



Simulación del desempeño hidrológico de techos verdes mediante el uso del software EPA SWMM

José Duván Ordoñez Satizabal
Gloria Lucía Cárdenas Calvachi¹

Resumen

Esta investigación está relacionada con el estudio del comportamiento de cubiertas verdes en eventos de escorrentía a partir de una simulación mediante el software EPA SWMM. El estudio tiene en cuenta variables de construcción y variables hidrometeorológicas; principalmente, se realiza un análisis del comportamiento de la precipitación; se enfoca en la necesidad de implementar módulos de techo verde en la ciudad de Pasto, Nariño, para la prevención de inundaciones, además de los beneficios ambientales que puede producir la implementación de este tipo de tecnología. Se aplicó la metodología AHP, para la selección de una alternativa adecuada para elegir un modelo adecuado para cubiertas verdes. Los datos hidrometeorológicos son descargados del sistema DHIME del IDEAM, para simular un evento de lluvia en la ciudad, durante el mes de noviembre de 2019. Se realizó un análisis de sensibilidad en las variables del módulo de techo verde y, finalmente, la simulación de escorrentía a partir de la información de estudios posteriores.

Palabras clave: techos verdes; precipitación; simulación; escorrentía.

Introducción

Actualmente, el mundo se encuentra en una etapa de cambio, debido a las consecuencias del cambio climático; por ende, se ha venido realizando investigaciones en este último lustro, las cuales requieren un compromiso a nivel gubernamental para su aplicación.

El estudio actual representa un posible escenario del comportamiento de un módulo de techo verde a partir de una fuerte precipitación y, el desempeño que puede mostrar, teniendo en cuenta factores hidrometeorológicos y diferentes variables del sustrato geotextil y otros parámetros simulados con el modelo SWMM, para analizar la escorrentía urbana y el posible uso de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la ciudad de Pasto.

¹ Universidad Mariana, Colombia.

Metodología

La investigación fue realizada con datos de la ciudad de Pasto, datos hidrometeorológicos como precipitación, evaporación y temperatura; para la selección del primer objetivo se aplicó la metodología Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), desarrollada por Thomas L. Saaty (Nantes, 2019) en el año 1980, para poder resolver el proceso de selección del modelo que se aplicó en techos verdes y sus alternativas a partir de diferentes criterios subjetivos.

Este tipo de metodología es fundamental para la toma de decisiones a partir del uso de la medición de criterios con un análisis cuantitativo y cualitativo, mediante una síntesis, el cual termina con la construcción de una matriz basada en los criterios, con la finalidad de obtener una comparación a partir de una escala de valores que varían de 1 a 5, en la cual 1 es la de menor importancia y 5, la de mayor importancia; los valores 2, 3, 4 son considerados como valores intermedios.

Para la calibración del modelo SWMM, se inicia con la descarga de los datos hidrometeorológicos del IDEAM en el periodo del mes de noviembre de 2019, fecha en la cual hubo inundaciones e inconvenientes por el desbordamiento de la quebrada Mijitayo, que ocasionó escorrentía en la ciudad, provocando inundaciones en algunos barrios. La descarga de datos hidrometeorológicos se realizó en su aplicativo Dhime, para la identificación de la información de la zona con parámetros tales como precipitación, evaporación y temperatura.

Por último, a partir de los datos calibrados y validados para el modelo, se realizó la simulación, obteniendo resultados de los datos de salida de la escorrentía en el modelo y verificando el comportamiento de los techos verdes en este evento de precipitación.

Resultados

Bondades del software SWMM aplicado para techos verdes frente a otros modelos

En la Tabla 1 se presenta los resultados obtenidos a partir de la realización de la metodología AHP en el que se comparó los modelos a partir de una revisión bibliográfica y las conclusiones de los autores para su calificación.

Tabla 1

Matriz normalizada de Análisis Jerárquico de los modelos

Criterios de evaluación	Datos de Entrada	Atributos	Importe de información	Económico	Datos de salida	TOTAL Vector Prioridad
SWAM	0,328	0,13	0,22	0,2	0,25	0,245
SWMM	0,453	0,61	0,49	0,4	0,59	0,505
HYDRUS 1D	0,219	0,26	0,29	0,4	0,16	0,250
PONDERADO	0,293	0,13	0,16	0,16	0,25	

La mejor alternativa a partir del análisis realizado fue el software SWMM, debido a que, para este estudio tenía una factibilidad más alta por su fácil manejo e implementación; no presenta costos de licencia y permite exportar datos. En este caso, el modelo SWMM resulta la herramienta que mejor se ajusta a los techos verdes, para aplicar con un valor ponderado de 0,505. Cabe resaltar que, las otras dos alternativas también podrían ser usadas en un estudio, si se considera otros criterios de evaluación para su selección o la información que pueda ser requerida.

