



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentales", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

Evaluation of the impact of a green roof on urban runoff using a scale model

Nelson Andres Lopez Machado^{1*} , Wilmer José Barreto Cordero^{2,3} , Enmanuel David Rodriguez Alvarado³  y Jose Rafael Romero Cabrera³ 

¹Universidad Politécnica Salesiana, Avenida Morán Valverde y Rumichaca, PB EC170105, Quito, Ecuador

²Departamento de Geología y Obras Civiles, Fac.de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Temuco, 4780000, Chile.

³Departamento de Hidráulica, Decanato de Ing. Civil, Universidad Lisandro Alvarado, Barquisimeto, 3001, Venezuela

*Autor de Contacto: nlopez@ups.edu.ec

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2020a04>

Recepción: 31/10/2019 | Aceptación: 21/01/2020 | Publicación: 01/03/2020

Abstract

This research paper shows an experimental and exploratory study of a scaled green roof model. The work estimates the runoff damping due to the application of a sustainable urban drainage system, such as green roofs, in residential house buildings in tropical areas. The study is based on the construction of two physical models of one (1) m² each. They were subjected to a three extreme precipitation events for three different return periods (5, 10 and 25 years). Three roof slopes were used in the experiment (5%, 10%, and 12%) under a hydrological previous condition at field capacity. To recreate the intensity of the rain a simulator was built using a pumping system and spray diffusers. Drain holes were used in the ceilings for volume measurements, located on each side of the roof. Peak flows rates and the runoff hydrographs were calculated. It was demonstrated that the use of green roofs can reduce the maximum flow rates around 16%, even when the soil matrix is saturated.

Keywords: Green roofs; runoff, hydrographs; peak flow.

Evaluación del impacto de un techo verde sobre la escorrentía urbana usando un modelo a escala

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra un estudio experimental y exploratorio de un modelo de techo verde a escala. Esto con el fin de estimar los parámetros para la disminución de la escorrentía en áreas tropicales y su correspondiente aplicación en sistemas de drenaje urbano sostenible, como los son los techos verdes en edificios para uso residencial. El estudio se basó en la construcción de dos modelos físicos de un (1) m² cada uno, que luego de su preparación fueron sometidos a diferentes eventos de precipitación definidos para tres periodos de retorno (5, 10 y 25 años), tres pendientes de techos (5%, 10% y 12%) y una condición de humedad antecedente a capacidad de campo. Para recrear la intensidad de la lluvia se construyó un simulador, utilizando un sistema de bombeo y aspersores. Se utilizaron orificios de salida en los techos para las mediciones de volumen, ubicados a cada lado del mismo. Se calcularon las tasas de flujo máximo para cada modelo y los hidrogramas de escorrentía. Se demostró que a través del uso de estos techos verdes es posible una reducción en las tasas de flujo máximas en un 16%, incluso cuando la matriz del suelo está saturada.

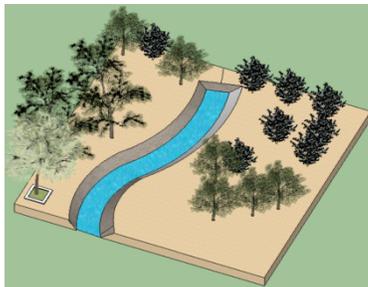
Palabras clave: techos verdes; escorrentía, hidrogramas; flujo máximo.

Introducción

Los procesos en el ciclo del agua (evaporación, escorrentía, precipitación e infiltración) tienen un equilibrio delicado, y es debido a estos procesos que toma mucho tiempo el transitar la escorrentía en estos canales naturales; Si se reduce el proceso de infiltración, la escorrentía será mucho mayor y los canales naturales ya no podrán conducir el nuevo flujo máximo.

Con la impermeabilización del suelo -efecto representativo del desarrollo urbano-, se reduce la infiltración y por consiguiente, aumenta la escorrentía superficial. En términos hidrológicos, con la impermeabilización del suelo no solo se incrementa el volumen de la escorrentía, sino que, además, se modifica sustancialmente el hidrograma de tormenta al redistribuirse el flujo de agua procedente de la lluvia [1].

