

# Revisión sobre el papel de los techos verdes en la remoción de carbono atmosférico en el neotrópico

Wilson A. Ramírez<sup>1</sup> & Tomás Bolaños-Silva<sup>2</sup>

Facultad de Administración y Gestión Ambiental, Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia

Fecha de recepción: 15/03/2012. Fecha de aceptación: 15/06/2012.

## Resumen

Con el fin de profundizar en los efectos que tienen los techos verdes en la remoción de CO<sub>2</sub> atmosférico, se hizo una revisión de las publicaciones científicas relacionadas con los techos verdes. Se encontraron más de 50 artículos relacionados, siendo Norteamérica y Asia las regiones con mayor producción en ese campo de conocimiento. El mayor número de publicaciones está relacionado con los efectos térmicos de las cubiertas verdes en las edificaciones; en menor porcentaje, se analizan los beneficios urbano-ambientales de los techos verdes; y finalmente, en unos cuantos, se discute la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> en techos verdes, a partir de la poca información publicada. A partir de la revisión se propone llenar el vacío importante en investigaciones relacionadas con el efecto de techos verdes en ciudades del neotrópico, y de investigaciones dirigidas a evaluar el secuestro de carbono por parte de éstas cubiertas.

## Palabras clave

Envolventes verdes, remoción de CO<sub>2</sub>, secuestro de carbono.

## The role of green roofs on atmospheric carbon removal in the neotropics. A revision

### Abstract

*With the purpose of further determining the impact of green roofs on removing atmospheric CO<sub>2</sub> the following is a thorough revision of scientific publications related to the issue. More than fifty documents were found, the greater part from North America and Asia as main contributors to this field of knowledge. The majority of them relate to thermal outcomes of green roofs on buildings, a lesser percentage deal with analyzing urban/environmental benefits of green roofs, and just a few discuss CO<sub>2</sub> absorption capacity of green roofs based on already-published information. Thenceforth the mentioned revision, the intention is to fill in the gaps with studies about the role of green roofs in neotropical cities, as well as researches aimed to evaluate carbon retention on that specific type of roofing.*

### Keywords

*Green building envelopes, CO<sub>2</sub> removal, carbon retention.*

.....

<sup>1</sup>Biólogo, Pontificia Universidad Javeriana, M.Sc en Biología Universidad Autónoma de Barcelona, PhD en Biología opción Ecología, Universidad Autónoma de Barcelona.  
wilsonramirez@gmail.com

<sup>2</sup>Biólogo, Pontificia Universidad Javeriana, Magister en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana.  
tomas-bolanos@unipiloto.edu.co



**Arriba.** Techo verde, Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá.

## Introducción

A partir de los cambios ambientales a nivel global, que sin lugar a dudas afectan a las condiciones de las ciudades, se han generado una gran cantidad de acciones tendientes a la búsqueda de mejores condiciones urbanas que repercutan en la calidad de vida de los habitantes urbanos y la relación con los ecosistemas circundantes, como la utilización de corredores naturales urbanos, los estudios sobre biodiversidad urbana y la utilización de especies nativas en techos verdes (Butler et al, 2012; Vergnes et al, 2012; Patón et al, 2012; Pellissier et al, 2012; Puppim de Olivera et al, 2011; Maclvor & Lundholm, 2011); así como cambio climático, efectos de isla de calor urbano, gases de efecto invernadero y políticas urbanas (Zhang et al, 2012a; Zhang et al, 2012b; Gioli et al, 2012; Lehmann, 2012; Ramalho & Hobbs, 2012; Millard-Ball, 2012; Strohbach & Haase, 2012; Susca et al, 2011; Li et al, 2010), entre otros importantes estudios que evidencian el papel de la toma de decisiones acertadas en la industria de la construcción en cuanto a la integración del medio natural con el entorno construido.

Sin embargo, en algunas regiones, más allá de la funcionalidad, los techos verdes se convierten en una moda y solamente cumplen funciones netamente de ornato, lo cual no permite una correcta integración de lo natural con lo construido. Actualmente muchas empresas en Colombia ofrecen la opción de incluir los techos verdes en sus construcciones,

sin importar su real funcionalidad. Muestra de eso es que la mayoría de las empresas, ofrecen como beneficios de los techos verdes la captura de CO<sub>2</sub>, como medio para la mitigación del cambio climático, sin tener estudios serios que respalden esta afirmación. El artículo presenta una revisión sobre los trabajos realizados en techos verdes y su relación con la captura y retención de carbono, específicamente en zonas tropicales.

## Definición de techos verdes

De una manera pragmática los techos verdes pueden considerarse como una serie de plantas creciendo en los techos de las construcciones (Rowe, 2011), desde un punto de vista más técnico, es una tecnología para el techado de una construcción en la cual las plantas son consideradas como un material importante (Getter & Rowe, 2008), estos techos verdes, proveen algunos beneficios ecológicos, económicos y sociales como el manejo de aguas de tormenta, conservación de la energía, mitigación de los efectos de isla de calor urbana, incremento en la duración de las cubiertas, mitigación del ruido y la contaminación del aire y el incremento de la biodiversidad urbana, adicionalmente, pueden proveer de un entorno más amigable y estético para los lugares de trabajo y vivienda (Rowe, 2011; Getter et al, 2009; Getter & Rowe, 2008).