Calibración del modelo

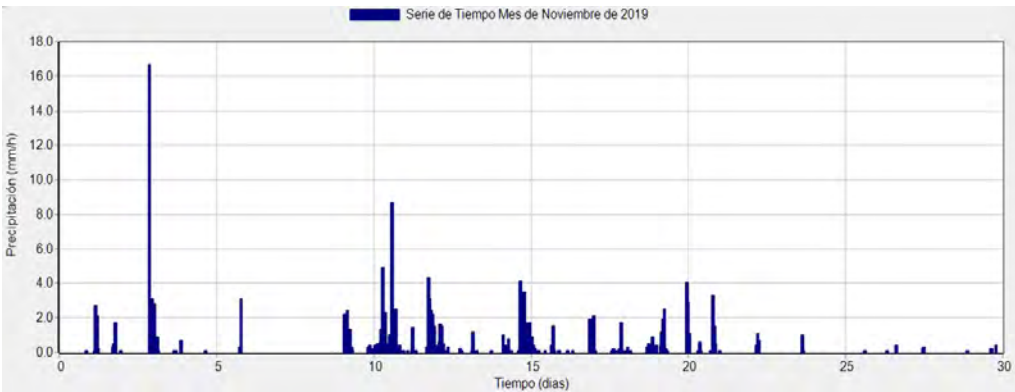
El sistema modular depende de varios parámetros que se involucran dentro del sistema, como la inclinación, tipo de planta, sustrato, capa de drenaje y los diferentes instrumentos o configuraciones de medición de escorrentía, humedad y temperatura.

Los resultados de las variables hidrometeorológicas fueron representados mediante el programa EPA SWMM 5.1, el cual permite realizar la gráfica.

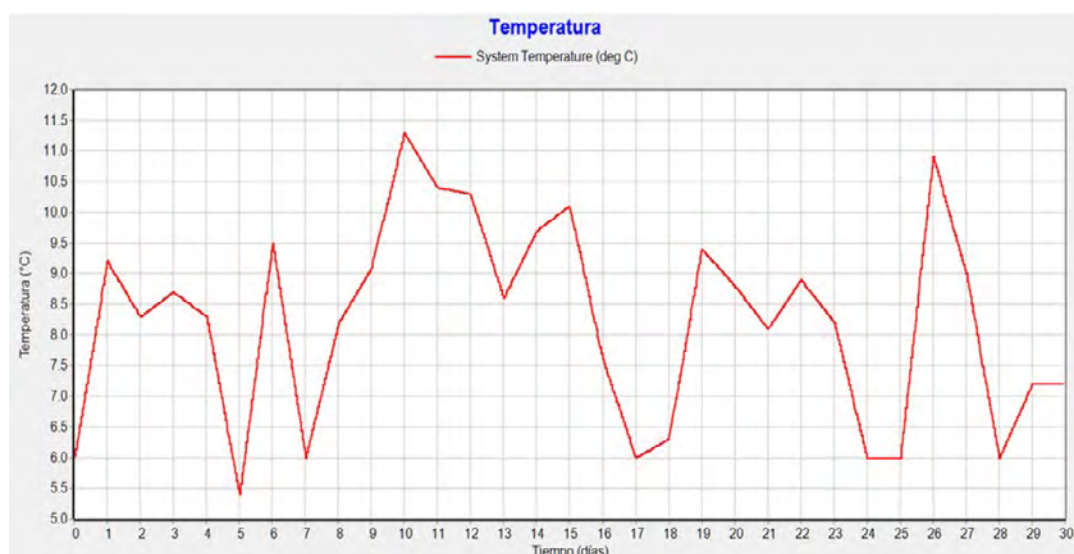
Se tomó los datos de precipitación horaria de la estación Universidad de Nariño durante el mes de noviembre de 2019, en cuya serie de tiempo se presentó un valor atípico el día 3 de noviembre de 2019 a las 20:00 en horas de la noche, lo cual generó un desbordamiento en la quebrada Mijitayo (Ver Figura 1).

Figura 1

Precipitación del mes de noviembre de 2019



La serie de tiempo de temperatura presenta valores diarios; estos fueron proporcionados por la estación Universidad de Nariño; se puede observar que, los datos tienen un comportamiento similar a los datos de evaporación.

