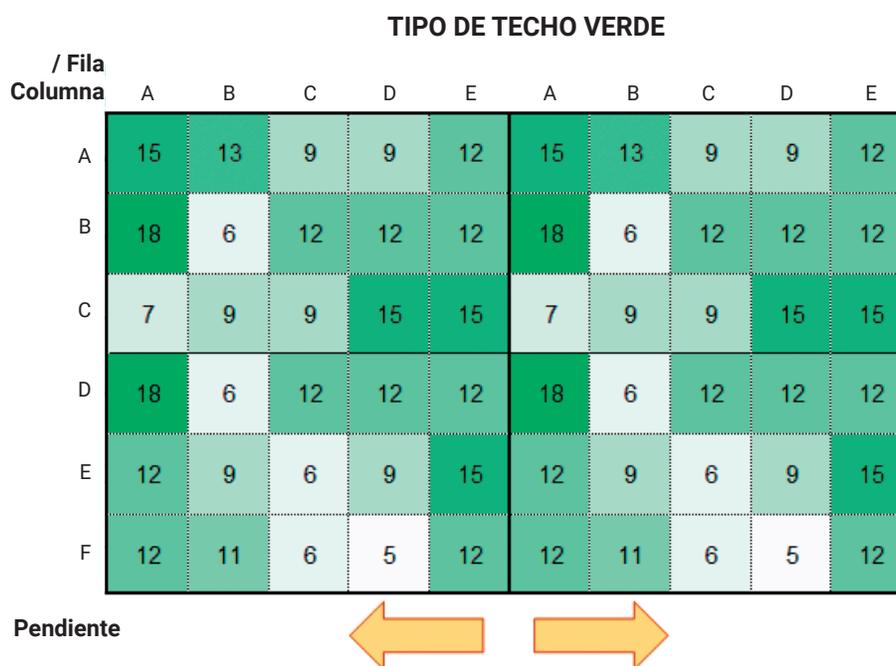


Fig. 10. Tipos de techos verdes seleccionados y su ubicación en el área de diseño

Fuente: elaboración propia.

El caso de aplicación de la herramienta de diseño permite una mejor interpretación de los resultados de la simulación mediante la aplicación de la SVM y su uso para recomendar al diseñador las diez mejores combinaciones de tipos de techos verdes, utilizando como criterio el desempeño de los indicadores del comportamiento hidrológico.

Para el diseño definitivo de los techos verdes también deberían incluirse como criterios la disponibilidad de plantas, los requisitos de riego y el mantenimiento, el peso de la estructura y demás que se consideren pertinentes para asegurar el bienestar de la cobertura vegetal y la capacidad de carga. El componente hidrológico es uno de los beneficios de los techos verdes; por lo tanto, de forma complementaria se podrían contemplar otros criterios como la alteración paisajística, la reducción de los factores de impacto auditivos, de la calidad del aire y térmicos (al interior de las edificaciones), la interacción social, el aumento de la biodiversidad, entre otros.

3. CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objetivo desarrollar una propuesta de mejoramiento tecnológico para la adaptación de los techos verdes al régimen climático tropical andino, en términos de su comportamiento hidrológico, para lo cual se desarrolló un montaje experimental con seis módulos para la instalación de techos verdes extensivos y un módulo testigo (solo cubierta). El montaje experimental permitió la obtención de datos de 21 eventos de precipitación, variando la configuración de los factores experimentales (seis tipos de planta y tres alturas de sustrato) y tres even-

tos más para verificar el efecto de la pendiente como tercer factor. Los datos obtenidos se procesaron para el cálculo de las variables hidrológicas de interés (precipitación, escorrentía, duración del evento, tiempo anterior seco) y para los indicadores del comportamiento hidrológico (coeficientes de escorrentía C_v y C_p y tiempo de retraso K); además, su análisis estadístico permitió identificar cuáles factores experimentales tienen o no influencia significativa en la respuesta lluvia-escorrentía. Finalmente, se desarrolló la simulación de las variables y los indicadores hidrológicos a partir de series de precipitación. Esta simulación se implementó en una herramienta de diseño que soporta la selección de las configuraciones de techos verdes que presenten el mejor comportamiento hidrológico, en términos del C_v , C_p y K .

El análisis de los resultados de las pruebas no paramétricas permite concluir que de los factores experimentales solo el tipo de planta presentó una probabilidad de ser significativa para los coeficientes de escorrentía, en las que se destacan las suculentas (*Sedum pachyphyllum*) y los pensamientos (*Viola x wittrockiana*) con un mejor desempeño en la reducción del volumen de escorrentía y la atenuación del caudal pico, y con los resultados más bajos están la lechuga batavia (*Lactuca sativa*) y la mixtura de sedum. Lo anterior ratifica las conclusiones obtenidas por [6].