De acuerdo con su función, los techos verdes se agrupan en dos categorías principales: intensivos y extensivos. Los techos verdes intensivos están asociados con jardines en las cubiertas, requieren profundidades considerables del sustrato, trabajos de expertos en techos verdes y vegetación, mantenimiento, irrigación entre otros; mientras que los techos extensivos utilizan capas de suelo relativamente delgadas, están pensados para requerir mínimo mantenimiento y en lo posible que sean auto sostenibles (Bianchini & Hewage, 2012). Los techos verdes pueden incluir arbustos y árboles, para tratar de emular el paisaje que se encuentra a nivel del

suelo, pero esta situación requiere de un alto mantenimiento y profundidades del sustrato mayores a 15 cm, lo cual incrementa el peso de la cubierta y cambia las condiciones de la construcción en cuanto a los costos finales (Getter et al, 2009).

El CO<sub>2</sub>, contrario a lo que la mayoría pueda pensar, es indispensable para la vida en el planeta. La fotosíntesis, con la captura de CO<sub>2</sub> y la liberación de oxígeno, se constituye en la principal fuente de incorporación y almacenamiento de energía y en la base de todas las redes alimentarias. Por lo tanto, la vegetación es muy importante en la estabilización de la composición de la atmosfera, la regulación de los ciclos hidrológicos y climáticos y la protección de los suelos (Izco et al, 1997). Infortunadamente, las actividades humanas, como la deforestación o el uso de combustibles fósiles, han incrementado significativamente el promedio de contenido de CO<sub>2</sub> en la atmosfera, desde el nivel anterior a la revolución industrial (280 ppm), hasta el actual (380 ppm); y las predicciones del *Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC*, para finales del siglo actual, son de 700 ppm (Yin et al, 2010).

Aunque se adjudica un gran porcentaje de las emisiones de CO<sub>2</sub> a las áreas urbanas (Yin et al, 2010; Churkina, 2008; Strohbach et al, 2012), a partir del metabolismo urbano —consumo de energía, transporte, transformación del suelo de áreas naturales a zonas construidas—, la mayoría de los estudios sobre las dinámicas del CO<sub>2</sub> se orientan a comprender el ciclo del carbono en la tierra, a partir de la estimación de los flujos en bosques, pastizales y cultivos, pero se omiten las áreas urbanas (Strohbach et al, 2012; Churkina, 2008).

Los techos verdes se han adoptado frecuentemente como estrategia para mitigar el efecto de isla de calor en las ciudades, y para ahorros energéticos, por su capacidad de regular la temperatura interior de las edificaciones, pero no se ha profundizado en su papel para la mitigación del cambio climático. Si bien, utilizar techos verdes puede disminuir el consumo

energético de aire acondicionado o calefacción, reduciendo el dióxido de carbono generado en las centrales de producción de electricidad, la captura de CO<sub>2</sub>, en ese sentido, no es clara; pero puede convertirse en un potencial relevante para el secuestro de carbono urbano (Getter et al, 2010).

## Importancia de las publicaciones científicas

En la revisión se incluyeron artículos encontrados en revistas arbitradas internacionales, de amplia difusión a nivel mundial a través de bases de datos como ISI, *Science Direct* y Scopus, con el objetivo de maximizar la credibilidad y rigurosidad científica de los análisis posteriores. A partir de una revisión general sobre el tema, se encontró la siguiente información relacionada con techos verdes.

## Análisis de la recopilación de información en techos verdes

El uso de techos verdes se ha venido incrementando en las grandes urbes a nivel global y nacional. Existen muchas preguntas asociadas a ese tipo de estructuras, que han ocasionado una avalancha de estudios científicos y publicaciones que abordan el tema desde varias perspectivas. La revisión bibliográfica realizada tuvo como objetivo revisar artículos de revistas indexadas, que toquen el tema de los techos verdes desde el punto de vista ambiental, principalmente desde la utilidad que ese tipo de cubiertas puede ofrecer como herramienta para la captura y la remoción de gases atmosféricos en zonas urbanas. La revisión de literatura se limitó principalmente al presente siglo, época en la que el tema de los techos verdes urbanos ha cobrado mayor relevancia. Para la revisión de información se usaron varios de los motores de búsqueda de bases de datos científicas, limitando la búsqueda a los temas de interés mencionados anteriormente, exclusivamente en revistas indexadas.

Aunque la lista de países donde se han desarrollado estudios relacionados con techos verdes parece ser bastante amplia (ver figura 1), se observan: una marcada participación de países altamente desarrollados, como Estados Unidos, Canadá, China e Inglaterra; pocos aportes de países tropicales como Singapur, Tailandia y Taiwán; y escasos aportes en países suramericanos, representados únicamente por Brasil.

