



## POLVO DE LADRILLO COMO SUSTRATO PARA TECHOS VERDES EXTENSIVOS

### BRICK DUST AS A SUBSTRATE FOR EXTENSIVE GREEN ROOFS

Lorena A. Barbaro<sup>1\*</sup>, Damián Sisaro<sup>2</sup>, Santiago Stancanelli<sup>2</sup>, M. Silvina Soto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EEA Cerro Azul – INTA, Ruta Nacional 14. Km. 836 (3313), Cerro Azul, Misiones, Argentina. Correo electrónico: barbaro.lorena@inta.gob.ar. <https://orcid.org/0000-0002-7462-7872>

<sup>2</sup> Instituto de Floricultura – INTA, De los Reseros y Las Cabañas (1686), Hurlingham, Buenos Aires, Argentina. Correos electrónicos y ORCID: sisaro.damian@inta.gob.ar; <https://orcid.org/0000-0002-3781-1697>; stancanelli.santiago@inta.gob.ar; <https://orcid.org/0000-0001-6598-8046>; soto.maria@inta.gob.ar; <https://orcid.org/0000-0002-0407-9567>

\* Autor para correspondencia E-mail: barbaro.lorena@inta.gob.ar

### RESUMEN

Los techos verdes extensivos (TVE) contienen menos de 15 cm de sustrato, el cual debe ser estable, con baja densidad, alta aireación y suficiente retención de agua y nutrientes para el adecuado desarrollo vegetal. En busca de componentes alternativos para formular este tipo de sustratos, el objetivo de este trabajo fue evaluar sustratos con polvo de ladrillo y su efecto sobre el crecimiento de especies del género *Sedum* L. El ensayo fue conformado por cuatro tratamiento/sustratos compuestos por piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL) en volúmenes indicados por los subíndices: 1) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub>; 2) PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub>; 3) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>; y 4) PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>. Se confeccionaron tres mesadas divididas en cuatro unidades experimentales de 1,2 m<sup>2</sup>. Las especies del género *Sedum* evaluadas fueron *S. acre*, *S. alba*, *S. mexicanum* y *S. reflexum*. Se realizó análisis físicos y químicos a todos los sustratos. A cada planta se midió la superficie (cm<sup>2</sup>) cubierta por la parte vegetativa y la supervivencia. Todos los sustratos tuvieron un valor de pH superior a 6,3 y un valor inicial de conductividad eléctrica alto, pero menor al final del ensayo. La porosidad y aireación en todos los sustratos fue mayor que la capacidad de retención de agua. La superficie cubierta por *S. acre* fue mayor en el sustrato PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>, y por *S. alba* en los sustratos P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub> y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>. *Sedum mexicanum* cubrió menor superficie en el sustrato PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub>, y con *S. reflexum* no hubo diferencias significativas (P : 0,6114). El polvo de ladrillo se muestra como una alternativa viable para su uso en TVE.

**Palabras clave:** Techo verde, sustrato, polvo ladrillo, *Sedum*, sustentable, residuo de construcción, medio de cultivo.

### ABSTRACT

Extensive green roofs (EGR) contain less than 15 cm of substrate, which must be stable, with low density, high aeration and sufficient water and nutrient retention for adequate plant development. In search of alternative components to formulate this type of substrates, the objective of this work was to evaluate substrates with brick dust and its effect on the growth of species of the genus *Sedum* L. The trial consisted of four treatments/substrates composed of pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), *Sphagnum* peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumes indicated by the subscripts: 1) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub>; 2) PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub>; 3) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>; and 4) PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>. Three tables

were made and divided into four experimental units of 1.2 m<sup>2</sup>. The *Sedum* species evaluated were *S. acre*, *S. alba*, *S. mexicanum* and *S. reflexum*. Physical and chemical analyzes were carried out on all substrates. The surface area (cm<sup>2</sup>) covered by the vegetative part and survival was measured for each plant. All substrates had a pH value greater than 6.3 and a high initial electrical conductivity value, but low at the end of the trial. The aeration porosity in all substrates was greater than the water retention capacity. The surface covered by *S. acre* was greater in the substrate PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>T<sub>10</sub> and by *S. alba* in the substrates P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub> and PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>T<sub>10</sub>. *Sedum mexicanum* covered less surface in the substrate PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub>, and no differences were observed with *S. reflexum* (P: 0.6114). Brick dust is a viable alternative for use in EGR.

**Key words:** *Sedum*, sustainable, construction waste material, growing medium.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales detectados en las grandes ciudades es la falta de espacios verdes, que trae como consecuencia inundaciones, incremento de temperatura en espacios urbanos, pérdida de biodiversidad, derroche energético, polución atmosférica y emisión de anhídrido carbónico (Wong and Jim, 2014; Bates et al., 2015; Bevilacqua et al., 2016). Los techos verdes son alternativas para mitigar este problema, ya que proporcionan beneficios ecológicos y económicos, que incluyen la conservación energética, la disminución del efecto de isla de calor, y velocidad de escorrentía retrasando la llegada de agua de lluvia a la red pluvial, mayor longevidad de las membranas de los techos, y el aporte de un entorno estéticamente más agradable (Susca et al., 2011; Dixon and Wilkinson, 2016).

Los techos verdes se clasifican comúnmente como extensivos o intensivos. En general, los extensivos poseen una profundidad de sustrato inferior a 15 cm y la vegetación es de enraizamiento superficial y resistentes a la sequía, requieren de poco mantenimiento y necesidad de riego. En contraste, los techos verdes intensivos tienen una profundidad de sustrato superior a 15 cm, con condiciones para el crecimiento de un amplio rango de plantas, cuyo enraizamiento podría ser más profundo, como arbustos y árboles, por lo cual, el mantenimiento y necesidad de riego es mayor (Sutton, 2015; Soulis et al., 2017).