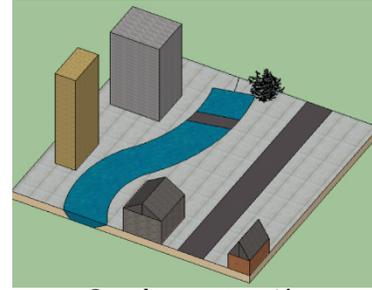
El cambio en el uso del suelo debido a la urbanización tiene un impacto negativo en la hidrología local que afecta directamente el ciclo hidrológico. Las ciudades en continuo desarrollo y crecimiento han aumentado dramáticamente las superficies impermeables. El problema con este hecho es la respuesta de la cuenca bajo cualquier evento de lluvia, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el flujo máximo, lo que se traduce en una mayor posibilidad de inundación incluso para períodos de retorno comunes y más bajos (Figura 1). Además, las superficies impermeables aumentan el volumen de agua drenada, por lo tanto, disminuyen la recarga de los acuíferos.



Sin construcción



Con construcción mediana



Con alta construcción

Figura 1. Efecto de la urbanización en el ciclo hidrológico.

La alteración de los cursos naturales también es una consecuencia directa del crecimiento de las ciudades sin planificación, generando la construcción de canales artificiales; finalmente, este hecho conduce a empeorar los problemas de drenaje urbano en términos de inundaciones, colapso de drenajes longitudinales y transversales de carreteras.

Los techos verdes se definen como un techo con una capa de vegetación [2], y sus componentes son variables, pero básicamente pueden ser una capa de vegetación, sustrato de crecimiento, capa de filtro, capa de drenaje, capa de impermeabilización y barrera de raíces [3], [4], [5]. Estos componentes se pueden visualizar en la Figura 2.



Figura 2. Componentes de un techo verde. [4].

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 [6].

Las ventajas de los techos verdes son variadas ya que los sistemas ecológicos influyen en los

procesos hidráulicos, hidrológicos y climáticos, esto independientemente de la especie vegetal utilizada o el método de construcción, se puede afirmar que todo tipo de techo verde realmente contribuye al medio ambiente, como varios estudios lo confirman [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. La reducción en los caudales máximos y el aumento del almacenamiento de agua de lluvia son algunos de estos beneficios, al transformar las superficies impermeables en superficies permeables, lo que significa una recuperación parcial de los espacios verdes y una disminución de la probabilidad de inundaciones [9].

Materiales y Métodos

Construcción del modelo a escala

Se construyeron dos modelos en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (Barquisimeto, Venezuela), dentro del laboratorio de mecánica de fluidos de la Facultad de Ingeniería Civil, con los siguientes componentes:

Soporte de acero y paredes de madera perimetral

Se construyó un soporte de acero con dimensiones de 1,00 x 1,00 m² y 1,00 m de altura como se muestra en la Figura 3. Se colocaron dos barras en cada soporte que podían ajustarse en altura para modificarlas pendientes del ensayo, simulando las pendientes en los techos de las edificaciones. Además, se construyó una caja de madera como encofrado perimetral para el techo a escala, cuya función es contener el suelo.



Figura 3. Soporte de acero con columnas ajustables.

Impermeabilización y tuberías de drenaje

El encofrado de madera se cubrió con una capa de impermeabilizante para simular la impermeabilización de los techos reales. Se ubicaron dos tuberías en la parte inferior del modelo y en la pared frontal para drenar el exceso de lluvia que la matriz el suelo no es capaz retener. Además, una media tubería a media caña que actúa como un canal de descarga para la escorrentía superficial. Esta se colocó por encima de las tuberías de drenaje (Figura 4).