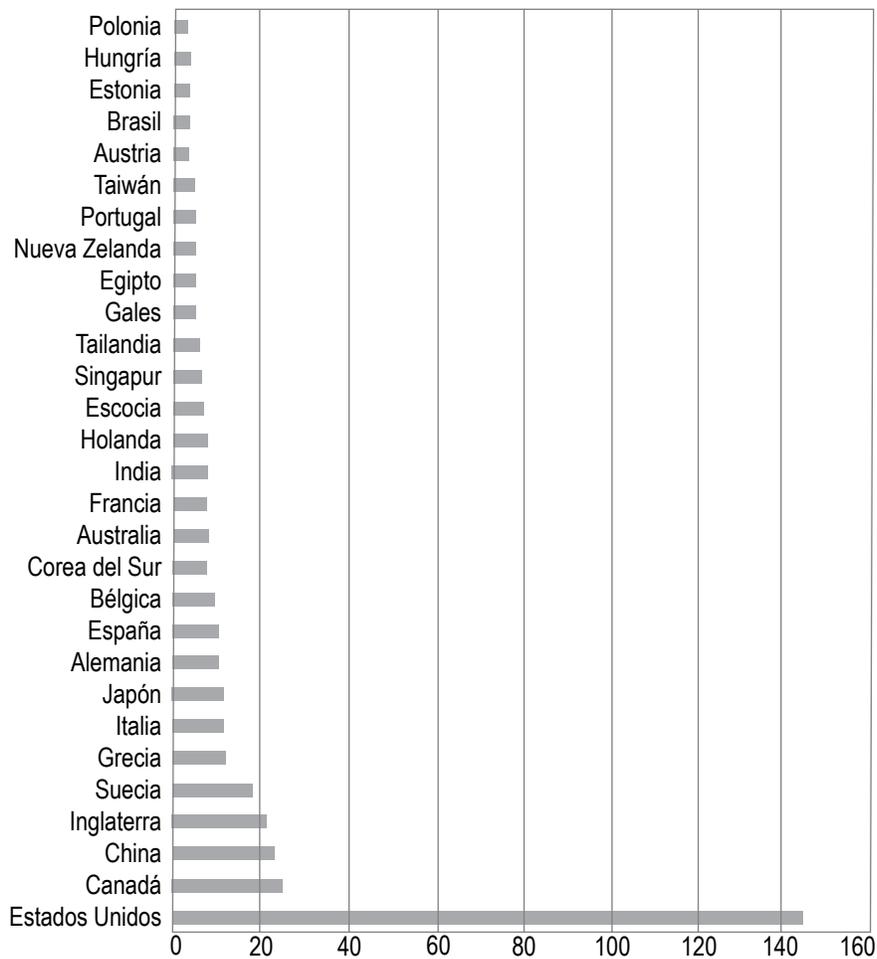
En la figura 2 se observa cómo el número de estudios y publicaciones sobre techos verdes han venido incrementándose paulatinamente en la última década, cobrando un inusitado crecimiento en los años 2010 y 2011.

Las investigaciones y publicaciones en torno al tema de los techos verdes, se relacionan con diversas áreas temáticas, destacándose la ingeniería, la ecología y las ciencias ambientales, y la arquitectura (ver figura 3).

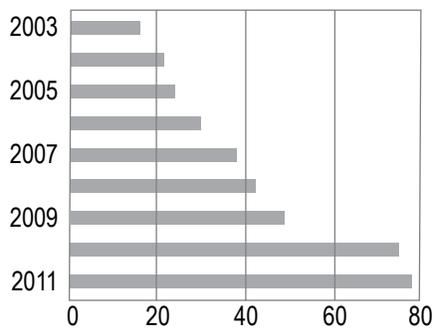
De la revisión total de estudios asociados a techos verdes, se seleccionaron más de 50 artículos publicados entre 2003 y 2011, y se clasificaron en tres líneas principales: i) efectos sobre obras arquitectónicas: aislamiento térmico y acústico, tipos de sustratos, y tipos de plantas empleadas; ii) efectos ambientales a nivel urbano; y iii) contribución en la remoción de gases atmosféricos en las ciudades y posible mitigación del cambio climático. Línea temática en la que se hizo énfasis por ser la que originó la revisión. A continuación se hace un análisis de las publicaciones correspondientes a estos tres grupos.

## Techos verdes y arquitectura

El principal tema en el que se han publicado estudios científicos recientes sobre techos verdes, es el de sus efectos directos sobre obras arquitectónicas, 27 artículos (51% de las publicaciones revisadas) se relacionan con ese tema. Una revisión interesante alrededor del incremento del uso de techos verdes en las ciudades, y la oleada de políticas e incentivos



