

Tendencias en el diseño, construcción y operación de techos verdes para el mejoramiento de la calidad del agua lluvia. Estado del arte

Trends in the design, construction and operation of green roofs to improve the rainwater quality. State of the art

Morales, J. A.^{a1}, Cristancho, M. A.^{a2}, y Baquero-Rodríguez, G. A.^{a3}

^aUniversidad Central Calle 21 No. 4-40 Bogotá D.C. Colombia.

E-mail: ^{a1} jmoralesm4@ucentral.edu.co, ^{a2} mcristanchos@ucentral.edu.co, ^{a3} gbaqueror@ucentral.edu.co

Recibido: 23/11/2016

Aceptado: 10/07/2017

Publicado: 31/07/2017

Citar como: Morales, J. A., Cristancho, M. A., Baquero-Rodríguez, G. A. 2017. Trends in the design, construction and operation of green roofs to improve the rainwater quality. State of the art. *Ingeniería del agua*, 21(3), 179-196. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6939>

RESUMEN

Los techos verdes se presentan como tecnología de mejoramiento de calidad de agua. En este artículo se identifican tendencias en las condiciones de diseño, construcción y operación de techos verdes cuyo objetivo es mejorar la calidad del agua lluvia. Se realizó una revisión bibliográfica consultando en las bases de datos Scopus, Science Direct y Redalyc, un total de 45 artículos científicos originales. A partir de la información recolectada se identificaron tendencias en incrementos y reducciones en las concentraciones de diferentes parámetros de calidad de agua, temporadas del año con los mejores resultados, tipos de techos verdes más usados, clases de sustrato y componentes más comunes, tendencias de construcción (dimensiones, inclinación, materiales y capas) y vegetación más usada. Los resultados muestran que los techos verdes tienen la capacidad de neutralizar la lluvia ácida. Debido a sus características de construcción, funcionalidad y bajo costo, los techos de tipo extensivo son los más usados..

Palabras clave | techo verde; tendencia; escorrentía; calidad del agua; sustrato.

ABSTRACT

The green roofs appear as technology for the improvement water quality. This article identifies trends in the conditions of design, construction and operation of green roofs, which aim is to improve the quality of rainwater. A literature review was carried out in order to collect 45 original research papers from databases as Scopus, Science Direct, and Redalyc. From the information collected trends in increments and reductions in the concentrations of the main water quality parameters, seasons of the year with the best results, types of green roofs, types of substrate and most common components, construction trends (dimensions, inclination, Materials and layers) and vegetation used in these systems have been determined. The results show that green roofs have the ability to neutralize acid rain. Extensive type roofs are the ones most commonly used, due to its characteristics of construction, functionality and low maintenance requirements.

Key words | green roofs; trends; rainwater; water quality; substrate.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional tiene como consecuencia el aumento de áreas urbanizadas. La ampliación de los límites de las ciudades implica la impermeabilización de antiguas zonas verdes y la pérdida de vegetación. Las zonas impermeabilizadas no sólo contribuyen al aumento de los volúmenes de agua desplazados fuera de la cuenca, la pérdida de vegetación también permite que los contaminantes asociados a la urbanización lleguen directamente a los cuerpos de agua sin ninguna clase de filtro. Dada la problemática relacionada con la calidad del agua lluvia en distintas partes del mundo, los techos verdes se posicionan como una alternativa económica y ambientalmente viable (Rowe *et al.*, 2012).

Un techo verde se puede definir como una superficie de un edificio o construcción que se encuentra cubierta de vegetación parcial o totalmente. En cualquier ciudad se encuentran grandes áreas de azoteas que pueden ser transformadas en techos verdes y traer numerosos beneficios (Czemieli Berndtsson, 2010). Los techos verdes son referidos como tecnologías usadas para mejorar el hábitat o disminuir el consumo de energía entre otros, es decir tecnologías que cumplen una función ecológica (Minke, 2008). Como consecuencia de la preocupación por la protección del ambiente las ideas sustentables y benéficas para su protección son bastante apetecidas, estos sistemas ofrecen una alternativa limpia y accesible; adicionalmente son favorecedores en aplicaciones como control térmico, reducción de ruido, mejoramiento de la calidad de aire y atenuación de la escorrentía (Vijayaraghavan, 2016). Asimismo el continuo crecimiento urbano ha incorporado la vegetación en los diseños de infraestructuras como en las fachadas, jardines y techos. (Getter y Rowe, 2006).

Los techos verdes son capaces de retener un valor medio de 69% de agua precipitada en un evento de lluvia en condiciones normales, este volumen de agua es absorbido en su mayoría por la vegetación y liberado de nuevo a la atmosfera por evaporación, el agua restante se almacena en el sustrato. Lo anterior reduce los riesgos de inundación y mejora el equilibrio hídrico (Bengtsson *et al.*, 2005). Es así que un techo verde es capaz de atenuar los flujos de escorrentía máximos, en comparación con un techo convencional (techo sin cobertura vegetal). Sin embargo, el rendimiento de retención en techos verdes se reduce en el caso de eventos de lluvia extrema, lo anterior como resultado de la porosidad del sustrato que determina su capacidad de retención finita (Nawazz *et al.*, 2015).

El diseño de los techos verdes varía de un lugar a otro y está orientado por el propósito del mismo, en su mayoría los techos verdes se implementan por razones estéticas (Czemieli Berndtsson, 2010). Un techo verde es un sistema más complejo que un techo convencional, se compone por diferentes capas, dentro de éstas se encuentran una capa de sustrato también llamada medio de crecimiento, capa de drenaje, capa filtrante, capa de protección y por último una capa de impermeabilización (Kok *et al.*, 2016; Sultana *et al.*, 2016).

Debido a sus características y principalmente a la profundidad de su sustrato, los techos verdes se clasifican en tres tipos: i) Techo extensivo: Requiere poca irrigación, poca variedad de plantas y cuenta con una profundidad del sustrato menor o igual 10 cm; ii) Techo intensivo: Comprende una capa de sustrato de profundidad mayor a 20 cm, esto lo hace ser un sistema complejo, en su mayoría la vegetación está compuesta por arbustos o árboles pequeños. iii) Techo semi-intensivo tiene una profundidad de 10 a 20 cm, requiere irrigación periódica y está compuesto por una variedad de plantas como gramíneas, plantas perennes y pastos, se caracterizan por incorporar elementos de diseño (Government of the District of Columbia, 2006). En cuanto al área de los techos no se encuentra una extensión estándar, depende de la disponibilidad de espacio del techo a utilizar, lo anterior únicamente interfiere en la cantidad de agua tratada.

Actualmente los niveles de contaminación atmosférica son superiores que en décadas pasadas, el agua lluvia no está exenta de ser afectada por este fenómeno. Uno de los beneficios del techo verde que no es ampliamente reconocido, es el del mejoramiento de calidad de agua lluvia. Se han identificado diferentes investigaciones relacionadas con la temática de los techos verdes, entre otros los temas tratados consideran las características sobre la biota del suelo, la vegetación y se analiza el funcionamiento de los techos verdes (Oberndorfer *et al.*, 2007). La relación de la capa de drenaje depende el éxito del techo verde (Vijayaraghavan, 2016), influencia de los techos verdes en la contaminación del aire, las emisiones de dióxido de carbono, el secuestro de carbono y la longevidad de las membranas empleadas en ellos (Rowe, 2011) así como la reducción del consumo de energía (Hashemi *et al.*, 2015).

A partir de la revisión realizada no se ha identificado un consenso generalizado para el diseño y aplicación de techos verdes en el mejoramiento de la escorrentía resultante del agua lluvia que ingresa al sistema. Teniendo en cuenta lo anterior en el presente artículo, a partir de una revisión de literatura, se presenta un estudio de las tendencias en los criterios de diseño, construcción y operación de techos verdes aplicados al mejoramiento de la calidad de agua lluvia. La revisión se ha enfocado en aspectos relacionados específicamente con: i) Estado del arte, ii) Prácticas de diseño y tendencias de construcción y iii) Eficiencias de remoción y parámetros de calidad del agua típicamente monitoreados.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presenta un recuento de la metodología aplicada en las actividades que se desarrollaron para el presente estudio. La investigación realizada parte de una revisión de literatura científica. Las diferentes actividades se detallan a continuación:

i) **Búsqueda y revisión de artículos científicos originales:** Se realizó la búsqueda y recopilación de artículos en los cuales se realizó investigación en la temática de techos verdes y que incluyan como objetivo el mejoramiento de la calidad de agua. Se realizó una búsqueda de artículos que contenían palabras clave “Water Quality” y “Green Roofs” (“Calidad de agua” y “Techos verdes”) en las bases de datos electrónicas Scopus, Science Direct y Redalyc, desde el año 2008 hasta 2016(año en que se llevó a cabo la investigación). Los artículos seleccionados y revisados son los que incluyeron resultados experimentales, que se asociaron a la calidad del agua lluvia en techos verdes. Es importante destacar que los datos obtenidos en el presente estudio fueron resultados de techos verdes con vegetación, los estudios tuvieron siempre un enfoque hacia el mejoramiento de la calidad de agua lluvia, experimentando con precipitaciones reales o simuladas en condiciones controladas, por ejemplo, entrada de agua con concentraciones conocidas.