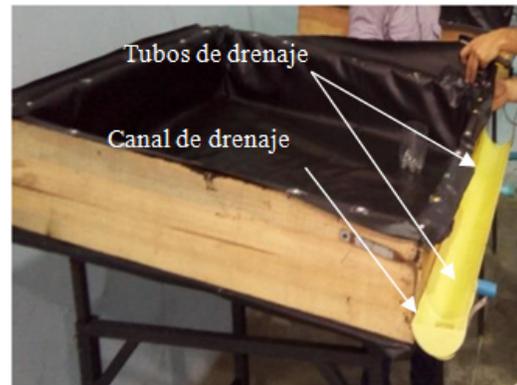


Figura 4. Tuberías de drenaje e impermeabilización.

Capa de drenaje y geotextil

Se colocó una capa de grava con partículas de grano estandarizado de unos 5 cm de altura que facilitó el drenaje, sobre la cual se colocó una membrana de geotextil para evitar el paso de las raíces de la vegetación y que se introdujeran en la capa drenante, pudiendo impedir la salida del agua. Sobre el geotextil se colocó el sustrato.

Capa de sustrato de crecimiento

El sustrato se elaboró con una mezcla de materiales simulando un suelo franco; 30% de materia orgánica, 40% de estiércol y 30% de cascarilla de arroz y arena amarilla, con un espesor de 10 cm.

Capa de vegetación

Se utilizaron dos tipos de grama: "San Agustín" (*Stenotaphrum secundatum*) y "Esmeralda" (*Zoysia japonica*) como se muestra en la Figura 5.





Figura 5. Capa de vegetación.

Sistema de bombeo e intensidades teóricas de lluvia.

La simulación de la intensidad de la lluvia, se realizó mediante un sistema de bombeo (Figura 6). Para calibrar la intensidad de la lluvia, se condujeron varios ensayos, abriendo la válvula principal durante un intervalo de 3 minutos por ensayo y estableciendo una marca en la válvula según el grado de apertura de la misma. El volumen total de lluvia se midió sin el sustrato y solo con la capa impermeabilizada; para esto se colocó un recipiente con una escala de medición a cada tubo de drenaje, es decir, dos (2) recipientes para cada modelo.



Figura 6. Sistema de bombeo

Se procedió a abrir la válvula, cada recipiente recibió agua de los modelos durante 3 minutos, por lo que la intensidad de la lluvia se calculó en función del volumen del recipiente (ecuación 1), el tiempo, el área y la descarga (ecuación 2).

$$V = \frac{1}{3} * \pi * Hn * (R^2 + r^2 + R * r) \quad (1)$$

Dónde:

V es el volumen del cubo.

Hn es la altura del agua en el recipiente por un intervalo de tiempo.

R es el radio superior del recipiente (variable de acuerdo con Hn).

r es el radio inferior del recipiente (variable de acuerdo con Hn).

$$Qn = \frac{(Vf - Vi)}{\Delta t} \quad (2)$$

Dónde:

Qn es la descarga por un intervalo de tiempo.

Vf y Vi son el volumen para un Hn dado

Δt es el intervalo de tiempo.

La intensidad de lluvia seleccionada en esta investigación fue para 3 (tres) períodos de retorno: 5, 10 y 25 años empleando curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) locales de la región de estudio (Figura 7). Estos períodos de retornos son los comúnmente utilizados en drenaje urbano y exigido por las normas. En la zona en estudio, ciudad de Barquisimeto, existen dos estaciones de precipitación en la zona: "Estacion Manzano Planta" y "Barquisimeto Oficina", de estas se selecciono la de Barquisimeto Oficina por possen mayores intensidades, siendo esta la más desfavorable.