**Figura 1.** Número de artículos sobre techos verdes, publicados por país. Fuente: ISI Web of Knowledge.



**Figura 2.** Número de artículos publicados por año relacionados con techos verdes. Fuente: ISI Web of Knowledge.

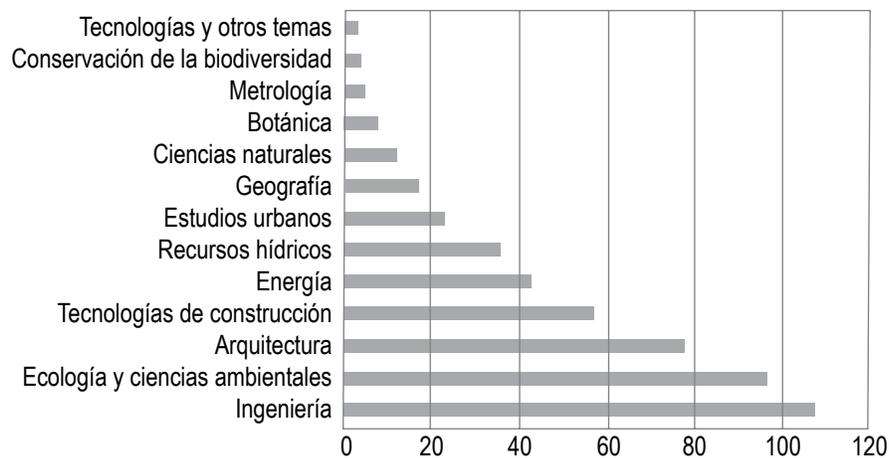


Figura 3. Número de artículos sobre techos verdes, relacionados con diferentes áreas temáticas. Fuente: ISI Web of Knowledge.

gubernamentales que se han dado últimamente en países desarrollados, para su fomento, la hace Taylor (2007). El tema más recurrente en los documentos publicados está relacionado con las propiedades de aislamiento térmico que proporcionan las cubiertas verdes en las edificaciones, por lo general asociado a la reducción del efecto de isla de calor de las grandes urbes (Cai et al, 2011; Susca et al, 2011). Varios estudios destacan la alta capacidad de los techos verdes en la reducción de las fluctuaciones de temperatura, diarias y estacionales, en las construcciones ubicadas en países templados, y a la vez, subrayan el papel de los techos verdes en la reducción del consumo energético debido a equipos de refrigeración o calefacción (Niachou et al, 2001). Algunos estudios han demostrado una reducción térmica hasta del 40% en épocas de verano en países templados (Spala et al, 2008). Cuando se analizan los principales factores aislantes de los techos verdes se suele considerar como principal factor aislante el sustrato sobre el que crecen las plantas (Getter et al, 2009); sin embargo, algunos estudios han revisado el papel de la biomasa vegetal como factor relevante en el aislamiento, en este sentido Jim (2011), ha comparado diferentes coberturas vegetales (pastos, hierbas y arbustos) y describe el papel vital que juega la vegetación, tanto en cantidad como en estructura, en el aislamiento térmico

de los techos verdes, arrojando como resultado una mayor eficiencia en la cobertura de pastizal en la refrigeración diurna del techo verde. El tipo de cubierta es una variable importante también, siendo las de tipo extensivo las que pueden llegar a jugar un papel importante en la reducción de la temperatura diaria máxima del aire, con valores de hasta 0,7 °C a 10 cm de altura (Jim & Peng, 2011), que aunque parecen valores bajos, aportan a la reducción del efecto de isla de calor en grandes urbes.

Otro análisis en la misma línea, pero en fachadas verdes, revela la capacidad de aislamiento térmico de este tipo de fachadas (Wang et al, 2007; Köhler, 2008). Estudios más recientes han obtenido valores de aislamiento térmico hasta del 41% en fachadas verdes, comparadas con fachadas de cristal (Wong et al, 2009; Wong et al, 2010). Se destaca el estudio de Hien et al (2007), donde se evalúa la capacidad de aislamiento térmico de las fachadas verdes, pero en este caso en climas tropicales, con resultados similares al anterior.

En cuanto a la contaminación por ruido en las ciudades, ya se ha generado información científica que relaciona los techos verdes con su capacidad en el aislamiento acústico, y en ese sentido, se ha comprobado que tienen propiedades aislantes. Cuando se analizan las variables que generan el

aislamiento acústico, la profundidad y el tipo de sustrato de un techo verde no son las determinantes, por el contrario, el follaje total (entendido como el número total de hojas) tiene un efecto reductor del ruido en plantas densas, hasta de 4 kilohertzios (Yang et al, 2011).

Otro aspecto que concierne a los techos verdes en el campo de la arquitectura, es el peso asociado al sustrato y la biomasa, que pueden generar sobrecargas en la edificación. Debido a ello, se propone por lo general el uso de sustratos poco compactos y muy bien drenados, lo que se logra por la inclusión de materiales gruesos convencionales como gravillas livianas tipo vermiculitas, arcillolitas, etc. Recientemente se ha propuesto en Europa el uso de fragmentos de caucho, los cuales, se ha demostrado, tienen la misma capacidad de drenaje y de aislamiento térmico (Vila et al, 2011), sin embargo, en ese documento no se mencionan posibles efectos residuales sobre el desarrollo de las plantas, siendo esta una necesidad futura de investigación. Otra propuesta interesante alrededor del uso de sustratos ligeros, es el uso de lodos de depuradora incinerados, los cuales han sido ensayados en zonas tropicales demostrando una capacidad de aislamiento térmico hasta del 84%, y cuando han sido irrigados dos veces por semana, ese porcentaje se incrementa hasta el 92%. Sin embargo, el uso de estos materiales provenientes de depuradoras debe ser revisado con cuidado, ya que algunos estudios han demostrado efectos negativos de estos lodos en el follaje de especies herbáceas como *Brassica rapa* y *Lolium perenne* (Ramírez et al, 2008).