Las plantas ampliamente utilizadas en los techos verdes extensivos son las especies del género *Sedum* L. (Getter and Rowe, 2009; Vijayaraghavan, 2016), elegidas por que resisten condiciones ambientales extremas, como períodos prolongados de sequía, altas temperaturas y vientos intensos. Dentro de este género, *Sedum acre* L., *Sedum alba* L., *Sedum mexicanum* L., y *Sedum reflexum* L., son las especies más utilizadas (Chen and Kang, 2016). En adición, *S. acre*, *S. alba*, *Sedum dasyphyllum* L., *Sedum hispanicum* L., *Sedum kamtschaticum* Fisch., *Sedum pulchellum* Michx., *S. reflexum*, *Sedum sediforme* Jacq. y *Sedum spurium* M.Brieb. son las principales especies utilizadas en

diversas investigaciones (Pérez et al., 2020).

Últimamente se han evaluado varias especies nativas en distintas partes del mundo y condiciones climáticas, que resultaron tener buen comportamiento, como por ejemplo las pertenecientes a los géneros *Fritillaria* spp., *Dodecatheon* spp., *Opuntia* spp., y *Dudleya* spp. en Oregón (Estados Unidos) (Schroll et al., 2011); *Dianthus fruticosus* L. sub. *fruticosus* en Atenas (Grecia) (Nektarios et al., 2011); *Carpobrotus rossii* L. en Adelaida (Australia) (Razzaghmanesh et al., 2014); *Phyla nodiflora* L., *Grindelia cabrerana* Corn., *Eustachys retusa* Lag. y *Glandularia x hybrid* en Córdoba (Argentina) (Cáceres et al., 2018). La incorporación de plantas nativas a la vegetación de un techo extensivo se debe a su adaptación a las condiciones climáticas locales, proporcionan un hábitat familiar para la fauna local y aumentan la biodiversidad del techo (Nektarios et al., 2011). Además, las mezclas de especies permiten un mejor funcionamiento del techo verde en relación a los monocultivos, conjuntamente con un mejor uso de los recursos, mayor supervivencia de plantas y un incremento de la diversidad de la fauna (Cook-Patton and Bauerle, 2012).

Con respecto a los sustratos para los techos extensivos, se recomienda una capa entre 7,5 a 15 cm (Durhman et al., 2007; Getter and Rowe, 2009; Ampim et al., 2010). Además, deben cumplir con una serie de requisitos: estabilidad, baja densidad, alta aireación, y suficiente retención de agua y nutrientes para lograr un adecuado desarrollo de la vegetación implantada (Dixon and Wilkinson, 2016). Por lo tanto, generalmente se utilizan sustratos con altos porcentaje de componentes minerales (75 a 100%) y bajos porcentajes de componentes orgánicos (10 a 25%) (FLL, 2008; Sutton, 2015; Barbaro et al., 2017). Esto permite mayor estabilidad, ya que la materia orgánica se descompone con el tiempo y hace que el sustrato se contraiga, aunque la velocidad de descomposición dependerá del medio ambiente (Nagase and Dunnett, 2011). Un alto porcentaje de aireación permite un libre drenaje del exceso de agua y una baja densidad en condiciones de saturación, lo que es importante para que el techo

no sobrepase su capacidad de carga (100-140 kg m<sup>-2</sup>) (FLL, 2008; Nektarios et al., 2015; Ntoulas et al., 2015; Barbaro et al., 2017). En adición, para asegurar las propiedades mencionadas, se debería realizar un análisis físico y químico con metodologías específicas para estos sustratos, tanto a cada material como al sustrato formulado, lo que ayudará a tomar decisiones correctas, evitar pérdidas de tiempo e incurrir en gastos innecesarios (Carlile et al., 2015).

En Argentina la instalación de techos verdes extensivos es incipiente, por lo cual, con respecto a los sustratos todavía no se cuenta con gran disponibilidad de materiales y en algunos casos son costosos. Entre los materiales que se emplean destacan: el suelo mineral obtenido del horizonte superficial del perfil edáfico, perlita expandida, vermiculita exfoliada, lecas, piedra pómez, pometina, turbas y diferentes compost. Gayosso et al. (2016) indicaron que la disponibilidad y costo son características determinantes, motivo por el cual se buscan alternativas.

La problemática es similar en otros países del mundo, por lo que se está evaluando la utilización de diversos residuos de la construcción y demolición como sustrato (Mickovski et al., 2013; Bates et al., 2015; Eksi and Rowe, 2016). Además, el uso de estos residuos reciclados podría disminuir el impacto ambiental de la construcción de techos verdes, considerando la energía requerida para producir y transportar los materiales necesarios (Eksi and Rowe, 2016).

En Argentina existe un residuo de la construcción llamado “polvo de ladrillo”, “escombros finos” o “cascote picado”, que es una mezcla de partículas finas de ladrillos rotos, concreto, arena, entre otros residuos de albañilería. Este material se genera en las mismas construcciones o se encuentra disponible en locales comerciales que venden estos productos para la construcción dosificado en bolsas o a granel por m<sup>3</sup>.

En base a lo mencionado, el objetivo de este trabajo fue evaluar el “polvo de ladrillo” como componente de sustratos para techos verdes extensivos (TVE) y su efecto en el crecimiento de especies del género *Sedum* a los 16 meses de implantación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ensayo

El ensayo se realizó en las instalaciones del Instituto de Floricultura del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Hurlingham, provincia de Buenos Aires, República Argentina (34°36' S; 58°40' O).

Estuvo conformado por cuatro tratamientos

y tres repeticiones, constituidos por diferentes sustratos. El diseño estadístico fue en bloques al azar, cada bloque simuló un techo, constituido por una mesada de hierro y malla plana formada por alambres de acero dispuestos en forma ortogonal electrosoldados en los puntos de encuentro (Marca Acindar Sima) de 1 m de altura, 0,96 m de ancho y 5 m de largo, dividida en cuatro partes de 1,2 m<sup>2</sup> rodeadas y separadas por tablas de madera de 15 cm de alto. Las tres mesadas tenían una inclinación de 3°, cada unidad experimental fue recubierta por un film de polietileno negro de 200 micrones, en la parte inferior se instaló tres salidas de drenaje. Luego se incorporó una capa de 4 cm de piedra pómez sin cubrir las salidas de drenaje, después se colocó una capa de membrana de geotextil, y finalmente 8 cm del sustrato correspondiente.