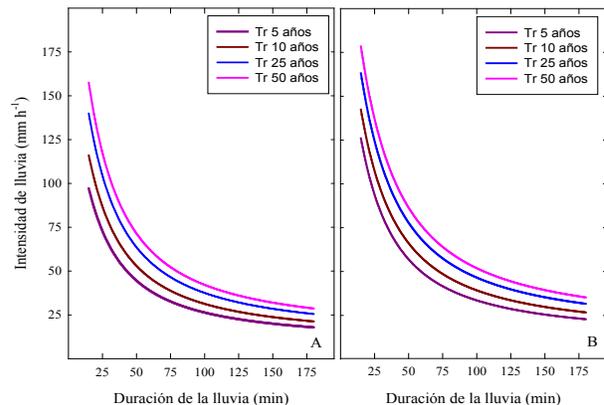


Figura 7. Curvas IDF de las estaciones locales "Manzano-Planta" (A) y "Barquisimeto-Oficina" (B).

Para el calculo de las intensidades de lluvia (I), correspondientes para cada período de retorno (Tr) se utiliza el tiempo de concentración (Tc) equivalente a 10 minutos que es lo minimo recomendado para drenaje urbano como se muestran en la Tabla 1. Con estos valores de Intensidades es que se van a realizar los ensayos.

Tabla 1. Intensidades teóricas de lluvia.

Tr (años)	Tc (min)	I (mm h ⁻¹)
5	10	119,31
10	10	134,91
25	10	154,50

Intensidades de lluvia experimentales

La simulación de la Intensidad de lluvia se hizo a través de la manipulación de la apertura de la válvula, con una calibración previa y varias repeticiones. La apertura correcta para cada intensidad de lluvia se muestra en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4. Los valores en esas tablas representan la intensidad de lluvia para una superficie de 1 m², lo que significa que aplicando la ecuación 3, el valor de intensidad de lluvia es el mismo valor de descarga.

$$I = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Dónde:

I es la intensidad experimental.

Q es la descarga experimental máxima.

A es el área del techo experimental.

Tabla 2. Intensidad de lluvia experimental para un Tr = 5 años.

Experimento	Apertura de la válvula (grados)	Tiempo del experimento (s)	Volumen (litros)	Descarga Total (ls-1)	Descarga Total (lh-1)
1	360	180	6,50	0,036	130,00
2	370	180	6,50	0,036	130,00
3	390	180	6,25	0,035	125,00
4	395	180	6,00	0,033	120,00
5	395	180	6,00	0,033	120,00
6	395	180	6,00	0,033	120,00

Tabla 3. Intensidad de lluvia experimental para un Tr = 10 años.

Experimento	Apertura de la válvula (Grados)	Tiempo del experimento (s)	Volumen (litros)	Descarga Total (l s ⁻¹)	Descarga Total (l h ⁻¹)
1	320	180	7,00	0,039	140,00
2	330	180	6,5	0,036	130,00
3	330	180	6,5	0,036	130,00
4	325	180	6,75	0,038	135,00
5	325	180	6,75	0,038	135,00
6	325	180	6,75	0,038	135,00

Tabla 4. Intensidad de lluvia experimental para un Tr = 25 años.

Experimento	Apertura de la válvula (Grados)	Tiempo del experimento (s)	Volumen (litros)	Descarga Total (l s ⁻¹)	Descarga Total (l h ⁻¹)
1	300	180	7,25	0,040	145,00
2	300	180	7,25	0,040	145,00
3	290	180	7,5	0,042	150,00
4	280	180	7,75	0,043	155,00
5	280	180	7,75	0,043	155,00
6	280	180	7,75	0,043	155,00

Resultados y Discusión

Al comparar los resultados se observa que existe una diferencia entre los valores experimentales y los teóricos, como se muestra en la Tabla 5. Sin embargo, esta diferencia no es estadísticamente significativa.

Tabla 5. Diferencias entre intensidades experimentales y teóricas

Tr (años)	Apertura de la válvula (Grados)	Intensidad experimental (mm/h)	Intensidad teórica (mm/h)	Error (%)
5	395	119,31	120,00	0,57
10	325	134,91	135,00	0,07
25	280	154,5	155,00	0,32

Descarga experimental sin techo verde

Para determinar el impacto sobre la descarga y la reducción del volumen de escorrentía usando techos verdes, se realizó un experimento sin sustrato ni vegetación en cada uno de los modelos construidos, como si se tratara de un techo impermeable. Asumiendo cero infiltración y variando la pendiente para cada modelo (5%, 10% y 12%) dando un total de 9 ensayos por modelo. Los resultados son mostrados en los hidrogramas (Figuras 10 y 11).