Un aspecto de importancia general en el diseño de los techos verdes, es la selección de especie, pues de la adecuada selección depende su éxito. Las especies vegetales plantadas son factor determinante en cuanto a la capacidad de aislamiento térmico y acústico logrado, se relacionan estrechamente con los beneficios ambientales y ecológicos que generan, e inciden en los costos de funcionamiento de las edificaciones. Una de las debilidades de los techos y

las fachadas verdes, es el costo del mantenimiento de la vegetación, sin embargo, se debe considerar hasta dónde estas inversiones se recuperan gracias al ahorro en consumo de energía para calefacción y/o refrigeración.

Una alternativa frente al costo del mantenimiento de la vegetación, es la selección de especies de alta tolerancia. Emilsson (2008) ha estudiado el establecimiento exitoso de algunas especies, en periodos de tres años, con mínimo mantenimiento. Por su parte, Getter & Rowe (2008) también han estudiado en profundidad el tema de la selección de especies para Norteamérica. Este es un punto álgido en cuanto a la necesidad de investigación en países tropicales, donde las condiciones climáticas y altitudinales obligan a readaptar el uso de especies locales, sin embargo en esta revisión no se encontraron estudios científicos relacionados con ese tema.

Finalmente, una guía muy interesante que analiza la aplicación y los usos de los techos verdes fue desarrollada por Hsieh et al (2010), allí se ilustra el proceso de desarrollo de los techos verdes, las técnicas existentes, y un subcapítulo interesante relacionado con futuras investigaciones.

## Techos verdes a escala urbana

Existe amplia información relacionada con las ventajas a escala urbana que ofrece el uso de techos verdes, 16 artículos (30% de las publicaciones revisadas) están dedicadas a ese tema. Se destaca el desempeño de los techos verdes en el funcionamiento ecológico de las urbes, como posibles vehículos de intercambio de flora y fauna, y el papel que pueden llegar a jugar a escala urbana como elementos de conectividad (Oberndorfer et al, 2007). Autores como Getter & Rowe (2006), destacan las ventajas de las cubiertas verdes como factores de mantenimiento de calidad ambiental en urbes con alteraciones cada vez mayores. En esa misma línea, Clark et al (2008), han corroborado los beneficios económicos y ambientales que los techos verdes

ofrecen en la reducción de factores como el gasto energético y la contaminación, y además, en la captación de aguas lluvias.

Actualmente se ha usado en ciencia ampliamente el concepto de bienes y servicios ambientales, concepto que se introdujo inicialmente por los Objetivos del Milenio MEA, por sus siglas en inglés. Los servicios que presta la naturaleza son vitales para los seres humanos, sin embargo, en las urbes estos servicios se ven en ocasiones alterados, Niemelä et al (2010), han propuesto que los techos verdes pueden jugar un papel interesante en la provisión de servicios sirviendo como sumideros de CO<sub>2</sub> y por tanto, como mitigadores en algún porcentaje del cambio climático, sin embargo el porcentaje de cobertura de los mismos es relevante en el papel que juegan como prestadores de servicios ambientales. Este tema se tocará más adelante.

Las consideraciones relacionadas con los factores ambientales, geográficos y florísticos donde se van a implantar los techos verdes son muy importantes, y estas variables deben ser tenidas en cuenta antes del diseño de la cubierta. Este tema se analiza para la región Australiana, donde se ponen sobre el papel las oportunidades y barreras que puede tener el uso de los techos verdes, bajo condiciones climáticas especiales y con pocos estudios científicos locales que respalden su uso (Williams et al, 2010). El escenario de pocos estudios y condiciones abióticas especiales, se da en países tropicales donde es necesario reevaluar las propuestas europeas y norteamericanas, buscando readaptarlas a las condiciones locales, esto incluye considerar el clima, el suelo y sobre todo el uso potencial de ciertas especies vegetales no nativas.

Adicionalmente, se considera que los techos verdes pueden generar beneficios psicológicos, cuando son usados como jardines de sanación, tal es el caso de las pruebas realizadas en campus universitarios de Hong Kong, donde se corroboró el papel positivo que podrían jugar estas cubiertas en el ánimo de los



**Arriba.** Techo verde, Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá.

estudiantes (Lau & Yang, 2009). Finalmente, existe una importante revisión de literatura relacionada con techos verdes en Norteamérica que fue realizada en 2010 por Dvorak & Volder, la cual puede ser una referencia interesante de estudios de caso para países con estaciones.

## Techos verdes y remoción de contaminantes atmosféricos

El factor relacionado con techos verdes que más interesa en este estudio, y que ha impulsado esta revisión, es el papel que juegan en la remoción de CO<sub>2</sub> atmosférico. En este sentido la literatura científica encontrada en la revisión no es amplia, sólo 8 artículos (15%). A pesar de ser pocos los estudios relacionados con el tema, las preguntas de investigación y sus enfoques metodológicos son variados e interesantes.