Este resultado demuestra que la selección de la planta no es únicamente interesante desde el punto de vista paisajístico, sino que puede ser clave desde una perspectiva ingenieril como factor de diseño, puesto que la atenuación de volúmenes y caudales pico

en la escorrentía puede contribuir a mitigar amenazas de inundación o racionalizar la infraestructura de drenaje urbano en ciudades de clima tropical andino. A la luz de esta conclusión, y debido al número reducido de plantas ensayadas en el presente estudio, se recomienda ampliar la experimentación a un mayor número de plantas que podrían utilizarse en techos verdes. Adicionalmente, es interesante: 1) probar diferentes configuraciones mezclando variadas especies de plantas en las unidades experimentales; 2) tener en cuenta diversas etapas de crecimiento de las diferentes especies en el desempeño hidrológico; 3) tener en cuenta múltiples tipos de manejo de la vegetación en cuanto a siembra, poda, riego, etc., en relación con intereses arquitectónicos y biológicos.

En cuanto a la altura del sustrato, se presenta una probabilidad de influencia de más del 25 % de influir en el resultado de C_p y nula para C_v . En lo que respecta a C_p , es importante destacar que, a través de la inclusión del método numérico de propagación de incertidumbre a los análisis estadísticos no paramétricos, fue posible encontrar que sí existen probabilidades no insignificantes de influir en dicho resultado, lo cual no habría sido posible si se hubiese dado un valor único. Este resultado demuestra que la altura de sustrato no solamente puede tomarse como soporte vital para las plantas en los techos verdes, sino que también sería importante para la atenuación de caudales pico de escorrentía. Es decir, que más allá de fijar una altura de sustrato apropiada para soportar especies de plantas en techos verdes, el diseñador podría modificar dicha altura con el propósito de reducir caudales pico de escorrentía.

A pesar de que esta práctica hoy en día no se realiza, la selección de la altura de sustrato para techos verdes instalados a escala de barrio o ciudad podría ayudar a mitigar inundaciones o a racionalizar los requerimientos de infraestructura para drenar aguas lluvias de escorrentía en ciudades. Por consiguiente, lo anterior representa un beneficio económico no despreciable a nivel de ciudad. Se recomienda, entonces, continuar investigando, con el propósito de tener valores de diseño de alturas de sustrato a escala de ciudad.

En el caso de la pendiente, los resultados obtenidos indican que esta no es determinante en el comportamiento hidrológico de los techos verdes ensayados, lo cual difiere de las conclusiones de [24]. Parece entonces interesante desarrollar proyectos de investigación orientados a analizar el efecto de la pendiente con un mayor número de bloques experimentales y su relación con factores climáticos propios.

El tiempo de retraso (K) como indicador hidrológico independiente no se vio influenciado de manera significativa por ninguno de los tres factores considerados (tipo de planta, altura de sustrato, pendiente). Sin embargo, mediante un análisis de componentes principales (PCA) para los tres indicadores (C_p , C_v y K), tomando los dos primeros componentes que explican más del 80 % de la varianza, se presentan altas probabilidades (100 %) de ser influidos por el factor planta y otras no insignificantes (más de 27 %) de ser influidos por el factor sustrato. Este resultado indica que, al analizar en conjunto la respuesta lluvia-escorrentía, la inclusión del indicador K no disminuye las probabilidades de que la planta ni la altura del sustrato influ-

yan en el comportamiento hidrológico. Con esta interpretación se deja una puerta abierta para continuar incluyendo este indicador en futuras investigaciones.

La herramienta de simulación basada en máquinas de soporte vectorial (SVM), calibradas y validadas con los datos experimentales, presentan en el proceso de validación métricas de ajuste de los modelos promotoras para su aplicación en hidrología, con coeficientes r (entre las variables respuesta predichas con SVM y observadas) superiores a 0,93 para la duración del evento, centroide del hidrograma, caudal pico y volumen total (este último con el mejor desempeño, $r=0,98$) y aceptables para las demás variables de respuesta, con coeficientes r entre a 0,60 y 0,88.

Como se describió anteriormente, es posible alterar el comportamiento hidrológico de los techos verdes extensivos a partir de los factores de diseño como el tipo de planta y la altura del sustrato, lo cual permite la intervención de la ingeniería en el diseño de desarrollos de bajo impacto (LID), aprovechando los beneficios de los techos verdes. Por lo anterior, se desarrolló una herramienta de diseño que discretiza el espacio disponible en una malla del tamaño de los módulos experimentales (cuadrados de 0,8 m de lado) y selecciona de manera aleatoria 1000 diferentes combinaciones de tipos de techos verdes (combinación de los factores tipo de planta y altura de sustrato, en cada subárea del enmallado) para ser potencialmente instalados. La herramienta da como resultado las 10 mejores combinaciones de planta y sustrato, utilizando los indicadores hidrológicos como criterios de priorización.

Esta herramienta fue posible mediante la simplificación de la forma del hidrograma simulado para cada tipo de techo verde, pero manteniendo sus valores de caudal pico, tiempo al pico y volumen total.