Humedad y porosidad del suelo

Para obtener un enfoque real de los resultados, las propiedades del suelo se calcularon como se muestra en la Tabla 6; estos valores se consideraron para determinar el intervalo de tiempo para cada ensayo, tratando de mantener la humedad del suelo similar a una serie de curvas con condición de humedad antecedente, de acuerdo con las recomendaciones del Servicio de Conservación del Suelo [14].

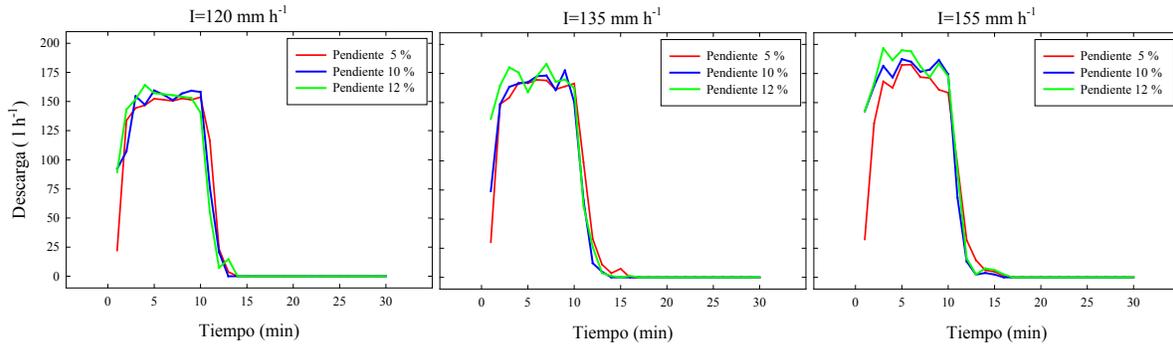


Figura 10. Hidrogramas para el modelo 1 sin techo verde.

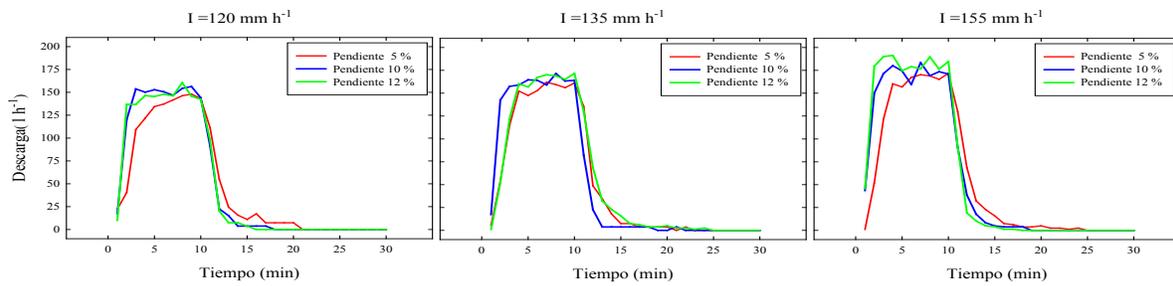


Figura 11. Hidrogramas para el modelo 2 sin techo verde.

Tabla 6. Propiedades del suelo.

Muestra	Contenedor	Peso del contenedor (gr)	Peso del suelo humedo + contenedor (gr)	Peso del suelo humedo+ contenedor (gr)	Peso del agua (gr)	Peso del suelo seco (gr)	Contenido de humedad (%)	Porosidad (%)
Arena amarilla	2	58,7	424,9	399,8	25,1	341,1	7,36	46,00
Materia organica	1	43,3	158	115,4	42,6	72,1	59,08	73,00
Sustrato	3	31,1	270,7	185,1	85,6	154	55,58	80,00