Para el desarrollo del presente estudio fueron revisados alrededor 100 artículos científicos, de los cuales 45 fueron empleados como referencia para el análisis, dado que estos artículos contaron con información específica en una o varias categorías de análisis experimental que son presentadas en los resultados obtenidos. Vale la pena aclarar un artículo puede reportar resultados asociados a varias unidades experimentales o techos verdes, en estos casos, se han considerado de forma independiente los resultados reportados, para una totalidad de 120 unidades experimentales.

ii) **Recopilación de datos:** La información obtenida fue consolidada en una hoja de cálculo empleando Microsoft Excel 2013 (documento no se presenta en este artículo). Empleando dicha base de datos se clasificó la información en categorías que contenían las variables más estudiadas en techos verdes así: principales parámetros físico-químicos en calidad de agua (se registró datos de concentraciones de entrada y salida del agua en el techo verde); tipos de techo; clases, profundidad y componentes del sustrato; tendencias de construcción (dimensiones, pendientes, capas, materiales de capas y de estructura) y vegetación en techos verdes (según especies descritas en cada artículo científico).

iii) **Análisis de la información destacada:** Se identificaron y presentaron los parámetros de calidad de agua más estudiados en la temática de techos verdes; tendencias en cuanto a incrementos y reducciones en las concentraciones de los principales parámetros de calidad de agua; temporadas de año con los mejores resultados en calidad del agua, tipos de techos verdes más usados, clases de sustratos y componentes más comunes en la instalación; tendencias en la construcción de los techos y especies vegetales usadas con mayor frecuencia en techos verdes.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se relacionan las referencias estudiadas para obtener los resultados del presente artículo, se ha incluido una clasificación según el tema general que trataron.

Tabla 1 | Referencias - Artículos científicos clasificados por tema.

Referencia	Tema
(Alsop <i>et al.</i> , 2011; Beck <i>et al.</i> , 2011; Buccola & Spolek, 2010; Hathaway <i>et al.</i> , 2008; Kuoppamäki <i>et al.</i> , 2016; Kuoppamäki & Lehvävirta, 2016; Malcolm <i>et al.</i> , 2014; Mendez <i>et al.</i> , 2011; Razzaghmanesh <i>et al.</i> , 2014; Schwager <i>et al.</i> , 2014; Seidl <i>et al.</i> , 2013; Teemusk & Mander, 2011; Vijayaraghavan & Raja, 2014; Vijayaraghavan & Raja, 2015)	Influencia en la calidad de la escorrentía tratada asociada a distintas mezclas de componentes del sustrato como gravas, vermiculita y carbón vegetal, entre otros.
(Buffam <i>et al.</i> , 2016; Chen & Kang, 2016; Ewecharoen <i>et al.</i> , 2008; Rossatto <i>et al.</i> , 2015; Wilkinson <i>et al.</i> , 2015)	Relación de la vegetación en el funcionamiento de los techos verdes. Se realizaron distintos tipos de montajes con plantas herbáceas, algas y sedum. Lo anterior con el fin de mejorar la calidad de la escorrentía.
(Beecham & Razzaghmanesh, 2015; Berghage <i>et al.</i> , 2009; Bliss <i>et al.</i> , 2008; Buccola & Spolek, 2010; Buffam <i>et al.</i> , 2016; Carpenter <i>et al.</i> , 2016; Gregoire & Clausen, 2011; Gromaire <i>et al.</i> , 2013; Harper <i>et al.</i> , 2015; Kok <i>et al.</i> , 2016; OConnor <i>et al.</i> , 2014; Perales-Momparler <i>et al.</i> , 2014; Seters <i>et al.</i> , 2009; Sultana <i>et al.</i> , 2016; Teemusk & Mander, 2007; Whittinghill <i>et al.</i> , 2016; Zhang <i>et al.</i> , 2015)	Los estudios se concentraron en determinar porcentajes de aumento y remoción de los parámetros físico - químicos como <i>pH</i> , <i>Conductividad</i> , <i>SST</i> , <i>Turbiedad</i> , <i>DBO₅</i> , <i>DQO N</i> , <i>PT</i> , <i>PO_p</i> , <i>NO₃</i> y <i>NO₄</i> entre otros, metales como <i>As</i> , <i>Cr</i> , <i>Cd</i> , <i>Al</i> , <i>Pb</i> , <i>Ba</i> , <i>Co</i> , <i>Cu</i> , <i>Fe</i> , <i>Hg</i> , <i>Mn</i> , <i>Mg</i> y <i>Zn</i> presentes en el agua. Cabe notar que en algunos experimentos compararon techos verdes y techos de asfalto o aluminio.
(Berndtsson <i>et al.</i> , 2006; Vijayaraghavan <i>et al.</i> , 2012; Vijayaraghavan & Joshi, 2014)	Estudian específicamente la relación de los techos verdes como sistema de retención o aumento de concentración de metales pesados, parámetros físico - químicos y nutrientes presentes en el agua.
(Van Mechelen <i>et al.</i> , 2015)	Propone las especificaciones de riego para los techos verdes en diferentes climas.
(Aceves & Fuamba, 2016)	Metodología para seleccionar las mejores prácticas de gestión integrando múltiples partes interesadas y criterios.
(Aitkenhead-Peterson <i>et al.</i> , 2010)	Examina las pérdidas y ganancias de los nutrientes, cationes y aniones seleccionados en el techo verde.
(Speak <i>et al.</i> , 2014)	Compara la calidad de la precipitación y la escorrentía entre un techo verde intensivo de edad y una superficie de techo convencional adyacente.

Así mismo, en la Tabla 2 se detalla es país con relación a la procedencia autor de los artículo científico estudiados, con el fin de generar un dimensionamiento de las zonas que mayor interés tienen a nivel mundial respecto al tema de mejoramiento de la calidad del agua lluvia a partir de techos verdes.

Tabla 2 | Procedencia país - autores de artículos científicos.

Autor	País
Rossatto <i>et al.</i>	Argentina
Beecham & Razzaghmanesh.	Australia
Seters <i>et al.</i> ; Aceves & Fuamba.	Canada
Chen & Kang; Zhang <i>et al.</i>	China
Perales-Momparler <i>et al.</i>	España
Aitkenhead-Peterson <i>et al.</i> ; Alsop <i>et al.</i> ; Beck <i>et al.</i> ; Berghage <i>et al.</i> ; Bliss <i>et al.</i> ; Buccola & Spolek; Buffam <i>et al.</i> ; Carpenter <i>et al.</i> ; Carpenter <i>et al.</i> ; Gregoire & Clausen.; Harper <i>et al.</i> ; Hathaway <i>et al.</i> ; Malcolm <i>et al.</i> ; Mendez <i>et al.</i> ; OConnor <i>et al.</i> ; Wilkinson <i>et al.</i> ; Wilkinson <i>et al.</i> ; Whittinghill <i>et al.</i>	Estados Unidos
Teemusk & Mander.	Estonia
Kuoppamäki <i>et al.</i>	Finlandia.
Gromaire <i>et al.</i> ; Schwager <i>et al.</i> ; Seidl <i>et al.</i>	Francia
Vijayaraghavan <i>et al.</i>	India
Kok <i>et al.</i> ; Sultana <i>et al.</i>	Malasia
Speak <i>et al.</i>	Reino unido
Berndtsson <i>et al.</i>	Suecia
Ewecharoen <i>et al.</i>	Tailandia

A continuación se presentan los resultados encontrados para los parámetros más estudiados en calidad de agua, así como las principales tendencias entorno al uso de los techos verdes. Se aclara que el número de la muestra para la estadística se identifica en cada tabla y figura con la letra *n*. Los parámetros de calidad del agua son representados por su sigla en español, los elementos se referencian según su símbolo químico.

1. Identificación y uso de capas en techos verdes

Las capas instaladas en los techos verdes son un aspecto de bastante importancia, ya que la correcta funcionalidad de un techo verde, depende directamente de la presencia de estas capas (Pandula, 2010).

En la Figura 1, se identifica la frecuencia con la que las capas se encuentran en los techos verdes analizados, destacando que un techo verde posee vegetación y sustrato (siendo distinto, no podría ser calificado como un techo verde), de este modo el drenaje, la capa filtrante y el aislamiento del techo, fueron en perspectiva capas de mayor funcionalidad para las unidades experimentales analizadas.

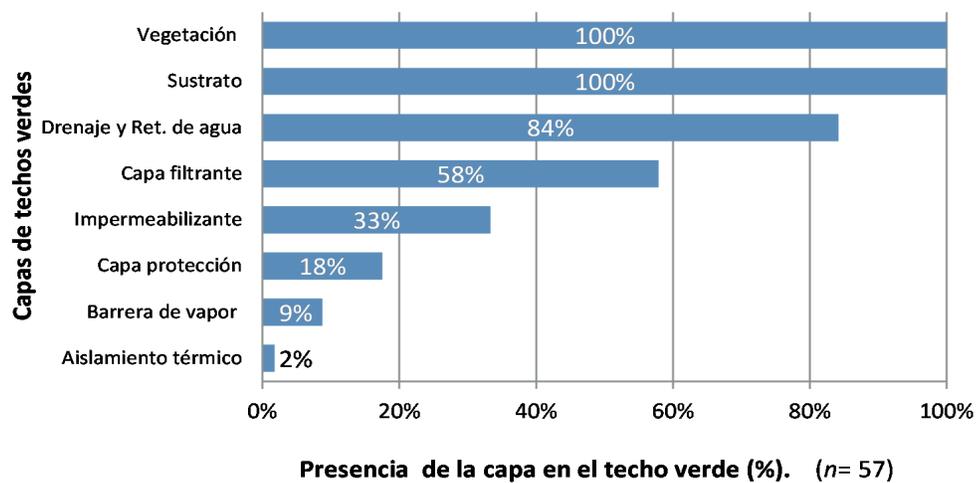


Figura 1 | Identificación y frecuencia de uso de las capas en techos verdes.