En promedio, la media, mínima y máxima de las variables meteorológicas medidas mensualmente durante el periodo de ensayo fueron: precipitación pluviométrica: 2,47, 0,01 y 7,29 mm; humedad relativa media: 79,07, 60,74 y 88,54%; velocidad del viento media a 200 cm del nivel del suelo: 5,00, 3,62 y 6,22 km h<sup>-1</sup>; horas de frío: 2,02, 0,00 y 8,27; temperatura media: 16,79, 9,87 y 25,36°C; temperatura mínima 11,13, 3,92 y 19,72°C; y temperatura máxima: 22,45, 15,28 y 31,67°C, respectivamente. Las temperaturas mencionadas fueron registradas en abrigo meteorológico a 150 cm sobre el nivel del suelo.

### Tratamientos: Sustratos evaluados

Los sustratos estaban compuestos por combinaciones de piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL), en las proporciones volumétricas indicadas en los subíndices: 1) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub>; 2) PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub>; 3) P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>; 4) PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>.

La piedra pómez procedía de Molinos Tarquini, marca Pometina; la microleca de Arcillex S.A.; la perlita expandida de IMERYS, marca Perlome; la turba de *Sphagnum* de Terrafertil S.A. obtenida en Tierra del Fuego (Argentina); la zeolita era de la Compañía Minera Argentina, marca Fitz Pet. Este último componente fue previamente lavado con agua de osmosis inversa y enriquecido de la siguiente manera: en un recipiente se incorporó 100 kg de zeolita y 50 litros de agua de osmosis inversa con 2,5 kg de fertilizante soluble de Compo Expert, marca Hakaphos (N15-P10-K15) durante 5 días; posteriormente se pasó por un colador y se guardó para su uso. El polvo de ladrillo, llamado así en adelante, un residuo fino de construcción, se adquirió en un local comercial de venta al público en la provincia de Buenos Aires. Este residuo se pasó por una malla llamada

“mosquitero” de aluminio con luz de malla de 2 x 2 mm para luego utilizar solo la porción de residuo mayor a 2 mm.

### Análisis de los sustratos evaluados

Cada sustrato se analizó por triplicado en el Laboratorio de Sustratos y Aguas del Instituto de Floricultura del INTA; la conductividad eléctrica (CE) y pH se analizó en una relación 1/5 vol/vol de sustrato/agua; en un frasco de 250 mL se colocaron 150 mL de agua destilada y se llevó a 180 mL con el agregado de sustrato. Se agitó durante 10 min y se dejó reposar 15 min, luego se realizaron las mediciones en la solución con un conductímetro (Thermo Orion modelo 145, Beverly, Estados Unidos) y un peachímetro (Horiba M-12, Japón) (Barbaro y Karlanian, 2020). La concentración de calcio, magnesio, potasio y sodio fueron analizados en el filtrado de esta solución 1/5 vol/vol, con un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian modelo 220 A, Mulgrave Victoria, Australia); los nitratos con electrodo ión selectivo (WTW modelo Inolab 7320, Weiheim, Alemania) y el fósforo con un espectrofotómetro de UV visible (Unicam modelo Helios B, Cambridge, Inglaterra) mediante técnica colorimétrica de Bray and Kurtz, (1945). Los resultados se expresaron en mg L<sup>-1</sup>.

Densidad aparente mediante el método de Hofmann (Fermino, 2003); el espacio poroso total (EPT), capacidad de retención de agua (CRA) y porosidad de aire (PA) empleando el método de De Boodt mediante los lechos de arena (De Boodt et al., 1974) (los resultados se expresaron en porcentaje). La granulometría, con una tamizadora vibratoria con tamices de 5,56; 4,75; 3,35; 2,0; 1,4; 1 y 0,5 mm. de diámetro durante 10 min en forma intermitente (Ansorena Miner, 1994) y la materia orgánica (MO) con el método de la mufla (Ansorena Miner, 1994) con resultados expresados en porcentaje.

Los análisis de pH, CE y materia orgánica, también se realizaron a muestras tomadas a cada unidad experimental el 14/8/2017, 16 meses más tarde de la instalación del ensayo. Cada muestra era de 1 L constituida por 5 submuestras tomadas al azar en diferentes puntos.

### Material vegetal evaluado

En base a los beneficios que aporta una comunidad de especies en un techo verde en comparación con un monocultivo (Cook-Patton and Bauerle, 2012), en el ensayo se trasplantaron en cada unidad experimental 4 ejemplares de *S. acre*, *S. alba*, *S. mexicanum*, *S. kamtschaticum*, *S. reflexum*, *Portulaca gilliesii* Hook., *Portulaca grandiflora* Hook. y *Senecio ceratophylloides* Griseb. El trasplante se realizó el 7/04/2016 mediante

un marco al tresbolillo. Entre estas las plantas evaluadas fueron: *S. acre*, *S. alba*, *S. mexicanum* y *S. reflexum*. A cada planta se midió la superficie (cm<sup>2</sup>) cubierta por la parte vegetativa. Para esta determinación el 14/08/2017 se tomaron imágenes digitales en cada unidad experimental, con una cámara fotográfica (Olympus C-5060 Digital de 5.1 Mp de resolución, Tokyo, Japón), fijada sobre una ménsula a 1,6 m de altura en el medio y por encima de la unidad experimental. Posteriormente, mediante el programa UTHSCSA ImageTool 3.0 (Wilcox et al., 2002) se analizaron las imágenes, contabilizando el número de plantas vivas de cada especie por tratamiento.

### Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza y test de Tukey para comparación de medias ( $P < 0,05$ ) a los datos obtenidos de los análisis físicos y químicos de cada sustrato, al inicio y al final del ensayo, como también de las plantas evaluadas.. El software estadístico utilizado fue el programa InfoStat versión 2009 (Di Rienzo et al., 2009).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de los sustratos evaluados

La gran mayoría de las especies cultivadas en sustratos se desarrollan en rangos de pH entre 5,5 y 6,3 (Regan, 2014); valores de pH fuera de este rango traerían como consecuencia problemas nutritivos por deficiencias o exceso de nutrientes (Albano et al., 2017; Barbaro et al., 2018). En base a lo expuesto, todos los sustratos se encontraron por encima del rango mencionado (Tabla 1). El sustrato PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> tuvo el mayor valor de pH y se diferenció significativamente de los restantes ( $P < 0,0001$ ). Con estos valores de pH es posible que el desarrollo de las plantas no sea el óptimo. Tal es así que Zheng and Clark (2013) determinaron que el valor óptimo de pH para el desarrollo de *S. alba* era de 6,32; para *S. reflexum* de 6,43; de *S. spurium* era 5,71; de *S. hybridum* era 6,25; y de *Sedum sexangulare* L. era 5,91. Según la normas alemanas FLL aplicadas en los techos verdes, los límites establecidos de pH están entre 6,0 y 8,5 (FLL, 2008). Se observó además que en diferentes ensayos con especies de *Sedum* y otros géneros, las plantas se desarrollaron adecuadamente en pH superiores a 6,3. Los autores Nektarios et al. (2015) demostraron que *S. sediforme* podría utilizarse con éxito en techos extensivos en regiones semiáridas, y sus ensayos fueron realizados en dos sustratos con pH 7,73 y 7,89. Nagase and Dunnett (2011) concluyeron que *Allium schoenoprasum* L., *Limonium latifolium* L., *Melissa ciliata* L., y *Nepeta × faassenii* mostraron un crecimiento estable en sustratos con residuos de

**Tabla 1. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) de los sustratos evaluados al inicio y al final del ensayo.****Table 1. Values of pH and electrical conductivity (CE) of the substrates evaluated at the beginning and end of the trial.**

Sustratos	Momento	pH	CE dS cm <sup>-1</sup>
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>40</sub> :Z <sub>15</sub>	Inicial	7,43 b A	1,89 ab A
	Final	7,61 a A	0,03 a B
PL <sub>85</sub> :Z <sub>15</sub>	Inicial	8,09 a A	1,61 c A
	Final	7,73 a B	0,11 a B
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>30</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	Inicial	7,05 c A	1,80 b A
	Final	7,31 a A	0,02 a B
PL <sub>75</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	Inicial	7,43 b B	1,95 a A
	Final	7,74 a A	0,10 a B

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL); proporciones volumétricas indicadas por los subíndices. Letras minúsculas distintas entre sustratos y el mismo momento indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) y letras mayúsculas distintas entre el momento inicial y final de cada sustratos indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), ambas según el test de Tukey.

Pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), *Sphagnum* peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumetric proportions indicated by the subscripts. Different lowercase letters between substrates and the same moment indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ) and different capital letters between the initial and final moment of each substrates indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ), both according to the Tukey's test.

construcción y un 10% de compost cuyos valor de pH era de 7,9.

Los valores de pH obtenidos en los sustratos están relacionados a los componentes empleados, los cuales, excepto la turba de *Sphagnum*, son materiales que se caracterizan por ser alcalinos (Martínez y Roca, 2011). En particular los sustratos PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> tuvieron un pH menor o similar a otros sustratos elaborados con residuo de construcción. Por ejemplo, Molineux et al. (2009) evaluaron un sustrato de ladrillo rojo triturado que tenía 9,71 de pH, y Ondoño et al. (2016) usaron un sustrato con ladrillo triturado y un 20% de compost de residuos de oveja que tenía 8,08 de pH.

El pH final de los sustratos fue entre 7,3 y 7,7; los sustratos PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> tuvieron diferencias entre el valor inicial y final ( $P = 0,0065$  y  $P = 0,0375$ , respectivamente).

Con respecto a la CE, valores bajos en un sustrato permite que se puedan manejar las concentraciones de nutrientes minerales según los requerimientos del cultivo mediante la fertilización (Regan, 2014). Valores mayores a 1 dS m<sup>-1</sup> (1+5 v/v), límite establecido para la metodología empleada (Barbaro et al., 2014), podrían disminuir el desarrollo de las plantas debido a desbalances nutricionales y/o efectos fitotóxicos. Todos los sustratos se encontraron por encima de este valor (Tabla 1), pero fue debido a la incorporación de un 15% de zeolita

enriquecida; los otros componentes tenían valores de CE menores al límite (datos no mostrados). La zeolita se caracteriza por su alta capacidad de intercambio de cationes (De Campos Bernardi et al., 2013), por lo tanto, uno de sus usos es como fertilizante de liberación lenta (Bansiwal et al., 2006). Este fue el motivo por el cual se utilizó zeolita enriquecida en los diferentes sustratos, los cuales, en consecuencia tuvieron una CE superior a 1 dS cm<sup>-1</sup>. Al finalizar el ensayo se observó que la CE de todos los sustratos disminuyó drásticamente y se diferenció del valor inicial ( $P < 0,0001$ ) en todos los sustratos (Tabla 1).