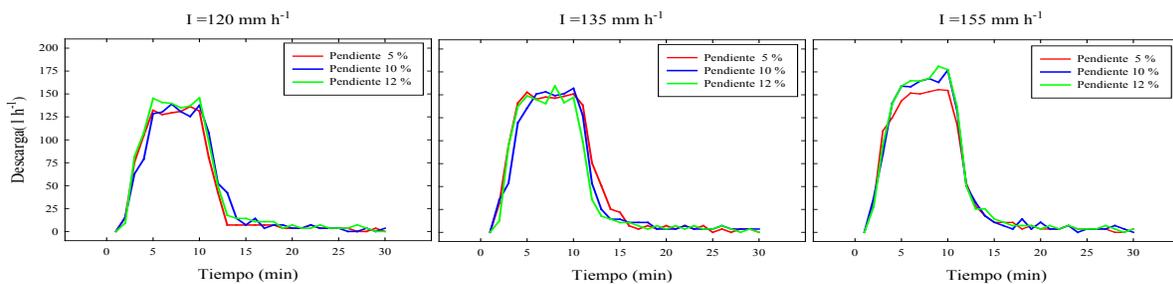


Figura 12. Hidrogramas para el modelo 1 con techo verde.

Independientemente del valor de porosidad, los modelos de techo verde se sometieron a una lluvia previa para crear una condición de humedad antecedente cercana a capacidad de campo, dejando drenar por un periodo de 24 horas.

Descarga experimental con techos verdes

En este caso, el contenido de humedad de la matriz del suelo fue un parámetro a considerar, ya que puede alterar los hidrogramas de escorrentía al reducir la infiltración. Para evitar este hecho, se consideró un tiempo de 24 horas después del ensayo y entre cada ensayo, para

garantizar la humedad del suelo adecuada. Se realizaron nueve ensayos (Figura 12 y 13).

Del análisis de los resultados mostrados en las Figuras 13 y 14, se observa que existe una reducción en el flujo máximo en ambos modelos, al comparar la escorrentía producida por un techo verde y un techo convencional. Estos resultados de escorrentía para los modelos de techo verde podrían verse afectados por la condición previa de humedad, ya que solo hubo 24 horas entre cada prueba, y los modelos no estaban bajo la luz solar, lo que incidió en las pérdidas por evapotranspiración. Las diferencias de escorrentía para cada modelo se muestran en la Tabla 7 para el modelo 1 y en la Tabla 8 para el modelo 2.

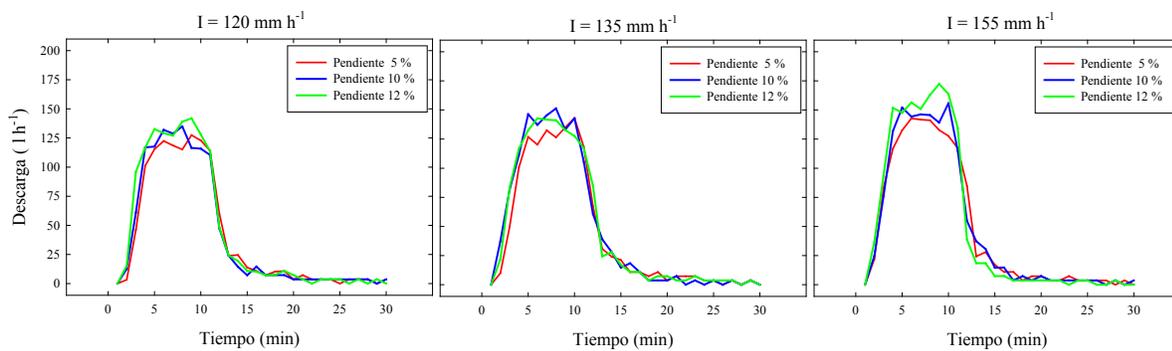


Figura 13. Hidrogramas para el modelo 2 con techo verde.

Tabla 7. Reducción de flujo máximo para el modelo 1.