Las capas identificadas en este estudio son: *A*. Vegetación: es un indicador del correcto funcionamiento del techo verde; *B*. Sustrato: indispensable para el reposo y generación de nutrientes para las plantas; *C*. Capa filtrante: permite que las partículas finas del sustrato se laven sin que pasen al drenaje, reduce la permeabilidad del techo; *D*. Drenaje y retención de agua: almacenamiento de agua necesario para la vegetación, estructura en forma de cartón de huevos; *E*. Capa de protección: protege el aislamiento térmico y a la membrana impermeable, protección anti-raíces; *F*. Impermeabilizante de techo: membrana a prueba de agua; *G*. Aislamiento térmico: material aislante que tiene una capacidad de transporte de carga y eliminar puentes térmicos, puede estar sobre la barrera de vapor o sobre el aislamiento de techo verde; *H*. Barrera de vapor: bloquea el vapor de agua con láminas bituminosas, protege el aislamiento del techo (Pandula, 2010). Del orden de las capas descritas depende el funcionamiento del techo, de tal manera que el agua que entra sea drenada eficientemente y así no afecte el montaje ni el soporte. En la Figura 2 se representa la configuración general de las capas de un techo verde, en su respectivo orden de instalación.

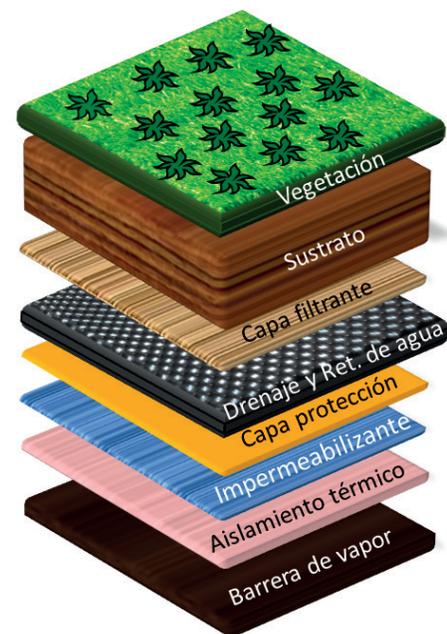


Figura 2 | Distribución de capas en techos verdes.

2. Especies vegetales de mayor frecuencia en techos verdes

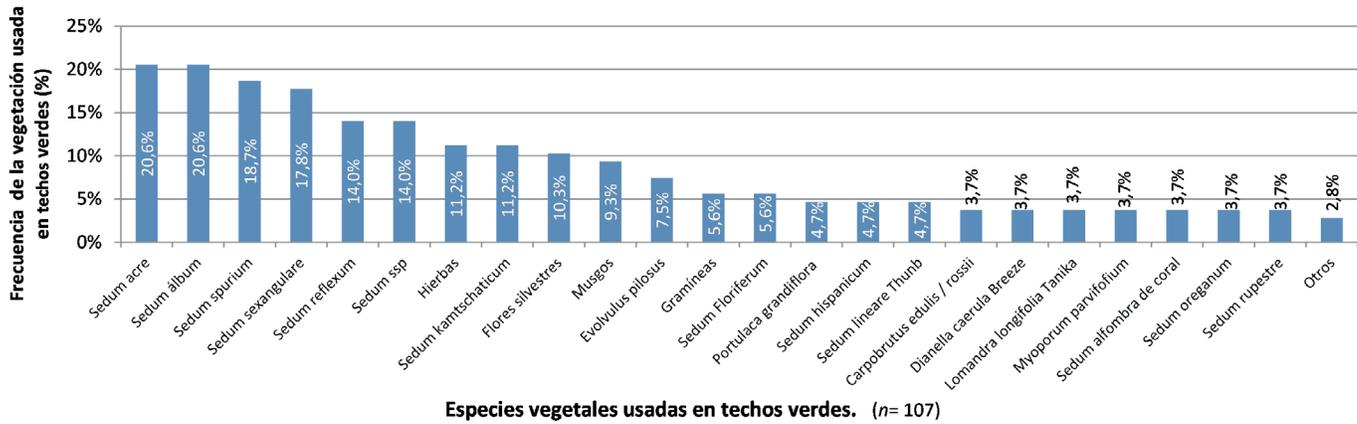


Figura 3 | Identificación y frecuencia de especies vegetativas en techos verdes. Se presentan las especies de mayor uso en las unidades experimentales revisadas, existe amplia variabilidad (alrededor de 100 especies vegetativas, resultados menores al 3% no son presentados en este artículo).

La funcionalidad de los techos verdes también se diferencia por un correcto crecimiento de la vegetación específica que puede mejorar la calidad del agua en este tipo de tecnología. En este estudio se identificaron que las especies vegetativas más comunes en la operación de los techos verdes analizados son *Sedum ssp* (*S. Acre*, *S. Álbum*, *S. Spurium*, *S. Sexangulare*, *S. Reflexum*), hierbas, flores silvestres y musgos entre otros (Figura 3).

3. Prácticas de diseño y tendencias de construcción en los sistemas de techos verdes

Los techos verdes extensivos son los más utilizados en comparación con los techos de tipo intensivo y semi-intensivo (Figura 5).

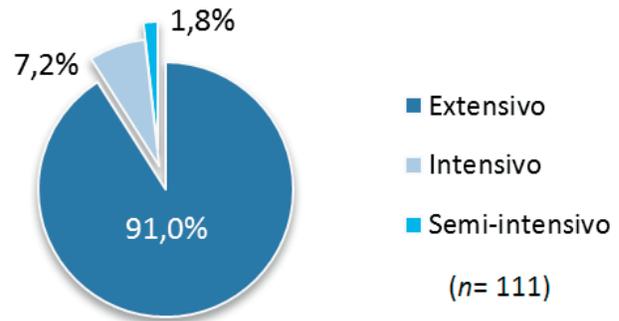
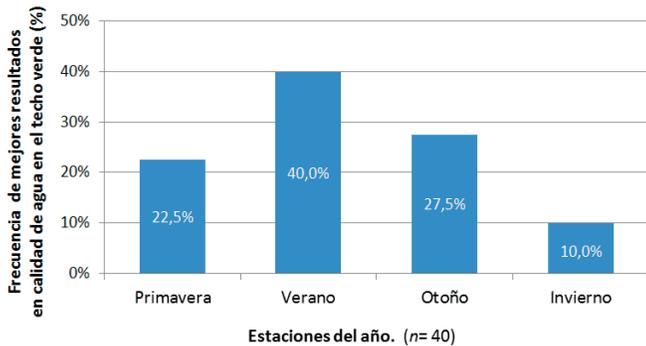


Figura 4 | Estaciones del año que reportaron los mejores resultados en calidad del agua en la escorrentía de techos verdes.

Figura 5 | Tipos de techos verdes más usados.

La profundidad y rangos promedio de las unidades experimentales reportadas fue analizada (Tabla 3). Los resultados obtenidos muestran que la instalación de techos verdes de tipo intensivo, demanda entre una y dos veces más volumen del sustrato correspondiente al medio de crecimiento vegetativo. Así mismo se muestran los rangos de profundidades mínimas y máximas promedio del sustrato, que fueron relacionadas como referencia bibliográfica (*R.B.*) en cada una de las publicaciones, y de las cuales los autores basaron su experimento.

Tabla 3 | Profundidad y rangos promedio del sustrato según el tipo de techo verde. Extensivo: n= 90; Intensivo: n= 6; Semi-intensivo: n= 2; R.B: n= 17.

	Promedio profundidad sustrato (cm)	Rango identificado (cm)	Promedio profundidad sustrato, Referencia Bibliográfica (R.B.) (cm)
Extensivo	10.1	2.0 - 20.0	3.9 - 15.0
Intensivo	19.1	15.0 - 30.0	16.2 - 29.6
Semi-intensivo	10	N.E.	N.E.

Se puede establecer que en promedio, los techos verdes extensivos ocupan un área bastante inferior, en comparación a los techos de tipo intensivo (Tabla 4), es de aclarar que los techos extensivos en ocasiones son seccionados en módulos, lo que hace más versátil este tipo de montaje en la distribución de espacios para unidades experimentales y posiblemente para techos en las ciudades; los techos verdes tuvieron una ángulo de inclinación promedio de 6.8° en los ensayos realizados (Tabla 5).

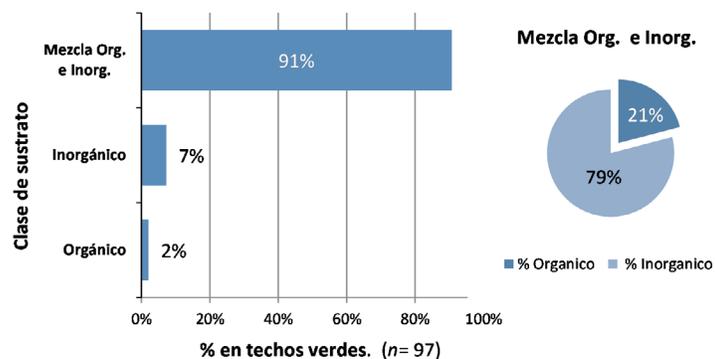
Tabla 4 | Dimensiones de construcción promedio de las unidades experimentales. Se detallan las dimensiones de construcción promedio de techos verdes y rangos de áreas (mínimas y máximas), número de techos o módulos. (Extensivo: n= 62; Intensivo: n= 4; Semi-intensivo: n= 2).