La concentración soluble inicial de calcio y sodio (Tabla 2) en todos los sustratos fue mayor al rango aceptable; también relacionado con el 15% de zeolita incluido en cada sustrato. La zeolita utilizada tenía una alta concentración de calcio y sodio (datos no mostrados) que fueron reducidos con el lavado previo a su utilización. Las demás concentraciones de nutrientes solubles fueron menores al rango aceptable.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente (Tabla 3) fue menor en los sustratos P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub> y P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> sin diferencias entre ambos; el sustrato PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> fue el de mayor densidad y se diferenció de los restantes ( $P < 0,0001$ ). Esta propiedad es una limitante en un techo verde (Best et al., 2015), ya que su valor no debería afectar a la estructura del edificio, por lo cual se recomiendan valores inferiores a 1000 kg

**Tabla 2. Concentración soluble de nitrato, fósforo, calcio, magnesio, potasio y sodio de los sustratos evaluados.****Table 2. Soluble concentration of nitrate, phosphorus, calcium, magnesium, potassium and sodium of the substrates evaluated.**

Sustratos	Nitrato	Fósforo	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>40</sub> :Z <sub>15</sub>	324 a	2 c	804 a	28 b	8 c	530 a
PL <sub>85</sub> :Z <sub>15</sub>	277 ab	4 c	550 ab	23 b	44 a	364 b
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>30</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	186 b	39 a	373 b	38 a	8 c	474 a
PL <sub>75</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	205 ab	17 b	760 a	37 a	31 b	484 a
*Rango aceptable	600-900	40-80	120-180	40-60	120-200	50-100

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL); proporciones volumétricas indicadas por los subíndices. \*Rango aceptable según el Instituto de Floricultura del INTA para la metodología utilizada 1+5 v/v. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el test de Tukey.

Pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), *Sphagnum* peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumetric proportions indicated by the subscripts. \* Acceptable range according to the INTA Floriculture Institute for the methodology used 1+5 v/v. Different letters between rows of the same column indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ) according to the Tukey's test.

**Tabla 3. Densidad aparente (DA), porosidad de aire (PA), capacidad de retención de agua (CRA) y espacio poroso total (EPT) de los sustratos evaluados.****Table 3. Apparent density (DA), air porosity (PA), water retention capacity (CRA) and total porous space (EPT) of the evaluated substrates.**

Sustratos	DA	PA	CRA	EPT
	kg m <sup>-3</sup>		%	
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>40</sub> :Z <sub>15</sub>	670 c	46,04 a	28,71 a	74,75 a
PL <sub>85</sub> :Z <sub>15</sub>	980 a	37,04 b	24,87 b	61,91 c
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>30</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	620 cd	45,31 a	30,86 a	76,17 a
PL <sub>75</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	860 b	35,67 b	30,79 a	66,47 b

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL) en proporciones volumétricas indicadas por los subíndices. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el test de Tukey.

Pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), *Sphagnum* peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumetric proportions indicated by the subscripts. Different letters between rows of the same column indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ) the Tukey's test.

m<sup>-3</sup> (FLL 2002; Barbaro et al., 2017). Por lo tanto, todos los sustratos cumplen con este requisito.

La PA en todos los sustratos fue mayor que la CRA (Tabla 3); los sustratos P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub> y P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> tuvieron mayor porcentaje de PA ( $P: 0,0002$ ), sin diferencias entre ellos. El sustrato PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> tuvo menor porcentaje de CRA que los restantes ( $P = 0,0007$ ), entre los cuales no hubo diferencias significativas. La relación agua-aire en los sustratos varía ampliamente de acuerdo a los tamaños de las partículas que predominen en su composición, siendo uno de los factores que definen el tamaño de los poros situados entre ellas (Martínez y Roca, 2011). Las partículas mayores a 1 mm de diámetro dan lugar a poros grandes aportando aireación, y las

menores a 1 mm conforman poros medianos a pequeños, proporcionando una mayor retención de agua. En este sentido, hubo diferencias significativas en todos los rangos de tamaño de partículas evaluados en cada sustrato (Tabla 4) ( $P = 0,0025$  para 5,56-4,75 mm;  $P = 0,0004$  para 2,0-1,4 mm; y  $P < 0,0001$  para los restantes tamaños). Los mayores porcentajes se observaron en el rango de tamaños de partículas entre 3,35-2,0 mm, donde los sustratos P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>40</sub>:Z<sub>15</sub> y P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> tuvieron los mayores valores sin diferencias entre ellos. Los sustratos PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> tuvieron mayor porcentaje de partículas < 0,5 mm con respecto a los demás, con diferencias entre ambos. Estos sustratos también tuvieron mayor porcentaje de partículas entre 4,75 y 3,35 mm, sin

**Tabla 4. Porcentaje del tamaño de partículas de los sustratos evaluados.****Table 4. Percentage of the particle size of the substrates evaluated.**

Sustratos	Porcentaje de tamaño de partículas (mm)							Suma de partículas > 1 mm (%)	Suma de partículas < 1 mm (%)	
	5,56	5,56 - 4,75	4,75 - 3,35	3,35 - 2,0	2,0 - 1,4	1,4 - 1,0	1,0 - < 0,5			
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>40</sub> :Z <sub>15</sub>	8 a	5 c	13 b	36 a	16 a	9 a	7 a	7 c	87 a	14 a
PL <sub>85</sub> :Z <sub>15</sub>	1 c	9 a	25 a	33 b	14 b	4 c	3 c	11 b	86 a	14 b
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>30</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	4 b	6 bc	13 b	38 a	17 a	8 a	6 a	7 c	86 a	13 b
PL <sub>75</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	2 c	8 ab	22 a	27 c	12 b	6 b	6 b	18 a	77 b	24 b

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL) en proporciones volumétricas indicadas por los subíndices. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el test de Tukey.

Pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), *Sphagnum* peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumetric proportions indicated by the subscripts. Different letters between rows of the same column indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ) according to the Tukey's test.

diferencia entre ambos. Al sumar los porcentajes de partículas mayores a 1 mm por un lado y menores a 1 mm por el otro (Tabla 4), se observó que todos los sustratos tenían un alto porcentaje de partículas mayores a 1 mm, lo que se relaciona con el mayor porcentaje de PA obtenido en relación a la CRA. Numerosas investigaciones han confirmado que a medida que la altura del contenedor disminuye, se reduce la proporción de aire y se incrementa la de agua en el ETP del sustrato (Vence et al., 2013). Además, en la base del contenedor se forma una zona saturada de agua cuando el drenaje está a presión atmosférica, cuya altura dependerá de las propiedades físicas del sustrato (Owen and Altland, 2008; Vence et al., 2013).