Pocos estudios se han orientado a describir el papel de la vegetación urbana en las dinámicas del CO<sub>2</sub>. Uno de los más claros al respecto es el de Yin et al (2010), en el cual se propone un modelo para el balance del oxígeno y carbono urbano (UCOB - *urban carbon and oxygen balance*), el cual se basa en la combinación del sistema natural, el sistema social

y la evaluación del sistema que se ha construido; como principales aportes, este trabajo muestra que la vegetación y su servicio de captura de CO<sub>2</sub> y liberación de oxígeno no pueden satisfacer a la población urbana, en este sentido se necesitan 9.6 veces el área de la ciudad en vegetación para la captura de CO<sub>2</sub> y 31.49 veces de área de vegetación para proveer el oxígeno consumido por la población. Por su parte, Li et al (2010), aseguran que los techos verdes pueden capturar durante el día una cantidad de CO<sub>2</sub>, que solamente cambiará la concentración de la atmosfera local en un 2%, es importante mencionar que el tema del secuestro de carbono no fue evaluado.

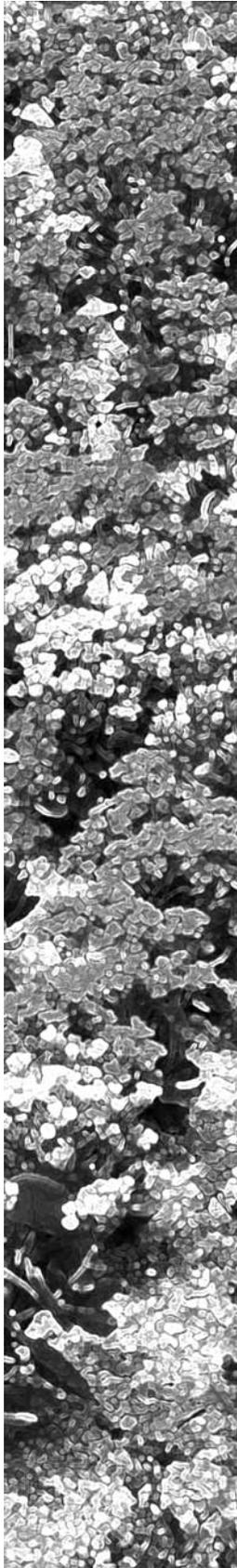
Aunque dentro de las funciones de los techos verdes está el aporte a la mitigación del cambio climático, mediante la reducción de los efectos de isla de calor urbano (Wong & Chen, 2009; Oberndorfer et al, 2007; Roaf et al, 2005), la captura y retención de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, a partir de la utilización de especies vegetales en techos vivos, aun no han sido estudiadas en profundidad (Rowe, 2011). Al parecer, la respuesta al balance global del CO<sub>2</sub> en las ciudades, específicamente en el sector de la construcción, va más allá de la utilización o no de especies vivas en las estructuras, es decir, se necesitan diversas acciones en los procesos constructivos tendientes a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como también, trabajos interdisciplinarios que maximicen la integración y/o generación de nuevos conceptos e ideas para los diseños arquitectónicos (Meggers et al, 2012; Rowe, 2011).

Una revisión completa acerca del papel de los techos verdes como herramientas de remoción de contaminantes discute la incidencia de estas cubiertas en el secuestro de carbono, calidad del agua y contaminación acústica (Rowe, 2011). Sin embargo, la revisión hace énfasis en estudios de países no tropicales, pues el vacío de publicaciones en el trópico sigue siendo latente. Otros estudios se dirigen más a la investigación en la absorción del dióxido de carbono a través del proceso fotosintético, donde se corrobora la eficiencia en la absorción de dióxido de carbono y

monóxido de nitrógeno (Fujii et al, 2005; Jian et al, 2010), esto respalda los resultados de otros estudios donde se ha demostrado una capacidad de absorción de unos 117 ± 13 kg/año por parte de plantas de arborización urbana: *Platanus* sp. (Gratani & Varone, 2007). En este estudio se destaca la importancia de la evaluación de ciertos rasgos funcionales como el área específica foliar (LAI, por su sigla en inglés) y la densidad de madera, como variables robustas para evaluar la remoción y secuestro de carbono en arborización urbana. Estas variables deberían ser la base, para futuros estudios que quieran evaluar la eficiencia de remoción de carbono en techos verdes urbanos, principalmente los intensivos con plantas de leño. Este dato se complementa con otro estudio adicional que ha demostrado que, 20 hectáreas aproximadamente de techos verdes extensivos en Chicago, tienen la capacidad de remover un total de 1675 kg de contaminantes atmosféricos, principalmente ozono (52%) y NO<sub>2</sub> (27%), entre otros, esto equivale a un valor cercano de 85 kg ha/año de contaminantes, estos datos destacan el papel que pueden jugar estas cubiertas en la remoción de contaminantes atmosféricos (Yang et al, 2008). Hay que tener en cuenta que estas mediciones pueden variar dependiendo del tipo de plantas, principalmente su hábito de crecimiento (herbácea vs. arbustiva) y la profundidad del sustrato, donde se ha demostrado que son más eficientes en la remoción de contaminantes los techos extensivos, incluso donde los dominantes sean pastos (Currie & Bass, 2010), y finalmente hay que tener en cuenta la ubicación latitudinal del techo verde (regiones templadas vs. tropicales), en este último aspecto es necesario adelantar estudios de remoción de contaminantes en zonas del neotrópico, con el fin de tener un estimativo de la capacidad que tienen los techos verdes en la reducción de estos gases.