	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m)	Rango Áreas conjunto de techos (m ²)			Número de techos o módulos (m ²)		
				Promedio	Mín.	Max	Promedio	Mín.	Max.
Extensivo	1.56	0.98	1.53	130	0.25	1190	5	1	26
Intensivo	7	5	35	233	57.6	408	2	1	3
Semi-intensivo	2	1	2	50	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

Tabla 5 | Ángulo de inclinación de construcción promedio de las unidades experimentales. Se detalla la inclinación promedio de los techos verdes, así como rangos y frecuencia de uso. (n= 54).

	Ángulo de inclinación promedio (°)	Rangos regulares de uso (°)	Ángulo de inclinación de mayor uso (°)
Techo verde	6.8	0 - 20	4

De acuerdo con las referencias consultadas, el sustrato usado en la mayor parte de los techos experimentales estudiados se conformó de una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos (Figura 6); de la misma manera se identificó que los componentes más comunes en los sustratos de techos verdes son: mezclas de arcilla, tierra, arena y compost entre otros, los resultados obtenidos de la composición de los sustratos se presentan en la Figura 7.

**Figura 6** | Clases de sustrato y composición en techos verdes.

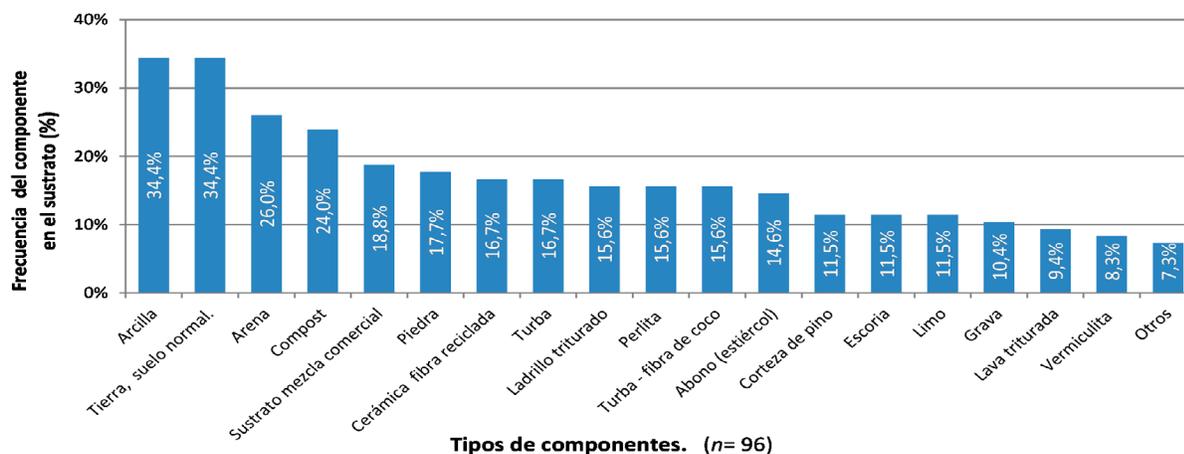


Figura 7 | Componentes del sustrato más usados en techos verdes.

A partir de la información consolidada se identificaron cerca de 40 tipos de materiales diferentes usados comúnmente en la construcción de techos verdes, de los cuales en la Figura 8 se presentan los (13) materiales más usados en la de fabricación de capas de techos verdes.

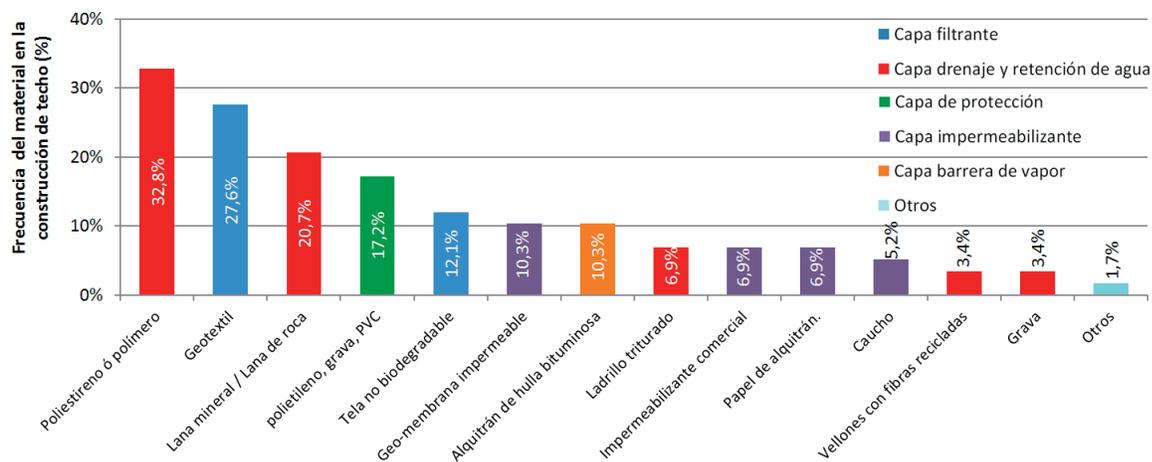


Figura 8 | Materiales más usados en la de fabricación de las capas de techos verdes.

Los materiales de construcción más comunes para techos verdes se clasifican en tres grupos: i) Poliestireno, polímero y lana mineral para la adecuación de drenajes; ii) geo-textiles para capas de telas no biodegradables (fibras permeables sintéticas como polipropileno y poliéster) (Ballester *et al.*, 2000); iii) geo-membranas para recubrimientos impermeables y flexibles (polietileno de alta densidad HDPE, polipropileno, PVC, etc.) (Portaluppi, 2014).

En la Figura 9 se detalla los materiales construcción más usados en una estructura de techos verdes, donde se identifican materiales como madera, PVC, fibrocemento y aluminio para la construcción de la bandeja donde ira alojado el techo verde y materiales como concreto, hierro o metal de alguna clase para los soportes de los montajes.

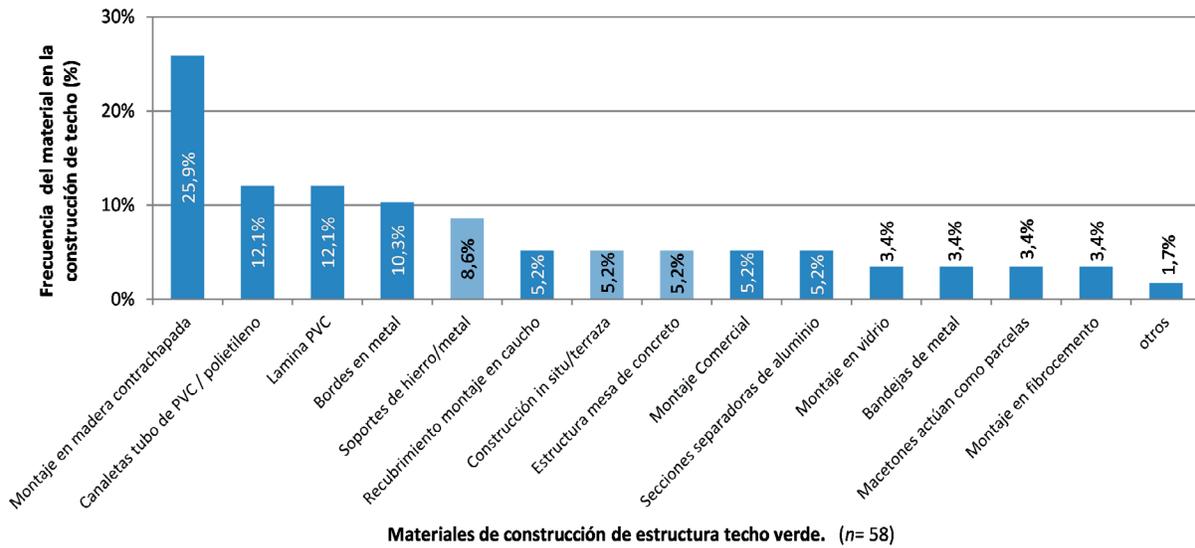


Figura 9 | Materiales de construcción más usados en el soporte y montaje de techos verdes.

4. Parámetros de calidad del agua considerados en la temática de techos verdes

En la Figura 10 se presenta la relación de artículos que consideraron diferentes parámetros de calidad de agua lluvia en techos verdes. El parámetro más considerado es el *pH*, seguido de fósforo total (*PT*), nitratos (*NO₃*) y *conductividad*. Los elementos arsénico (*As*), boro (*B*) y cobalto (*Co*) son los menos comunes en el análisis de calidad de aguas.

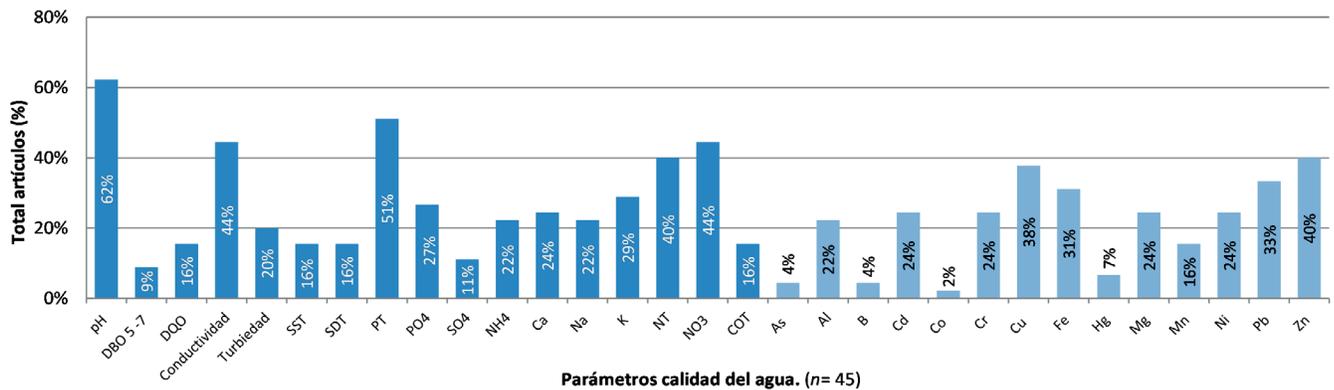


Figura 10 | Principales parámetros de calidad del agua considerados en la investigaciones asociadas a techos verdes.