En base a lo mencionado y teniendo en cuenta que los techos verdes extensivos poseen una altura de sustrato inferior a 15 cm, los sustratos evaluados tenían una adecuada proporción de aireación. Una alta porosidad de aire en el sustrato del techo verde es favorable porque facilita el drenaje rápido y reduce la retención de humedad excesiva minimizando un potencial anegamiento (FLL, 2002; Olszewski and Young, 2011). Además evita posibles problemas sanitarios (McGuire et al., 2015) y permite un adecuado aporte de oxígeno para el desarrollo de las plantas, de lo contrario podría afectar la formación de raíces y en consecuencia, la absorción de agua y nutrientes (Martínez y Roca, 2011). Por otro lado, una proporción de poros con capacidad para retener agua es deseable para la supervivencia de las plantas y para retrasar el flujo de agua durante las precipitaciones (Vijayaraghavan, 2016). La FLL recomienda una CRA > 20% y una PA > 10% para techos verdes extensivos (FLL, 2002). Los sustratos evaluados superaron ampliamente los valores de ambos límites.

La incorporación de un 10% de turba de

*Sphagnum* en los sustratos P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> resultó en un porcentaje de MO menor al 3% (Tabla 5). El porcentaje de MO inicial obtenido en los sustratos sin turba de *Sphagnum* fue debido a una posible contaminación con materiales orgánicos en el lugar de origen o fabricación de los componentes minerales, de acuerdo con Valenzuela et Al. (2003) quien obtuvo un 15,85% de MO en la perlita empleada en sus ensayos, esto es una consecuencia debido a la falta de legislación sobre sustratos en el país. Se destaca que entre el valor inicial de MO con respecto al final en todos los sustratos hubo un incremento de 1 al 1,7% en los 16 meses, con diferencias significativas para el sustrato PL<sub>85</sub>:Z<sub>15</sub> ( $P = 0,0161$ ), P<sub>20</sub>:M<sub>25</sub>:Pe<sub>30</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> ( $P = 0,0043$ ) y PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub> ( $P = 0,0336$ ) entre los valores iniciales y finales (Tabla 5). Getter et al. (2007) obtuvieron un aumento del 2% de MO después de 5 años en un techo verde con 6 mm de sustrato inorgánico y diferentes variedades de *Sedum*. Este aumento de la MO se atribuye al mismo aporte dado por los restos de las plantas descompuestas, que varía según el clima local, ya que la temperatura y la humedad afectan a la tasa de descomposición (Ampim et al., 2010).

#### Material vegetal evaluado

Se logró una alta supervivencia de plantas en todos los sustratos, por lo cual no hubo diferencias significativas entre los tratamientos para todas las especies evaluadas ( $P > 0,05$ ). En promedio hubo una supervivencia del 83% al 100% de plantas por especie en cada tratamiento, en el periodo de los 16 meses estudiados.

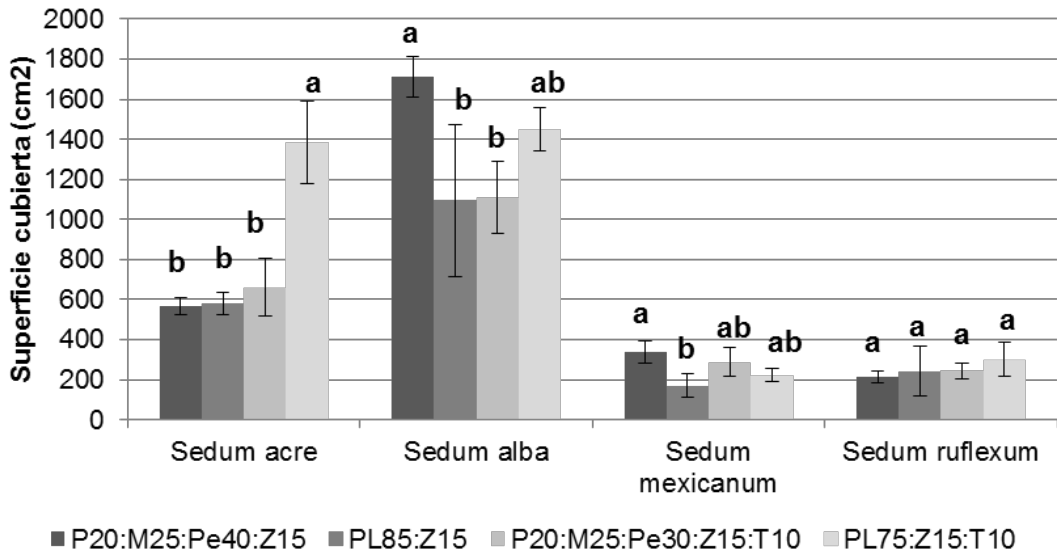
Por otra parte, la superficie cubierta (Fig. 1) por las plantas de *S. acre* fue mayor en el sustrato PL<sub>75</sub>:Z<sub>15</sub>:T<sub>10</sub>, diferenciándose de los demás sustratos ( $P = 0,0002$ ), entre los cuales no hubo diferencias significativas. Las plantas de *S. alba* tuvieron

**Tabla 5. Porcentaje de materia orgánica (MO) de los sustratos evaluados al inicio y al final del ensayo.**  
**Table 5. Percentage of organic matter (OM) of the substrates evaluated at the beginning and end of the trial.**

Sustratos	Momento	MO (%)
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>40</sub> :Z <sub>15</sub>	Inicial	0,52 b A
	Final	1,49 A
PL <sub>85</sub> :Z <sub>15</sub>	Inicial	0,54 b B
	Final	2,18 A
P <sub>20</sub> :M <sub>25</sub> :Pe <sub>30</sub> :Z <sub>15</sub> :T <sub>10</sub>	Inicial	2,62 a B
	Final	3,99 A
PL <sub>75</sub> :Z <sub>15</sub> T <sub>10</sub>	Inicial	2,64 a B
	Final	3,90 A

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL) en proporciones volumétricas indicadas por los subíndices. Letras minúsculas distintas entre sustratos en el momento inicial indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) y letras mayúsculas distintas entre el momento inicial y final de cada sustratos indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), ambas según el test de Tukey.