## Conclusiones

Existe actualmente amplia bibliografía científica relacionada con techos verdes, sin embargo los énfasis temáticos están muy relacionados con las edificaciones y los efectos de las cubiertas sobre



ellos, una baja proporción de información está relacionada con los beneficios ambientales de éstos, es relevante incrementar los estudios relacionados con la mitigación de contaminantes atmosféricos, y otros servicios ambientales de mitigación.

La expansión de los techos verdes puede aportar a aumentar el área efectiva de cobertura vegetal urbana, aunque no hay estudios que permitan establecer el papel real de los mismos en cuanto a la captura y secuestro de carbono urbano, debido a los atributos y procesos fotosintéticos de las especies utilizadas en los techos verdes, aunque se presentan algunos desarrollos en otros países y otras latitudes, para el trópico es nula la información al respecto (ver figura 1). Por lo tanto se hace necesario realizar investigaciones sobre el secuestro de carbono en países neotropicales, en plantas nativas.

### Referencias

- ◆ Bianchini, F. & Hewage, K. (2012). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, vol. 48: 57-65.
- ◆ Butler, C.; Butler, E. & Orians, C.M. (2012). Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 11, N° 1: 1-10.
- ◆ Cai, W.; Wu, Z. & Wang, H. (2011). Effect of green roof on urban human settlement and indoor environment for green buildings. 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). Article number 5776322, pages 3102-3105.
- ◆ Churkina, G. (2008). Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modeling*, vol. 216, N° 2: 107-113.
- ◆ Clark, C.; Adriaens, P. & Talbot, F.B. (2008). Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science & Technology*, vol. 42, N° 6: 2155-2161.
- ◆ Currie, B.A. & Bass, B. (2010). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, vol. 11, N° 4: 409-422.
- ◆ Dvorak, B. & Volder, A. (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, vol. 96, N° 4: 197-213.
- ◆ Emilsson, T. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, vol. 33, N° 3-4: 265-267.
- ◆ Hsieh, F.; Ou, S. & Lee, M. (2010). Roof greening technique analysis. *IET Conference Publications*, vol. 2010, N° CP 565: 215-220.
- ◆ Fujii, S.; Cha, H.; Kagi, N.; Miyamura, H. & Kim, Y. (2005). Effects on air pollutant removal by plant absorption and adsorption. *Building and Environment*, vol. 40, N° 1: 105-112.
- ◆ Getter, K.L. & Rowe, D.B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, vol. 41, N° 5: 1276-1285.
- ◆ Getter, K.L. & Rowe, D.B. (2008). Selection plants for extensive green roofs in the United States. *Extension Bulletin E-3047*. Michigan State University.
- ◆ Getter, K.L.; Rowe, D.B.; Robertson, G.P.; Gregg, B.M. & Andresen J.A. (2009).

Carbon Sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, N° 19: 7564-7570.

◆Gioli, B.; Toscano, P.; Lugato, E.; Matese, A.; Miglietta, F.; Zaldei, A. & Vaccari, F.P. (2012). Methane and carbón dioxide fluxes and source partitioning in urban areas: The case study of Florence, Italy. *Environmental Pollution*, vol. 164:125-131.

◆Gratani, L. & Varone, L. (2007). Plant crown traits and carbon sequestration capability by *Platanus hybrida* Brot. in Rome. *Landscape and Urban Planning*, vol. 81, N° 4: 282-286.

◆Hien, N.W.; Yok, T.P. & Yu, C. (2007). Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, vol. 42, N° 1: 25-54.

◆Izco, J.; Barreno, E.; Brugués, M.; Costa, M.; Devesa, J.A.; Fernández, F.; Gallardo, T.; Llimona, X.; Prada, E.; Talavera, S. & Valdés, B. (1997). *Botánica*. Madrid: McGrawHill.

◆Jim, C.Y. & Peng, L.L.H. (2011). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 11, N° 1: 73-85.

◆Jim, C.Y. (2011). Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape and Ecological Engineering*. Available online: <http://dx.doi.org/10.1007/s11355-011-0161-4>

◆Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, vol. 11, N° 4: 423-436.

◆Lau, S.S.Y. & Yang, F. (2009). Introducing healing gardens into a compact university campus: Design natural space to create healthy and sustainable campuses. *Landscape Research*, vol. 34, N° 1: 55-81.

◆Lehmann, S. (2012). Low to no carbon city: lessons from western urban projects for the rapid transformation of shanghai. *Habitat International*. Available online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.014>

◆Li, J.; Wai, O.W. H.; Li, Y.S.; Zhan, J.; Ho, Y.A.; Li, J. & Lam, E. (2010). Effect of green roof on ambient CO<sub>2</sub> concentration. *Building and Environment*, vol. 45, N° 12: 2644-2651.

◆Maclvor, J.S. & Lundholm, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, vol. 37, N° 3: 407-417.

◆Meggers, F.; Leibundgut, H.; Kennedy, S.; Qin, M.; Schlaich, M.; Sobek, W. & Shukuya, M. (2012). Reduce CO<sub>2</sub> from buildings with technology to zero emissions. *Sustainable Cities and Society*, vol. 2, N° 1: 29-36.