5. Potencial Hidrógeno – pH

Los análisis realizados a la escorrentía de los techos verdes muestran la capacidad de estos sistemas para neutralizar la acidez o basicidad del agua precipitada. Si el valor de *pH* de la precipitación es alto (básico), al pasar por el sistema su valor disminuirá, valores de 8.3 de entrada disminuyen hasta 7.3 en un techo extensivo (Vijayaraghavan *et al.*, 2014). Un caso contrario es el del estudio realizado en la ciudad de Sigma Aldrich (India) en donde el valor aumentó desde 2.5 de entrada completamente ácido a un valor de salida de 5.0 (Kuppusamy *et al.*, 2015). En los estudios revisados desde el 2008 se encontró que uno de los objetivos principales es justamente la neutralización del *pH* en las aguas lluvias, tendencia que es presentada en la Figura 11.

Este estudio identificó dos formas típicas en las cuales se llevaron a cabo los análisis en las unidades experimentales referidas en cada una de las investigaciones revisadas, detallas así: *Precipitación*: se obtuvieron datos de *pH* de entrada y salida del agua lluvia después de haber pasado por el sistema o unidad experimental de techo verde, *Prueba*: se obtuvieron datos de *pH* de entrada y salida, (datos que se obtuvieron a partir de pruebas en columna o simulador de un techo verde y/o muestras de agua con concentraciones conocidas). Adicionalmente se definieron dos grupos de acuerdo al comportamiento del *pH* en techos verdes, así; i) *Aumentó*: Entrada *pH* ácido, salida *pH* cercano a neutro. ii) *Disminuyó*: Entrada *pH* básico, salida *pH* cercano a neutro. Teniendo en cuenta el caracterizado experimental de “*Precipitación y Prueba*” se identifican comportamientos importantes en *pH* según las investigaciones revisadas, con una media general de 6.93.

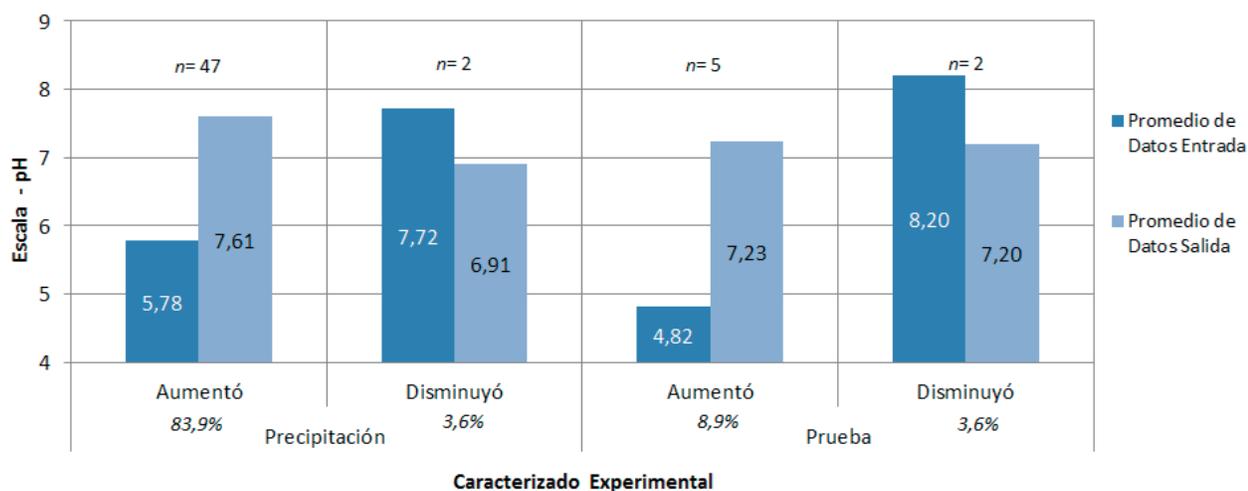


Figura 11 | pH - Registro datos promedio de entrada y salida según forma experimental.

6. Parámetros estándar en calidad del agua en techos verdes.

En la Figura 12 se presenta el comportamiento de los techos verdes en los principales parámetros de calidad del agua, con base a reducciones o incrementos en las concentraciones de un determinado elemento.

Con el objetivo de hallar incrementos o reducciones en la escorrentía, respecto al agua lluvia que ingresa en el techo verde se extrajeron y categorizaron los resultados promedio de las concentraciones iniciales y finales de parámetros de calidad del agua en las unidades experimentales encontradas en las publicaciones revisadas.

Se categorizaron las dos tendencias de mayor interés, así: *Aumentó*: La concentración de salida en el sistema de techo verde es mayor a la entrada; este resultado se expresa en el número de veces promedio que dicha concentración excedió la inicial; *Disminuyó*: La concentración de salida en el sistema de techo verde es menor que en la entrada, este resultado se expresa de manera porcentual (%), es decir el porcentaje promedio en que se redujo la concentración en dicho parámetro. Se han usado escalas diferentes debido a la magnitud de los resultados presentados en cada uno de los casos descritos.

En la Figura 12 se presentan dos escalas cuantitativas “*Aumentó y/o Disminuyó*”, para los principales parámetros de calidad del agua, observando un incremento importante que la concentración de fosfatos (PO_4), turbiedad y calcio (Ca) en las escorrentías. También se evidenciaron eventos en los cuales existió una reducción considerable en las concentraciones de carbono orgánico total (COT), amonio (NH_4) y nitrógeno total (NT).

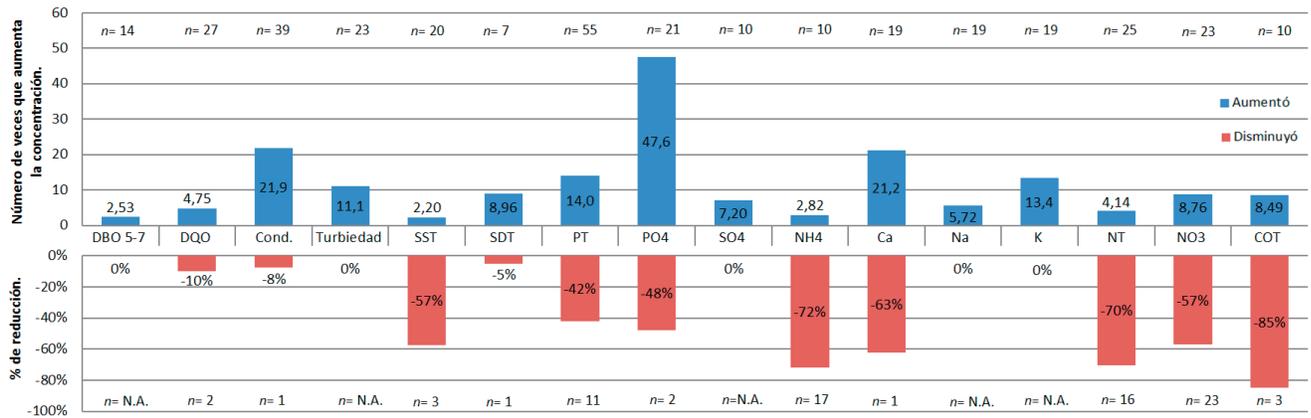


Figura 12 | Resultados promedio Aumentó y/o Disminuyó. Variaciones en la concentración de los principales parámetros estándar de calidad del agua en techos verdes. (N.A.= No aplicaron registros en el parámetro de análisis; n= Muestra: Corresponde al número de unidades experimentales a las cuales se les realizó análisis de algún parámetro de calidad del agua, obteniendo una tendencia para el caso específico).

7. Metales en calidad del agua en techos verdes

En la presentación de resultados obtenidos para metales en la escorrentía de techos verdes, se empleó la misma categorización explicada para la Figura 13. Dentro de los resultados más relevantes en las unidades experimentales (Figura 13), se identificó que los parámetros de magnesio (Mg), aluminio (Al) y arsénico (As) obtuvieron los efluentes con mayor incremento en sus concentraciones, no obstante para la tendencia “Disminuyó”, los techos verdes redujeron la concentración de cromo (Cr), zinc (Zn), níquel (Ni), aluminio (Al), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg) y plomo (Pb), con porcentajes mayores al 72%, lo cual es un resultado bastante favorable en cuanto al aspecto de remoción se refiere.