Intensidad (mmh ⁻¹)	120 mm h ⁻¹			135 mm h ⁻¹			155 mm h ⁻¹		
	Pendiente (%)			Pendiente (%)			Pendiente (%)		
	5	10	12	5	10	12	5	10	12
Modelo 1	Flujo máx.(l h ⁻¹)			Flujo máx.(l h ⁻¹)			Flujo máx.(l h ⁻¹)		
Sin Veg.	153,68	159,43	164,16	169,58	177,6	183,16	182,57	187,29	196,69
Con Veg.	136,28	138,92	145,79	152,82	157,06	159,69	155,70	176,85	181,15
Reduccion del flujo max.(lh ⁻¹)	17,40	20,51	18,37	16,76	20,54	23,47	26,87	10,44	15,54
Reducción del flujo max. (%)	11,32	12,86	11,19	9,88	11,57	12,81	14,72	5,57	7,90

Tabla 8. Reducción de flujo máximo para el modelo 2.

Intensidad (mm h ⁻¹)	120 mm h ⁻¹			135 mm h ⁻¹			155 mm h ⁻¹		
	Pendiente (%)			Pendiente (%)			Pendiente (%)		
	5	10	12	5	10	12	5	10	12
Modelo 2	Flujo máx. (lh ⁻¹)			Flujo máx. (l h ⁻¹)			Flujo máx. (l h ⁻¹)		
Sin Veg.	148,03	156,28	160,53	161,96	171,40	171,65	171,65	183,39	191,25
Con Veg.	127,40	134,95	141,83	143,04	151,31	142,73	142,73	155,73	172,26
Reduccion del flujo max.(l h ⁻¹)	20,63	21,33	18,70	18,92	20,09	28,92	28,92	27,66	18,99
Reducción del flujo max. (%)	13,94	13,65	11,65	11,68	11,72	16,85	16,85	15,08	9,93

Los resultados de los experimentos mostraron que hay una reducción de flujo máximo para cada ensayo, incluso utilizando diferentes especies vegetales. Independientemente de la variación de pendientes utilizada en cada modelo, se observa que se produce la reducción del flujo máximo. Estos resultados reflejan algunas similitudes de muchos experimentos en todo el mundo como [15], [16], [17]. Analizando el almacenamiento de agua de lluvia, estos experimentos mostraron que incluso cuando se satura la matriz del suelo, la reducción de flujo máximo y la reducción de volumen tienen lugar. Los resultados para el volumen total de agua escurrida para cada ensayo se muestran en la Tabla 9 y la Tabla 10.

La grama Esmeralda presentó una mejor capacidad de retención de humedad, con respecto a la San Agustín vegetación utilizada, aun cuando ambas fueron sometidas a 6 semanas sin riego esta presentó mejor respuesta al estrés hídrico.

La pendiente del techo no afecta significativamente la descarga en suelos impermeables. Sin embargo, al implantar techos verdes se obtiene una mayor reducción de caudal máximo para pendientes bajas e intensidades altas, lo cual podría contribuir positivamente bajo eventos de intensidades extremas.

Tabla 9. Reducción de volumen para el modelo 1.

Intensidad (mm h ⁻¹)	120 mm h ⁻¹			135 mm h ⁻¹			155 mm h ⁻¹		
	Pendiente (%)	5	10	12	5	10	12	5	10
Modelo 1	Volumen total (l)			Volumen total (l)			Volumen total (l)		
Sin Veg.	25,24	26,41	26,44	27,77	27,91	30,56	28,25	31,83	33,14
Con Veg.	19,73	20,57	21,91	25,55	23,68	22,93	24,54	26,27	26,85
Volumen Reducido (l)	5,50	5,84	4,54	2,22	4,23	7,63	3,72	5,56	6,29
Volumen Reducido (%)	21,80	22,12	17,15	7,99	15,15	24,97	13,15	17,47	18,98

Tabla 10. Reducción de volumen para el modelo 2.