◆Millar-Ball, A. (2012). Do city climate plans reduce emissions? *Journal of Urban Economics*, vol. 71, N° 3: 289-311.

◆Niachou, A.; Papakonstantinou K; Santamouris, M.; Tsangrassoulis, A. & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, vol. 33, N° 7:

719-729.

◆Niemi, J.; Saarela, S.; Söderman, T.; Kopperoinen, L.; Yli-Pelkonen, V.; Väre, S. & Kotze, J. (2010). Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study. *Biodiversity and Conservation*, vol. 19, N° 11: 3225-3243.

◆Oberndorfer, E.; Lundholm, J.; Bass, B.; Coffman, R.R.; Doshi, H.; Dunnett, N.; Gaffin, S.; Köhler, M.; Liu, K.K.Y. & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services. *Bioscience*, vol. 57, N° 10: 823-833.

◆Patón, D.; Romero, F.; Cuenca, J. & Escudero, J.C. (2012). Tolerance to noise in 91 bird species from 27 urban gardens of Iberian Peninsula. *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, N° 1: 1-8.

◆Pellissier, V.; Cohen, M.; Boulay, A. & Clergeau, P. (2012). Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within the city centre. *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, N° 2: 181-188.

◆Puppim de Olivera, J.A.; Balaban, O.; Doll, C.N.H.; Moreno-Peñaranda, R.; Gasparatos, A.; Lossifova, D. & Suwa, A. (2011). Cities and biodiversity: perspectives and governance challenges for implementing the convention on biological diversity (CDB) at the city level. *Biological Conservation*, vol. 144, N° 5: 1302-1313.

◆Ramalho, C.E. & Hobbs, R. (2012). Time for a Change: dynamic urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 27, N° 3: 179-188.

◆Ramírez, W.A.; Domene, X.; Andrés, P. & Alcañiz, J.M. (2008). Phytotoxic effects of sewage sludge extracts on the germination of three plant species. *Ecotoxicology*, vol. 17, N° 8: 834-844.

◆Roaf, S.; Crichton, D. & Nicol, F. (2005). *Adapting buildings and cities for climate change: A 21st century survival guide*. Oxford: Architectural Press, Elsevier.

◆Rowe, D.B. (2011). Green roofs as a mean of pollution abatement. *Environmental Pollution*, vol. 159, N° 9-9: 2100-2110.

◆Spala, A.; Bagiorgas, H.S.; Assimakopoulos, M.N.; Kalavrouziotis, J.; Matthopoulos, D. & Mihalakakou, G. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, vol. 33, N° 1: 173-177.

◆Strohbach, M.W.; Arnold, E. & Haase, D. (2012). The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, N° 1: 220-229.

◆Strohbach, M.W. & Haase, D. (2012). Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, N° 1: 95-104.

◆Susca, T.; Gaffin, S.R. & Dell'Osso, G.R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs.

*Environmental Pollution*, vol. 159, N° 8-9: 2119-2126.

◆ Vergnes, A.; Le Viol, I. & Clergeau, P. (2012). Green corridors in urban landscapes affect the arthropod communities of domestic gardens. *Biological Conservation*, vol. 145, N° 1: 171-178.

◆ Taylor, D.A. (2007). Growing Green Roofs, City by City. *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, N° 6: 306-311.

◆ Vila, A.; Pérez, G.; Solé, C.; Fernández, A.I. & Cabeza, L.F. (2011). Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Building and Environment*, vol. 48: 101-106.

◆ Wang, L.; Wong, N.H. & Li, S. (2007). Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Energy and Buildings*, vol. 39, N° 8: 954-961.

◆ Williams, N.S.G.; Rayner, J.P. & Raynor, K.J. (2010). Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 9, N° 3: 245-251.

◆ Wong, N. H. & Chen, Y. (2009). *Tropical Urban Heat Islands: climate, buildings and greenery (Spon research)*. London: Taylor And Francis.

◆ Wong, N.H.; Tan, A.Y.K.; Tan, P.Y. & Wong, N.C. (2009). Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, vol. 41, N° 12: 1401-1408.

◆ Wong, N.H.; Tan, A.Y.K.; Chen, Y.; Sekar, K.; Tan, P.Y.; Chan, D.; Chianh, K. & Wong, N.C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, vol. 45, N° 3: 663-672.

◆ Yang, J; Yu, Q; Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, vol. 42, N° 31: 7266-7273.

◆ Yang, H.S.; Kang, J. & Choi, M.S. (2011). Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, vol. 50: 44-55.

◆ Yin, K.; Zhao, Q.; Li, X.; Cui, S.; Hua, L. & Lin, T. (2010). A new carbon and oxygen balance model based on ecological service of urban vegetation. *Chinese Geographical Science*, vol. 20, N° 2: 144-151.

◆ Zhang, X.; Shen, L.; Tam, V.W.Y. & Lee, W.W.Y. (2012a). Barriers to implement extensive green roof systems: a Hong Kong study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, N° 1: 314-319.

◆ Zhang, C.; Tian, H.; Chen, G.; Chappelka, A.; Xu, X.; Ren, W.; Hui, D.; Liu, M.; Lu, C.; Pan, S. & Lockaby, G. (2012b). Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States. *Environmental Pollution*, vol. 164: 89-101.