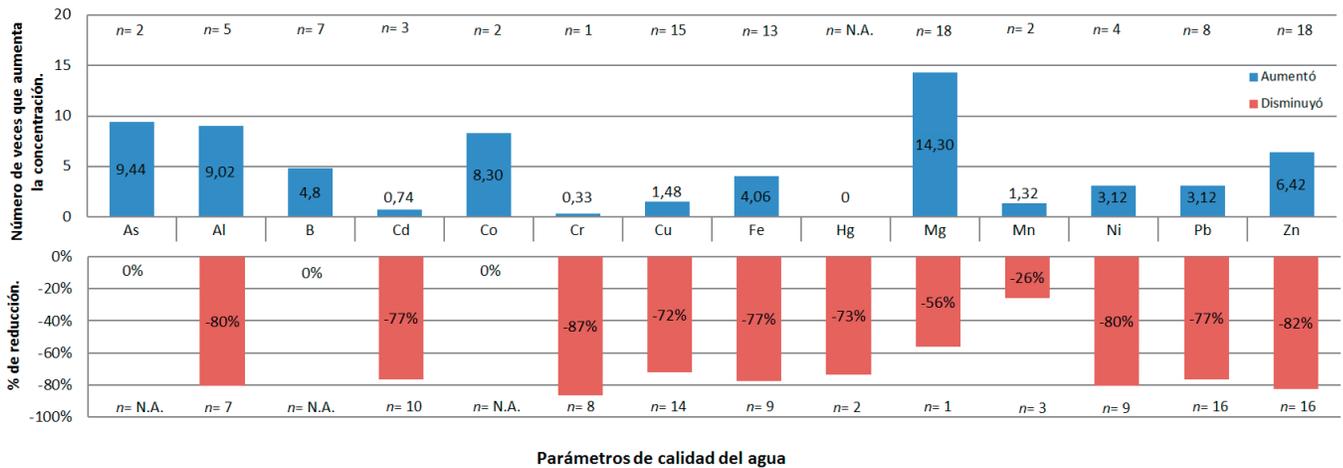


Figura 13 | Resultados promedio Aumentó y/o Disminuyó. Variaciones en la concentración de metales en calidad del agua en techos verdes. (N.A.= No aplicaron registros en el parámetro de análisis).

La categorización de datos empleada en este artículo también permitió establecer tendencias cualitativas. En las Figuras 14 y 15 se relacionan las cinco tendencias típicamente encontradas en techos verdes, con base a resultados obtenidos a través de las unidades experimentales reportadas en las investigaciones revisadas, así como los rangos promedio de las concentraciones referidas para cada parámetro, lo anterior con el fin de esquematizar los rangos de concentración regulares de entrada y/o salida para cada parámetro en calidad de agua.

8. Temporadas con los mejores resultados para la mejora de la calidad del agua en techos verdes

Fue posible establecer que en los experimentos revisados en el actual estudio, existió un periodo de ensayo o estabilización de la unidad experimental o techo verde, cuyo lapso de tiempo promedio fue de 10 meses, de acuerdo a la información analizada en cada uno de los artículos científicos, tiempo empleado para que el techo verde pudiera alcanzar los mejores resultados en cuanto a calidad de agua se refiere. De acuerdo a los resultados registrados en cada una de las unidades experimentales, la autoría de cada artículo expuso la temporada del año que más benefició la calidad de la escorrentía en el techo, en la Figura 4 se observa la frecuencia con la que los autores refieren la mejor temporada del año, de acuerdo a sus pruebas experimentales; de este manera en verano se encuentran los mejores porcentajes de remoción de contaminantes en la escorrentía, toda vez que los tiempos de retención del agua en los techos verdes son menores debido al ciclo del agua; así mismo la tendencia infiere que la calidad del agua lluvia se reduce en el periodo de invierno de cada año.

9. Configuración “típica” en techos verdes

Como resultado, se identificaron tendencias definidas para un techo verde “típico” teniendo en cuenta la estructura de los techos verdes experimentales, el cual estaría descrito con la siguiente configuración: un techo de tipo extensivo, incorporado en un montaje de madera o PVC en forma de caja, cuyas dimensiones son de 1.56 (m) de largo y 0.98 (m) de ancho sobre un soporte de hierro o metal, este techo sería acondicionado con su respectiva capa vegetación incluyendo variedades de especies de *Sedum* ssp como *S. Acre*, *S. Album*, *S. Spurium*, *S. Sexangulare* y *S. Reflexum*; la profundidad del sustrato sería de 10 (cm) y es una mezcla cuyo 80% son compuestos inorgánicos como arcilla, arena, tierra, piedra común y perlita, así mismo un 20% de mezcla de compuestos orgánicos tales como compost, turba, fibra de coco y abono; la capa filtrante estaría hecha en geo-textil o en telas no biodegradables, por otra parte la capa de drenaje y retención de agua es una estructura en forma de cartón de huevos, fabricada en poliestireno, polímero y/o lana mineral; una capa protección anti raíces que está fabricada en polipropileno o PVC blando, el aislamiento del techo es una geo-membrana, que proporciona impermeabilidad a partir de materiales como polietileno de alta densidad HDPE, polipropileno o PVC y por último una capa bituminosa llamada barrera de vapor.

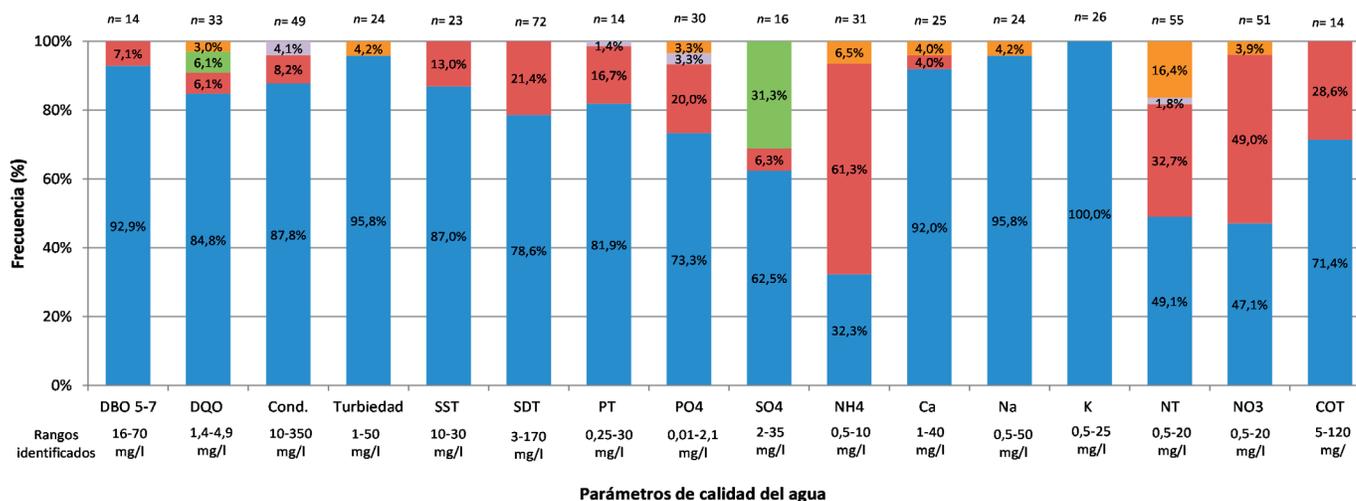


Figura 14 | Tendencias cualitativas en los principales parámetros de calidad del agua en techos verdes. Se categorizaron resultados en cinco tendencias cualitativas posibles, tal y como fueron referidas en los artículos científicos de revisión, para cada una de las unidades experimentales reportadas. ■ El techo no afecta a la concentración del elemento. ■ No hay tendencias identificables. ■ Lluvia y/o escorrentía del techo están por debajo del límite de detección. ■ Disminuyó. ■ Aumentó.

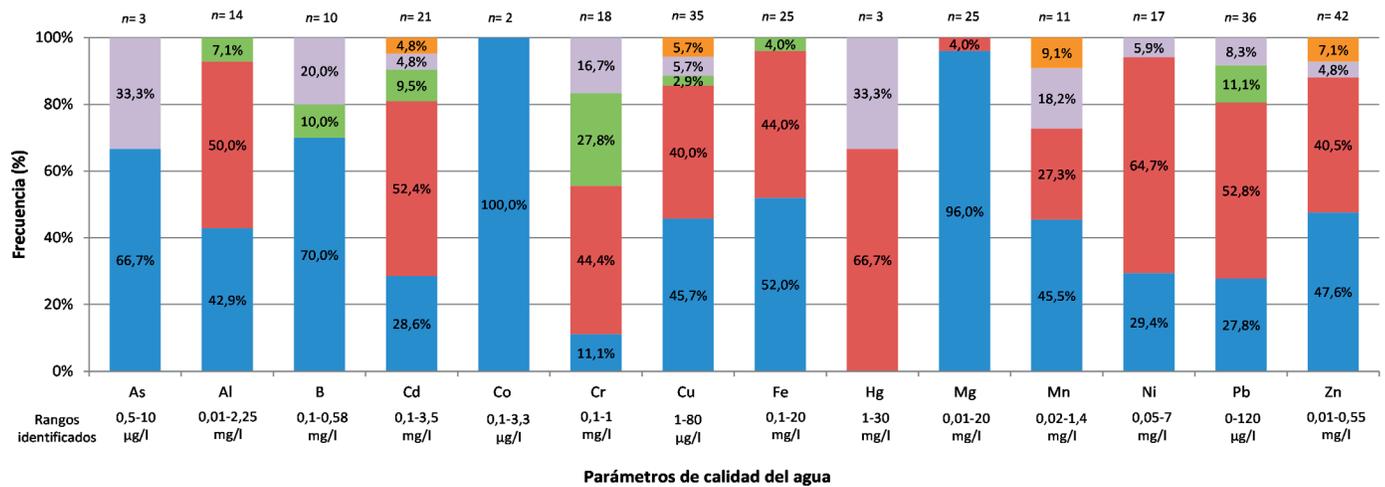


Figura 15 | Tendencias cualitativas para metales en calidad del agua en techos verdes. ■ El techo no afecta a la concentración del elemento. ■ No hay tendencias identificables. ■ Lluvia y/o escorrentía del techo están por debajo del límite de detección. ■ Disminuyó. ■ Aumentó.