Intensidad (mm h ⁻¹)	120 mm h ⁻¹			135 mm h ⁻¹			155 mm h ⁻¹		
	Pendiente (%)	5	10	12	5	10	12	5	10
Modelo 2	Volumen Total (l)			Volumen Total (l)			Volumen Total (l)		
Sin Veg.	23,66	24,98	24,33	25,64	26,71	27,33	27,33	29,49	30,72
Con Veg.	19,71	20,18	21,79	21,43	23,28	23,09	23,09	23,87	24,91
Volumen Reducido (l)	3,95	4,80	2,54	4,21	3,43	4,24	4,24	5,62	5,81
Volumen Reducido (%)	16,70	19,22	10,44	16,41	12,84	15,53	15,53	19,07	18,91

Es notable el papel desempeñado por la porosidad en todos los ensayos como agente de retención de agua, reteniendo el agua de lluvia en un 16% en promedio.

Conclusiones

Se muestra una reducción considerable en el caudal máximo entre 10% y 16%, al comparar un techo verde en condiciones húmedas con respecto a un techo convencional, aun bajo las condiciones en estudio sin exposición a la luz solar.

Referencias Bibliográficas

- [1] Jaume, A. T.: "Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible". *Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, N^o. 2 (2016) 26-40.
- [2] Sanchez, L. and Reames, T. G.: "Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy". *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 44, (2019) 126331. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.014>

- [3] Minke, G.: "Inclined Green Roofs–Ecological and Economical Advantages, Passive Heating and Cooling Effect". Cesb 07 Prague Conference 26-28.6. (2013) sustainable building and refurbishment for next generations prague. Session T4C: Materials, 2.
- [4] Vijayaraghavan K.: "Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends". *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 57 (2016), 740-752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>.
- [5] Nagase A. and Dunnett N.: "Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure". *Landscape and urban planning*, Vol. 104, No. 3-4(2012), 356-363. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.001>.
- [6] Gómez, A., Galarza-Molina, S. y Torres, A.: "Propuesta de mejoramiento tecnológico de techos verdes para el clima tropical andino". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 28, N° 1 (2018) 73-99.
- [7] Berardi U., Ghaffarian Hoseini A. and Ghaffarian Hoseini, A.: "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs," *Applied Energy*, Vol. 115 (2014), 411-428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- [8] Connelly M. and Hodgson M.: "Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs". *Applied Acoustics*, Vol. 74 No. 10 (2013), 1136 -1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>.
- [9] Francis R. and Lorimer J.: "Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls". *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, No. 6(2011), 1429-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>.
- [10] Li, D., Bou-Zeid, E. and Oppenheimer, M.: "The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies". *Environmental Research Letters*, Vol 9, N° 5 (2014), 1-16. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- [11] López N., Barreto, W. y Mendez N.: «Techos verdes como solución al problema de inundaciones», *Gaceta Técnica DIC*, Vol. 14, No. 1(2014) 9-20. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3524.4405>.
- [12] Shafique, M., Kim, R. and Rafiq, M.: "Green roof benefits, opportunities and challenges–A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90 (2018), 757-773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.
- [13] Yang J., Yu Q. and Gong P.: "Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago". *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 31(2008), 7266-7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>.
- [14] Chow V. T., Maidment D. and Ways L.: "Hidrología Aplicada", Ed. Mac Graw Hill, Interamericana. Santa Fé de Bogotá, Colombia, (1994).
- [15] Yang W.-Y., T. Sun, Li D. y Ni, G.-H., "Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs," *Ecological engineering*, Vol. 74 (2015), 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.023>
- [16] Vijayaraghavan K., Joshi, U. M. and Balasubramanian R.: "A field study to evaluate runoff quality from green roofs". *Water Research*, Vol. 46, N° 4(2012), 1337-1345. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.050>
- [17] Speak A., Rothwell J. J., Lindley S. J., and Smith C. L.: "Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof," *Science of The Total Environment*, Vol. 461 (2013), 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.085>.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2020, No. 1, pp. 03 - 55 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Febrero de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela***

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientifica.luz.edu.ve