Pumice stone (p), microleca (m), perlite (pe), sphagnum peat (t), enriched zeolite (z) and brick dust (pl) in volumetric proportions indicated by the subscripts. Different lowercase letters between substrates in the initial moment indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) and different capital letters between the initial and final moment of each substrates indicate significant differences ( $p < 0.05$ ), both according to the Tukey's test.



**Fig. 1. Superficie cubierta (cm<sup>2</sup>) promedio de cada especie de *Sedum* evaluada en cada sustrato.**  
**Fig. 1. Average covered area (cm<sup>2</sup>) of each *Sedum* species evaluated in each substrate.**

Piedra pómez (P), microleca (M), perlita (Pe), turba de *Sphagnum* (T), zeolita enriquecida (Z) y polvo de ladrillo (PL) en proporciones volumétricas indicadas por los números. Letras distintas entre barras de una misma especie indican diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ) según el Test de Tukey. Barras verticales en cada punto indican intervalo de confianza de 95 %.

Pumice stone (P), microleca (M), perlite (Pe), Sphagnum peat (T), enriched zeolite (Z) and brick dust (PL) in volumetric proportions indicated by the numbers. Different letters between bars of the same species indicate significant differences ( $P \leq 0.05$ ) according to the Tukey's test. Vertical bars at each point indicate a 95% confidence interval.



mayor superficie cubierta en los sustratos  $P_{20}:M_{25}:Pe_{40}:Z_{15}$  y  $PL_{75}:Z_{15}T_{10}$ , sin diferencias entre ambos. Entre los restantes sustratos no hubo diferencias, excepto en el sustrato  $P_{20}:M_{25}:Pe_{40}:Z_{15}$  ( $P = 0,0262$ ). Las plantas de *S. mexicanum* tuvieron una superficie cubierta inferior en el sustrato  $PL_{85}:Z_{15}$ ; en cambio en los restantes sustratos la superficie cubierta fue mayor y sin diferencias entre los sustratos ( $P = 0,0307$ ). La superficie cubierta por las plantas de *S. reflexum* no tuvieron diferencias significativas entre los diferentes sustratos ( $P = 0,6114$ ).

En general, las propiedades de todos los sustratos evaluados permitieron que las plantas se establecieran y cubrieran la superficie. Como se mencionó antes, los sustratos tenían un adecuado porcentaje de PA y CRA. Además, la concentración de sales proveniente principalmente de la zeolita enriquecida durante el periodo evaluado favoreció el desarrollo y no se observaron síntomas de deficiencias o toxicidad en las plantas (Datos no publicados). Con respecto al pH, cuyos valores se encontraban entre 7 y 8, podría haber sido una propiedad limitante, pero no afectó el desarrollo de las plantas. Sin embargo, Zheng y Clark (2013) concluyeron que el *S. alba* y *S. reflexum* logran un mejor desarrollo en un pH de 6,4 aprox. cubriendo a los 6 meses del trasplante una superficie de 200 y 100 cm<sup>2</sup>, respectivamente. Por lo tanto, a los 16 meses en las mismas condiciones podrían cubrir una superficie de 533 cm<sup>2</sup> y 266 cm<sup>2</sup>, respectivamente. En la presente investigación *S. alba* cubrió más de 1000 cm<sup>2</sup> y *S. reflexum* más de 200 cm<sup>2</sup> en 16 meses, por lo que se podría considerar una cobertura adecuada, aunque, Durhman et al. (2007) obtuvieron una superficie cubierta por *S. reflexum* de 600 cm<sup>2</sup> en 12 meses, mayor a la que se obtuvo en todos los sustratos en el presente trabajo.

## CONCLUSIONES

Las plantas de *Sedum* evaluadas se desarrollaron favorablemente sobre la superficie de todos los sustratos. Por lo cual, los sustratos elaborados con polvo de ladrillo podrían ser una alternativa para su uso en techos verdes extensivos, ya que permitieron un desarrollo de plantas similar al sustrato formulado con materiales convencionales. En futuras investigaciones, se propone evaluar los mismos sustratos con otros géneros de plantas en diferentes condiciones ambientales, según la región del país.

## LITERATURA CITADA

- Albano, J.P., J. Altland, D.J. Merhaut, S.B. Wilson, and P.C. Wilson. 2017. Irrigation water acidification to neutralize alkalinity for nursery crop production: Substrate pH, electrical conductivity, nutrient concentrations, and plant nutrition and growth. *HortScience* 52(10):1401-1405. doi.org/10.21273/HORTSCI11439-17
- Ampim, P.A., J.J. Sloan, R.I. Cabrera, D.A. Harp, and F.H. Jaber. 2010. Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties. *Journal of Environmental Horticulture* 28(4):244-252. doi.org/10.24266/0738-2898-28.4.244
- Ansorena Miner, J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. p. 172. 1ª ed. Mundi Prensa, Madrid, España.
- Bansiwal, A.K., S.S. Rayalu, N.K. Labhasetwar, A.A. Juwarkar, and S. Devotta. 2006. Surfactant-modified zeolite as a slow release fertilizer for phosphorus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(13):4773-4779. doi.org/10.1021/jf060034b
- Barbaro, L.A., y M.A. Karlanián. 2020. Efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de plantines florales en maceta. *Ciencia del Suelo* 38(1):1-11.
- Barbaro, L.A., M.S. Soto, D. Sisaro, M.A. Karlanian, y S. Stancanelli. 2017. Sustratos para techos verdes sustentables (extensivos). 16 p. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Barbaro, L.A., M.A. Karlanian, y D.A. Mata. 2018. Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. 10 p. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Barbaro, L.A., A. Mazzoni, M.A. Karlanian, M.N. Fernandez, y D.E. Morisigue. 2014. Cenizas del volcán Puyehue como sustrato para plantas. *Horticultura Argentina* 33(81):44-53.
- Bates, A.J., J.P. Sadler, R.B. Greswell, and R. Mackay. 2015. Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. *Landscape and Urban Planning* 135:22-31. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.010
- Best, B.B., R.K. Swadek, and T.L. Burgess. 2015. Soil-based green roofs. p. 139-174. In Sutton, R.K. (ed.). *Green Roof Ecosystems*. Springer, New York, United States. doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7.
- Bevilacqua, P., D. Mazzeo, R. Bruno, and N. Arcuri. 2016. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings* 122:63-79. doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.062