Figura 2*Temperatura del mes de noviembre de 2019*

Módulo de techo verde

Para la simulación del módulo de techo verde, inicialmente, se hizo uso de los datos provenientes del estudio de Pérez (2015), en el que presenta la descripción del módulo que consta de un geotextil no tejido (*sedum sexangulare*, *acre reflexum* y *kamtschaticum*), proveniente de un montaje experimental perteneciente al proyecto, también compuesto de una capa de drenaje con la que la autora evaluó el efecto de la vegetación respecto al comportamiento del agua dentro del sistema, analizando el sustrato y la capa de drenaje, con diferentes restricciones para la medición de la escorrentía.

La medición de este evento en el módulo de techo verde permite revisar diferentes variables climatológicas como la temperatura ambiente, precipitación y evaporación, dado que son las únicas variables presentadas en estudios efectuados por el IDEAM, con sus valores respectivos de fecha del mes de noviembre de 2019 y, al mismo tiempo, son las variables que fueron registradas precisamente dentro del modelo.

El techo verde integra la lista de las herramientas de desarrollo de bajo impacto; sus siglas en inglés son LOD, debido a: *Low Impact Development*; es decir, este tipo de tecnología es implementado con el fin de capturar la escorrentía superficial a partir de la detención, infiltración y evapotranspiración, como también, porque es considerado como una propiedad de las subcuencas (Rossman, 2015).

Para este caso, se establece un SUDS y un modelo LOD a partir del uso de techos verdes; el territorio se planifica para este uso en las viviendas del sector, para el manejo de la escorrentía, debido a las altas precipitaciones y la vulnerabilidad que vive el área de la zona que se encuentra junto a la cuenca Mijitayo, en el que ya ha habido varios eventos de inundación en diferentes barrios cercanos, lo cual representó fuertes pérdidas económicas para los pobladores en el año 2019, debido al evento climático y, que posee un tiempo de retorno de dos años a partir de las curvas de intensidad, duración, frecuencia (IDF) presentadas por el IDEAM para la estación de Obonuco en el aplicativo Dhime.



Recolección de datos de parámetros del módulo de techo verde

Para este proceso se tuvo en cuenta diferentes propiedades como área, ancho, pendiente, porcentaje de impermeabilización, rugosidad y, almacenamiento permeable, con lo cual las características esenciales están determinadas por el estudio realizado por Pérez (2015).

En la Tabla 2 se evidencia los datos de parámetros del módulo *LID* de techos verdes, todo con la importancia de efectuar la simulación del modelo a partir de diferentes datos proporcionados por información secundaria y, observando las indicaciones de otros autores (Tabares et al., 2019; y Baek et al., 2020).

Tabla 2

Propiedades módulo de techo verde extensivo (Pérez, 2015)

Parámetro	Representación	Valor
Densidad aparente	$P_d(\text{kg/m}^3)$	421
Porosidad	$n(\text{m}^3/\text{m}^3)$	0,42
Punto de marchitamiento	ϑ_{pmp}	0,12
Capacidad de campo	ϑ_{cc}	0,32
Conductividad hidráulica saturada	$K_{sat}(\text{mm/h})$	95,46

Los datos presentados en la Tabla 2 se basan en la capa vegetativa y el sustrato, a partir de diferentes respuestas de estos parámetros y el comportamiento hidráulico de este techo verde extensivo.

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad es un proceso por el cual se debe tener en cuenta diferentes variables que son importantes para la interpretación de los resultados; consiste en realizar una variación en cada uno de los componentes del módulo de techo verde con el cual se realizará la modelación. Inicialmente, este proceso complementa la calibración y se analiza el comportamiento de cada variable y, para ello, mediante consulta bibliográfica, se considera los rangos establecidos para el análisis de sensibilidad, como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3

Rangos de datos para variables de techos verdes recomendados por (EPA, 2018) p. 245-248

VARIABLE	RANGO
Fracción de vegetación	0,10- 0,20
Rugosidad de la superficie	0,15 - 0,45
Pendiente de conductividad	30-60
Cabeza de succión (mm)	44,20-1080
Fracción de vacío (-)	0,50-0,60

Rugosidad de la Capa (μm)

0,10- 0,40

Inicialmente, el modelo se ajustó a diferentes variables y unidades que pueden representar la realidad; posteriormente, se añadió la serie de tiempo del día 3 de noviembre de 2019; en este caso, se identificó varios datos secundarios y se adaptó el modelo de infiltración GREEN AMPT para analizar la superficie de suelo mojado; este generó el comportamiento del suelo a partir de recibir humedad en la parte de arriba y abajo; por esta razón, se adjuntó diferentes parámetros, como la conductividad y el déficit de humedad; para este se tuvo en cuenta factores como la precipitación, evaporación, infiltración y escorrentía, para entender de manera más precisa lo que sucede internamente en el módulo LID de techo verde (Rossman, 2015).