DISCUSIÓN

El techo verde de tipo extensivo es el más utilizado en el mejoramiento de la calidad de la escorrentía asociada al agua lluvia. Hathaway *et al.*, (2008) afirman que los techos verdes intensivos son sustancialmente más caros que los de tipo extensivo, lo anterior debido a que demanda entre una y dos veces más volumen del sustrato, implicando un refuerzo adicional en la estructura y en consecuencia mayores costos de construcción. La tendencia en el uso de techos de tipo extensivo está justificada en que éste resulta ser una opción que equilibra aspectos de funcionalidad y bajo costo, lo que se infiere en la frecuencia de uso en techos extensivos, dados a conocer en los resultados del presente estudio.

Los resultados obtenidos en la calidad del agua en techos verdes muestran tendencias a incrementos y reducciones en las concentraciones iniciales de los parámetros analizados en la escorrentía del techo, se puede inferir que esto se debe a combinaciones en los componentes del sustrato y uso de plantas. El compost¹ es uno de los componentes del sustrato de origen orgánico más encontrados en los estudios revisados, a pesar de no haber identificado una tendencia clara, este material parece ser una de las causas directas en el aumento de las concentraciones de parámetros de calidad del agua como turbiedad, *DBO*, *DQO*, *PO₄*, *PT*, *SO₄*, *Ca*, *Na*, *K*, *NH₄*, *NT*, *NO₃* y *COT*. Los anteriores parámetros y compuestos están ligados a ciclos biogeoquímicos en el sustrato y a la descomposición de los diversos componentes del compost.

Los resultados obtenidos muestran que el *pH* en el agua es modificado al paso por el techo verde, los estudios revisados reportaron que la lluvia ácida pasó a tener un *pH* cercano a 7.0, también se identificaron algunos casos de agua lluvia con *pH* básico en los que el *pH* varió a un valor cercano a la neutralidad. Esta revisión bibliográfica confirmó el comportamiento de los techos verdes, al neutralizar el *pH* del agua, esta cualidad confirma esta tecnología como una alternativa viable en la mitigación de la problemática de lluvia ácida en las ciudades.

En diferentes investigaciones un elemento denominado “biocarbón”² fue usado en la mezcla de sustratos experimentales, los monitoreos de calidad del agua de escorrentía indicaron reducción en nutrientes como *PT* y *NT* (Kuoppamäki *et al.*, 2016) y en

¹ Compost: Es un compuesto con contenido alto en material orgánica parcialmente mineralizada y humificada, que puede ser usado como abono orgánico o como sustrato (Soto, 2002).

² Biocarbón: Es la materia orgánica rica en carbono que permanece después de calentar la biomasa bajo la minimización del oxígeno durante un proceso llamado pirolisis (Scholz *et al.*, 2014)

metales como *Pb* (Kuoppamäki & Lehvävirta, 2016). Lo anterior indica que este componente influye en la absorción de algunos elementos contaminantes en el agua.

Componentes inorgánicos utilizados en el sustrato como la vermiculita, la perlita y la turba de coco tienen un efecto positivo en la calidad del agua debido a que son conocidos por la absorción de iones metálicos (Ewecharoen *et al.* 2008; Ghassabzadeh *et al.*, 2010; Malamis *et al.*, 2013). A pesar de lo anterior pueden ser una fuente de sedimentos que aumenta la turbiedad y el color en la escorrentía. A partir de la revisión realizada se confirmó que estos componentes se encuentran dentro de los más utilizados en los estudios. El ladrillo triturado es otro componente del sustrato utilizado en diferentes techos verdes dentro de las referencias consultadas, este material aumenta la porosidad del sustrato y en consecuencia reduce la turbiedad de la escorrentía. Este componente puede contribuir al aumento de concentraciones de elementos como *Ni* y *Cd* así como la concentración de diferentes metales pesados, consecuencia de su desprendimiento del material (Ye *et al.*, 2013).

A partir de la revisión realizada no se evidenció relación contundente que indique que especies de plantas reducen la concentración de metales y/o parámetros físico-químicos en la escorrentía, a pesar de lo anterior existen resultados con especies de (*Sedum linea Thunb (SL)*, *Sedum sarmentosum Bunge (SS)* y *Portulaca oleracea L. (PO)*) que indicaron que la mayoría de las concentraciones de metales pesados son reducidas significativamente en techos verdes (Ye, *et al.*, 2013).

En cuanto a las profundidades en los sustratos de techos verdes revisados se encontró que no existe una medida de profundidad definitiva para techos verdes de tipo extensivo o intensivo, a pesar de lo anterior se identificaron rangos de profundidad a partir de los resultados obtenidos.

Con respecto a la época en la que el techo verde reporta los mejores resultados, la tendencia encontrada muestra que en la época de verano, la calidad del agua en la escorrentía mejora en comparación con los resultados registrados en invierno; esto se debe a que al aumentar el volumen de precipitación, se incrementa la concentración de nutrientes y turbiedad en la escorrentía por el lavado que se genera en el sustrato del techo verde; evento que disminuye el tiempo de retención en el sistema, ocasionando que el techo no tenga un comportamiento regular.

CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica y de los análisis realizados se encontró que los techos verdes de tipo extensivo son los más utilizados para el mejoramiento de la calidad de la escorrentía (Hathaway *et al.*, 2008). En la construcción de un techo verde el área depende del espacio dispuesto para éste, por lo que puede variar desde un lugar extenso hasta una configuración compacta. Para un tipo de techo extensivo el promedio de los módulos utilizados es de 5 unidades, lo cuales se pueden diferenciar entre sí por la composición del sustrato y la vegetación.

Un aspecto relevante es el uso de capas en la configuración del techo verde, el funcionamiento del techo depende de la presencia de estas capas. Se identificaron 8 tipos de capas de uso común: *Vegetación, Sustrato, Capa Filtrante, Drenaje y Retención de Agua, Capa de Protección, Impermeabilizante, Aislamiento Térmico y Barrera de Vapor.*

Dentro de los sustratos, la arcilla es el componente más usado, lo anterior debido a que tiene capacidad de intercambio catiónico, es decir, de retener cationes en su superficie externa a lo cual se le llama adsorción; de esta manera retienen elementos como metales y nutrientes presentes en el agua. El componente de tipo orgánico más común presente en los sustratos es el compost, aunque es empleado por sus bondades como abono, este compuesto disminuye la calidad del agua en la escorrentía del techo verde.

A partir de los análisis realizados, no se encontró una correlación contundente entre el aumento o reducción de concentraciones en parámetros de calidad de agua cuando se consideran factores como mezclas de componentes del sustrato o especies vegetales empleadas, siendo esto una limitación para el estudio. A pesar de lo anterior es posible inferir que: i) Entre más orgánicos son los componentes del sustrato, más aumenta la concentración de los parámetros físico-químicos de calidad del agua. ii) La cantidad de vegetación está asociada con el consumo y remoción de nutrientes como PO_4 y NH_4 . iii) Los metales son retenidos por componentes inorgánicos en el sustrato. Así mismo esta investigación abre la puerta a determinar de forma experimental y concreta la relación anteriormente descrita.

Los parámetros físico-químicos de calidad del agua típicamente monitoreados en montajes de techos verdes y que tienen por objeto el mejoramiento de ésta son: *pH*, *DBO*, *DQO* conductividad, turbiedad, *SST*, *SDT*, *PT*, *PO₄*, *SO₄*, *NH₄*, *Ca*, *Na*, *K*, *NT*, *NO₃* y *COT*. En la mayoría de los artículos revisados, uno de sus objetivos es comprobar la capacidad del techo para neutralizar el *pH* por eso es el parámetro más analizado en las pruebas estudiadas. Se encontró que la eficiencia de remoción máxima fue para *COT* seguida por *NH₄* y *NT* con eficiencias de 85%, 72% y 70% respectivamente. Por otro lado, los metales más estudiados son *Zn*, seguido por *Cu*, *Pb*, *Fe*, *Mg*, *Ni*, *Cr*, *Cd*, *Al*, *Mn*, *Hg*, *B*, *As* y *Co*, donde la máxima remoción se presenta para *Cr* seguida por el *Zn* con eficiencias de 87% y 82% respectivamente.

Desde el punto de vista de calidad del agua, como tendencia general se identificó el aumento de las concentraciones iniciales en parámetros físico-químicos de calidad del agua como *DBO*, *DQO*, *PO₄*, *PT*, *SO₄*, *Ca*, *Na*, *K*, *NH₄*, *NT*, *NO₃* y *COT*; así como una reducción superior al 72% de las concentraciones iniciales de varios metales analizados en el agua.