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos durante el presente trabajo, se recomienda lo siguiente: 1) a las entidades competentes de la gestión del recurso hídrico urbano continuar el desarrollo de políticas o programas orientados a la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, especialmente de los techos verdes, como una herramienta que permita la reducción de la escorrentía superficial y contribuya a la renaturalización del ciclo del agua en áreas densamente urbanizadas y a la gestión de riesgos por inundación; 2) a la ingeniería colombiana, desarrollar herramientas de diseño específicas para sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) (como los techos verdes) y específicas para nuestros climas, que permitan considerar variables que potencien los beneficios hidrológicos.

AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Javeriana por permitir el uso de sus instalaciones y el desarrollo del montaje experimental, con el cual fue posible la adquisición de datos para la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría Distrital de Ambiente. *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS para el Plan de Ordenamiento*

- Zonal Norte POZN. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente, 2011.
- [2] J. Rodríguez Bayón, D. Castro Fresno, J. Rodríguez Hernández y F. Ballester Muñoz, "Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)," *Interciencia. Revista de ciencia y tecnología de América*, vol. 30, no. 5, pp. 255-260, 2005.
- [3] T. D. Fletcher, W. Shuster, W. F. Hunt, R. Ashley *et al.* "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," *Urban Water Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 525-542, 2014.
- [4] Q. Zhang, L. Miao, X. Wang, D. Liu *et al.*, "The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution," *Landscape and Urban Planning*, vol. 144, pp. 142-150, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>
- [5] W. C. Li y K. K. A. Yeung, "A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 3, no. 1, pp. 127-134, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001>
- [6] S. Galarza-Molina, A. Torres, P. Rengifo, A. Puentes *et al.*, "The benefits of an eco-productive green roof in Bogota, Colombi," *Indoor and Built Environment*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X16665896>
- [7] K. Vijayaraghavan, "Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 740-752, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- [8] M. Razzaghmanesh, S. Beecham y C. J. Brien, "Developing resilient green roofs in a dry climate," *Science of The Total Environment*, vol. 490, pp. 579-589, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.040>
- [9] Y. Li y R. W. Babcock, "Green roof hydrologic performance and modeling: a review," *Water Science & Technology*, vol. 69, no. 4, pp. 727-738, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2013.770>
- [10] E. Vanuytrecht, C. Van Mechelen, K. Van Meerbeek, P. Willems *et al.*, "Run-off and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios," *Landscape and Urban Planning*, vol. 122, pp. 68-77, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.001>
- [11] J. Yang y Z.-H. Wang, "Physical Parameterization and Sensitivity of Urban Hydrological Models: Application to Green Roof Systems," *Building and Environment*, vol. 75, pp. 250-273, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.006>
- [12] C. Lamera, G. Becciu, M. C. Rulli y R. Rosso, "Green roofs effects on the urban water cycle components," *Procedia Engineering*, vol. 70, pp. 988-997, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.110>
- [13] C. Berretta, S. Poë y V. Stovin, "Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence

- of vegetation and substrate characteristics," *Journal of Hydrology*, vol. 511, pp. 374-386, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.036>
- [14] IDEAM, *El medio ambiente en Colombia*, (2nd ed.), Cap. 3: La atmósfera, el tiempo y el clima. Bogotá: IDEAM, 2001.
- [15] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], "Atlas Climatológico de Colombia," *Ideam*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- [16] A. Puentes Suavita, "Techos verdes utilizados como elementos de regulación de la escorrentía en Bogotá," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2014.
- [17] A. E. Torres-Abello, "Metodología para la Estimación de Incertidumbres Asociadas a Concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales Mediante Métodos de Generación Aleatoria," *Tecnológicas*, no. 26, pp. 181-200, 2011. DOI: <https://doi.org/10.22430/22565337.64>
- [18] W. S. Cleveland, "Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, no. 368, pp. 829-836, 1979.
- [19] M. C. Mariani y K. Basu, "Local regression type methods applied to the study of geophysics and high frequency financial data," *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 410, pp. 609-622, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.05.070>
- [20] L. Plazas-Nossa, "Forecasting of UV-VIS spectrometry time series for online water quality monitoring in operating urban sewer systems," Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2016.
- [21] N. S. Raghavendra y P. C. Deka, "Support vector machine applications in the field of hydrology: A review," *Applied Soft Computing*, vol. 19, pp. 372-386, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.02.002>
- [22] F. Granata, R. Gargano y G. de Marinis, "Support Vector Regression for Rainfall-Runoff Modeling in Urban Drainage: A Comparison with the EPA's Storm Water Management Model," *Water*, vol. 8, no. 3, pp. 69, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8030069>
- [23] R Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. En URL <https://www.r-project.org/>.
- [24] E. L. Villarreal y L. Bengtsson, "Response of a Sedum green-roof to individual rain events," *Ecological Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1-7, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008>