Los parámetros fueron establecidos a partir del modelo determinístico, realizando un proceso de cambio de variable a la vez y, haciendo una fijación de algunos valores promedios, para lo cual, finalmente se realiza una calibración por prueba y error. A partir de la modificación, se toma los valores más aproximados al modelo para la validación de resultados y, se determina el coeficiente de correlación y la eficiencia de Nash Sutcliffe para los datos observados vs. datos simulados.

Este criterio es uno de los más usados en el área hidrología, debido que este método permite realizar mediciones de cómo varían las observaciones a partir de la simulación. Cuando la simulación es perfecta, la eficiencia será igual a 1; si se hace las observaciones a partir del valor promedio, de esa manera la eficiencia es igual a cero.

Representación por medio del modelo SWMM de las dinámicas hidrológicas de techos verdes bajo eventos de lluvia

Los parámetros fueron calibrados manualmente, a partir de la realización de ensayo y error, para determinar la validación del modelo de los datos observados y simulados. En la Tabla 4 se puede apreciar las variables y datos en un análisis de eficiencia desde el uso de la calculadora estadística desarrollada por Shrestha (2016), para establecer, por medio del índice de eficiencia Nash Sutcliffe, la capacidad de cada variable.

Tabla 4

Análisis de sensibilidad y calibración de las variables

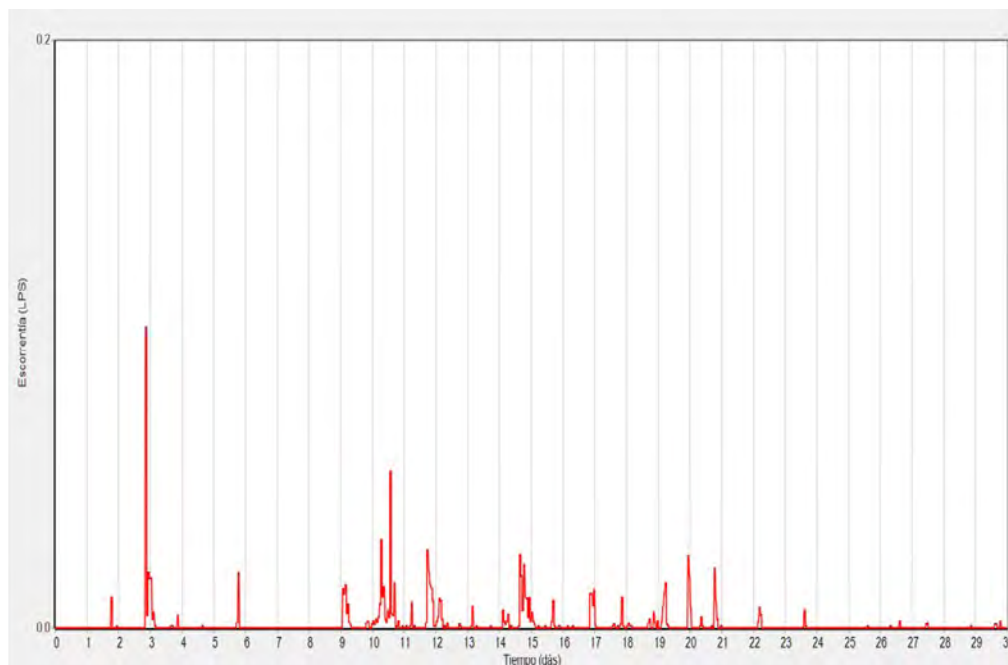
Variable	Eficiencia de Nash Sutcliffe	Sensibilidad	Valor de Calibración
Vegetación	0	Baja	0,15
Rugosidad	0,02	Baja	0,25
Pendiente de conductividad	0,5	Media-Baja	10
Cabeza de succión	0	Baja	562,10
Fracción de vacío	0,7	Alta	0,55
Rugosidad de la capa de drenaje	0.6	Media-Alta	0,20



Los datos que fueron ajustados a los valores promedios presentaron una baja sensibilidad, debido a que algunos de los parámetros ya estaban calibrados y validados por el estudio de información secundaria (Pérez, 2015). Estos resultados ostentaron un error de continuidad de 0 %, como se presenta en la Figura 3:

Figura 3

Resultados de escorrentía en la simulación



Para terminar, el modelo generó escorrentía respecto a la precipitación, pero el módulo LID, en este caso un techo verde extensivo, fue tan bueno, que no presentó escorrentía; además, en el momento de correr el modelo SWMM 5.1, el error de continuidad y el flujo de enrutamiento tuvieron valores de 0 %, lo cual es primordial para simular el evento por medio del modelo. La escorrentía fue proporcional a la precipitación, con un valor de 0,1 L/s; es decir, no se generó altos valores debido a la alta eficiencia del techo verde extensivo.

El programa de modelación SWMM 5.1 representó diferentes ventajas en los aspectos de modelación hidrológica en la que los datos fueron tomados de autores que habían desarrollado investigaciones en la ciudad de Bogotá, Colombia, como Pérez (2015). Para la toma de datos, esta autora implementó un sistema capaz de analizar la capacidad de almacenamiento y evacuación de los techos verdes, teniendo en cuenta variables como: la precipitación, evaporación, temperatura y escorrentía.

Importancia de los sistemas urbanos de drenaje sostenible y desarrollos de bajo impacto para la planificación de la gestión urbana

Los SUDS y los controles LOD, como los techos verdes, son herramientas importantes y necesarias para la implementación de ciudades sostenibles y sustentables; este tipo de tecnología presenta particularidades y bondades que benefician ambientalmente nuestros entornos y que, también, pueden servir como herramienta de planificación urbana para el mejoramiento de las ciudades, razón por la cual los autores la recomiendan y, a partir de la simulación realizada, se determina que es un modelo que puede prevenir la



escorrentía urbana, con la finalidad de mejorar las condiciones de vida a nivel económico, social, ambiental y cultural.

Conclusiones

El modelo EPA SWMM es la mejor alternativa para desarrollar un modelo de techos verdes para reproducir escorrentía y evaluar sus beneficios a partir de criterios que cumplan con valores económicos y su fácil manejo y capacidad de exportar datos a otros softwares, su fácil acceso, además de las variables que se puede analizar y aplicar respecto a los otros modelos.

La escala de valores multicriterio, como metodología de selección, hace aportes relevantes para determinar y comparar el modelo adecuado, en situaciones de difícil decisión. Los techos verdes son una excelente alternativa para prevenir inundaciones, dada su capacidad de retención de escorrentía, lo cual lo convierte en una fuente y alternativa muy importante para la gestión de aguas lluvias en cuanto a planificación en las ciudades; las cualidades de este tipo de tecnología pueden variar, dependiendo del tipo de sustrato, capa vegetativa y capa de drenaje con la que fue construida; es necesario verificar cada aspecto de construcción e implementación, para que exista un mejor desempeño.

El proceso de calibración para módulo de techo verde permite mejorar las condiciones de los parámetros para la validación de los resultados. A partir de los ajustes y variables observadas se determinó que, los valores obtenidos en la plataforma del IDEAM para la ciudad de Pasto, no generó escorrentía debido a la alta presencia de vegetación que contenía el techo verde, ya que este tiene una capacidad de retención muy alta; además, la observación le da a relevancia como una herramienta ineludible en zonas urbanas.

Referencias

- Baek, S., Ligaray, M., Pachepsky, Y., Chun, J. A., Yoon, K. S., Park, Y., & Cho, K. H. (2020). Assessment of a green roof practice using the coupled SWMM and HYDRUS models. *Journal of Environmental Management*, 261, 109920. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109920>
- Nantes, E. A. (2019). El método *Analytic Hierarchy Process* para la toma de decisiones. Repaso de la metodología y aplicaciones. *Investigación Operativa*, 27(46), 54-73.
- Pérez, J. A. (2015). *Desarrollo de una herramienta de apoyo para el diseño de pavimentos porosos* [Tesis de Pregrado, Universidad de Los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/18612/u722418.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rossman, L. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency (EPA).
- Shrestha, P. K. (2016). *Statistic calculator for the evaluation of the hydrological model*. https://www.researchgate.net/publication/299618526_Statistics_Calculator_for_Evaluation_of_Hydrological_Model
- Tabares, J., Gallo, L. M. y Mancipe-Muñoz, N. A. (2019). Modelación del desempeño hidrológico de techos verdes en ciudades andinas usando SWMM. *Producción + Limpia*, 14(1), 46-60. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a2>