REFERENCIAS

- Aceves, M. C., Fuamba, M. 2016. Methodology for Selecting Best Management Practices Integrating Multiple Stakeholders and Criteria. Part 2: Case Study. *Water*, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/w8020056>
- Aitkenhead-Peterson, J. A., Dvorak, B. D., Volder, A., Stanley, N. C. 2010. Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas. *Urban Ecosystems*, 14(1), 17-33. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0137-4>
- Alsop, S. E., Ebbs, S. D., Battaglia, L. L., Retzlaff, W. A. 2011. Heavy metals in leachate from simulated green roof systems. *Ecological Engineering*, 37(11), 1709-1717. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.045>
- Ballester, F., Castro, D., Gil, M. 2000. Definición, función y clasificación de los geotextiles. Recuperado 6 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.giteco.unican.es/pdf/publicaciones/AYC30-X-2000.pdf>
- Beck, D. A., Johnson, G. R., Spolek, G. A. 2011. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2111-2118. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.022>
- Beecham, S., Razzaghamanesh, M. 2015. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water Research*, 70, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.015>
- Bengtsson, L., Grahn, L., Olsson, J. 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Hydrology Research An international Journal*, 36, 259-268.
- Berghage, R. D., Beattie, D., Jarrett, A., Thuring, C., Razaeri, F. 2009. *Green Roofs for Stormwater Runoff Control*. Cincinnati. Recuperado a partir de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1003704.txt>
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., Bengtsson, L. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of The Total Environment*, 355(1-3), 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.035>
- Bliss, D. J., Neufeld, R. D., Ries, R. J. 2008. Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. *Environmental Engineering Science*, 26(2), 407-418. <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0186>
- Buccola, N., Spolek, G. 2010. A Pilot-Scale Evaluation of Greenroof Runoff Retention, Detention, and Quality. *Water, Air, Soil Pollution*, 216(1-4), 83-92. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0516-8>
- Buffam, I., Mitchell, M. E., Durtsche, R. D. 2016. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. *Ecological Engineering*, 91, 506-514. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.044>
- Carpenter, C. M. G., Todorov, D., Driscoll, C. T., Montesdeoca, M. 2016. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*, 218, 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.056>

- Chen, C. F., Kang, S. F. 2016. Effects of substrates and plant species on water quality of extensive green roofs. *Applied ecology and environmental research*, 14, 77-91. https://doi.org/10.15666/aer/1402_077091
- Czemiel Berndtsson, J. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36, 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Ewecharoen, A., Thiravetyan, P., Nakbanpote, W. 2008. Comparison of nickel adsorption from electroplating rinse water by coir pith and modified coir pith. *Chemical Engineering Journal*, 137(2), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.007>
- Getter, K. L., Rowe, D. B. 2006. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Ghassabzadeh, H., Mohadespour, A., Torab-Mostaedi, M., Zaheri, P., Maragheh, M. G., Taheri, H. 2010. Adsorption of Ag, Cu and Hg from aqueous solutions using expanded perlite. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 950-955. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.010>
- Government of the District of Columbia (Trad.). 2006. Fachadas y azoteas verdes. Recuperado a partir de <http://anacostiaws.org/green-roofs>
- Gregoire, B. G., Clausen, J. C. 2011. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37, 963-969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>
- Gromaire, M. C., Ramier, D., Seidl, M., Berthier, E., Saad, M., De Gouvello, B. 2013. Impact of extensive green roofs on the quantity and the quality of runoff – first results of a test bench in the Paris region. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/2042/51380>
- Harper, G. E., Limmer, M. A., Showalter, W. E., Burken, J. G. 2015. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. *Ecological Engineering*, 78, 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.004>
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., Ashraf, M. A. 2015. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669-679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>
- Hathaway, A. M., Hunt, W. F., Jennings, G. D. 2008. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51, 37-44.
- Kok, K. H., Sidek, L. M., Chow, M. F., Abidin, M. R. Z., Basri, H., Hayder, G. 2016. Evaluation of green roof performances for urban stormwater quantity and quality controls. *International Journal of River Basin Management*, 14(1), 1-7. <https://doi.org/10.1080/15715124.2015.1048456>
- Kuoppamäki, K., Hagner, M., Lehvavirta, S., Setälä, H. (2016). Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. *Ecological Engineering*, 88, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.010>
- Kuoppamäki, K., Lehvavirta, S. 2016. Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. *Landscape and Urban Planning*, 152, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.006>
- Malamis, S., Katsou, E. 2013. A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms. *Journal of Hazardous Materials*, 252-253, 428-461. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.024>
- Malcolm, E. G., Reese, M. L., Schaus, M. H., Ozmon, I. M., Tran, L. M. 2014. Measurements of nutrients and mercury in green roof and gravel roof runoff. *Ecological Engineering*, 73, 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.030>
- Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., Kirisits, M. J. 2011. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049-2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>
- Minke, G. (2008). Techos verdes Planificación, ejecución, consejos prácticos Recuperado 30 de mayo de 2016, a partir de <http://civilgeeks.com/2016/01/28/manual-de-techos-verdes-planificacion-ejecucion-consejos-practicos>

- Nawazz, R., McDonald, A., Postoyko, S. 2015. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering*, 82, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. 2007. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823-833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- OConnor, T., P. Culligan, T. Carson, S. Gaffin, R. Gibson, R. Hakimdavar, D. Hsueh, N. Hunter, D. Marasco, McGillis, W. 2014. Evaluation of Green Roof Water Quantity and Quality Performance in an Urban Climate. US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-14/180. Recuperado 8 de noviembre de 2016, a partir de <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100K119.pdf>
- Pandula Andrés. 2010. Extensive and intensive flat green roof structures. SZIE-YMMF. Recuperado a partir de http://iti.vgtu.lt/sure/Media/Default/Supplementary_information/Roger4Students/GreenRoofs.pdf
- Perales-Momparler, S., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Andrés-Doménech, I., Andreu Álvarez, J., Jefferies, C. 2014. SuDS Efficiency during the Start-Up Period under Mediterranean Climatic Conditions. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 42(2), 178-186. <https://doi.org/10.1002/clen.201300164>
- Portaluppi, L. 2014. Información de geomembranas de PVC y HDPE. Recuperado a partir de <http://criarpeces.com.ar/wp-content/uploads/2014/03/Informaci%C3%B3n-de-las-geomembranas.pdf>
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., Kazemi, F. 2014. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. *Science of The Total Environment*, 470-471, 651-659. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.047>
- Rossatto, H., Moyano, G., Cazorla, L., Laureda, D., Meyer, M., Gamboa, P., ... Kohan, D. 2015. Cubiertas vegetadas de tipo «extensivo» eficiencia en la retención del agua de lluvia de distinto tipo de vegetación implantada. Recuperado 31 de mayo de 2016, a partir de http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/publicacionesdc/vista/detalle_articulo.php?id_articulo=10472&id_libro=506
- Rowe, D. B. 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2100-2110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>
- Scholz, S. M., Roberts, K., Lehmann, J., Sembres, T., Whitman, T., Wilson, K. 2014. *Biochar systems for smallholders in developing countries: leveraging current knowledge and exploring future potential for climate-smart agriculture* (No. 88888) (pp. 1-231). The World Bank. Recuperado a partir de <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/188461468048530729/Biochar-systems-for-smallholders-in-developing-countries-leveraging-current-knowledge-and-exploring-future-potential-for-climate-smart-agriculture>
- Schwager, J., Schaal, L., Simonnot, M.-O., Claverie, R., Ruban, V., Morel, J.-L. 2014. Emission of trace elements and retention of Cu and Zn by mineral and organic materials used in green roofs. *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), 1789-1801. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0962-9>
- Seidl, M., Gromaire, M.-C., Saad, M., De Gouvello, B. 2013. Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. *Environmental Pollution*, 183, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.026>
- Soto, J. G. 2002. *Produccion de Abonos Organicos de Buena Calidad*. Corpoica.
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., Smith, C. L. 2014. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. *Environmental Pollution*, 184, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.017>
- Sultana, N., Akib, S., Ashraf, M. A., Abidin, M. R. Z. 2016. Quality assessment of harvested rainwater from green roofs under tropical climate. *Desalination and Water Treatment*, 57(1), 75-82. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1015307>
- Teemusk, A., Mander, Ü. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering*, 30(3), 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.01.009>
- Teemusk, A., Mander, Ü. 2011. The Influence of Green Roofs on Runoff Water Quality: A Case Study from Estonia. *Water Resources Management*, 25(14), 3699. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9877-z>

- Van Mechelen, C., Dutoit, T., Hermy, M. 2015. Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. *Sustainable Cities and Society*, 19, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007>
- Vijayaraghavan, K., Joshi, U. M., Balasubramanian, R. 2012. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Research*, 46, 1337-1345. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.050>
- Vijayaraghavan, K. 2016. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Vijayaraghavan, K., Joshi, U. M. 2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution*, 194, 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021>
- Vijayaraghavan, K., Joshi, U. M. 2015. Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. *Landscape and Urban Planning*, 143, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.006>
- Vijayaraghavan, K., Raja, F. D. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, 63, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>
- Vijayaraghavan, K., Raja, F. D. 2015. Interaction of Vermiculite with Pb(II), Cd(II), Cu(II) and Ni(II) Ions in Single and Quaternary Mixtures. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 43(8), 1174-1180. <https://doi.org/10.1002/clen.201400423>
- Whittinghill, L. J., Hsueh, D., Culligan, P., Plunz, R. 2016. Stormwater performance of a full scale rooftop farm: Runoff water quality. *Ecological Engineering*, 91, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.047>
- Wilkinson, S., Lamond, J., Proverbs, D. G., Sharman, L., Heller, A., Manion, J. 2015. Technical considerations in green roof retrofit for stormwater attenuation in the Central Business District. *Structural Survey*, 33(1), 36-51. <https://doi.org/10.1108/SS-07-2014-0031>
- Ye, J., Liu, C., Zhao, Z., Li, Y., Yu, S. 2013. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 55, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.012>
- Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., ... Liu, J. 2015. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*, 144, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>