- Bray, R.H., and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59:39-45.
- Cáceres, N., L. Imhof, M. Suárez, E.C. Hick, and L. Galetto. 2018. Assessing native germplasm for extensive green roof systems of semiarid regions. *Ornamental Horticulture* 24(4):466-476. doi.org/10.14295/oh.v24i4.1225
- Carlile, W.R., C. Cattivello, and P. Zaccheo. 2015. Organic growing media: Constituents and properties. *Vadose Zone Journal* 14(6):1-13. doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125
- Chen, C.F., and S.F. Kang. 2016. Effects of substrates and plant species on water quality of extensive green roofs. *Applied Ecology and Environmental Research* 14(2):77-91. doi.org/10.15666/aeer/1402\_077091
- Cook-Patton, S.C., and T.L. Bauerle. 2012. Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs. *J. Environ. Manage.* 106:85-92. doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.003
- De Boodt, M., O. Verdonck, and J. Cappaert. 1974. Methods for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37:2054-2062. doi: 10.17660/ActaHortic.1974.37.20
- De Campos Bernardi, A.C., P.P.A. Oliveira, M.B. De Melo Monte, and F. Souza-Barros. 2013. Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. *Microporous and Mesoporous Materials* 167:16-21. doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.06.051
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2009. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>. (Consulta 10 julio 2020).
- Dixon, T., and S. Wilkinson. 2016. *Building Resilience in Urban Settlements Through Green Roof Retrofit*. 13 p. Wiley Online Library, Australia. doi.org/10.1002/9781119055587.ch1
- Durhman, A.K., D.B. Rowe, and C.L. Rugh. 2007. Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. *HortScience* 42(3):588-595. doi.org/10.21273/HORTSCI.42.3.588
- Eksi, M., and D.B. Rowe. 2016. Green roof substrates: Effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention. *Urban Forestry & Urban Greening* 20:81-88. doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.008
- Fermino, M.H. 2003. Métodos de análise para caracterização de física de substratos. 89 p. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- FLL. 2008. FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Bonn, Germany.
- Gayosso, S., Borges Gómez, L., Villanueva Couoh, E., Estrada Botello, M.A., y Garruña Hernández, R. 2016. Sustratos para producción de flores. *Agrociencia* 50(5):617-631.
- Getter, K.L., D.B. Rowe, and J.A. Andresen. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31(4):225-231. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004
- Getter, K.L., and D.B. Rowe. 2009. Substrate depth influences Sedum plant community on a green roof. *HortScience* 44(2):401-407. doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.401
- Martínez, P.F., y D. Roca. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En Flórez R., V.J. (ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. p. 37-77. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- McGuire, K.L., S.G. Payne, G. Orazi, and M.I. Palmer. 2015. Bacteria and fungi in green roof ecosystems .p. 175-191. In Sutton, R.K. (ed.). *Green Roof Ecosystems*. Springer, United States. doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7
- Mickovski, S.B., K. Buss, B.M. McKenzie, and B. Sökmener. 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering* 61:706-714. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015
- Molineux, C.J., C.H. Fentiman, and A.C. Gange. 2009. Characterizing alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK. *Ecological Engineering* 35(10):1507-1513. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010
- Nagase, A., and N. Dunnett. 2011. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning* 103(2):230-236. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.012
- Nektarios, P.A., I. Amountzias, I. Kokkinou, and N. Ntoulas. 2011. Green roof substrate type and depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced irrigation regimens. *HortScience* 46(8):1208-1216. doi.org/10.21273/HORTSCI.46.8.1208

- Nektarios, P.A., N. Ntoulas, E. Nydrioti, I. Kokkinou, E.M. Bali, and I. Amountzias. 2015. Drought stress response of *Sedum sediforme* grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths. *Scientia Horticulturae* 181:52-61. doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.047
- Ntoulas, N., P.A. Nektarios, T.E. Kapsali, M.P. Kaltsidi, L. Han, and S. Yin. 2015. Determination of the physical, chemical, and hydraulic characteristics of locally available materials for formulating extensive green roof substrates. *HortTechnology* 25(6):774-784. doi.org/10.21273/HORTTECH.25.6.774
- Olszewski M.W., and C.A. Young. 2011. Physical and chemical properties of green roof media and their effect on plant establishment. *Journal of Environmental Horticulture* 29(2):81-86. doi.org/10.24266/0738-2898-29.2.81
- Ondoño, S., J.J. Martínez-Sánchez, and J.L. Moreno. 2016. The composition and depth of green roof substrates affect the growth of *Silene vulgaris* and *Lagurus ovatus* species and the C and N sequestration under two irrigation conditions. *Journal of Environmental Management* 166:330-340. doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.045
- Owen, J.S., and J.E. Altland. 2008. Container height and douglas fir bark texture affect substrate physical properties. *HortScience* 43(2):505-508. doi.org/10.21273/HORTSCI.43.2.505
- Pérez, G., C. Chocarro, A. Juárez, and J. Coma. 2020. Evaluation of the development of five *Sedum* species on extensive green roofs in a continental Mediterranean climate. *Urban Forestry & Urban Greening* 48:1-12. doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126566
- Razzaghmanesh, M., S. Beecham, and F. Kazemi. 2014. The growth and survival of plants in urban green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment* 476:288-297. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.014
- Regan, R.P. 2014. Evaluating alternative growing media components. p. 50-53. In Wilkinson K.M, D.L. Haase, and J.R, Pinto (Eds.). National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-72. Fort Collins, Colorado, USA.
- Schroll, E., J.G. Lambrinos, and D. Sandrock. 2011. An evaluation of plant selections and irrigation requirements for extensive green roofs in the Pacific Northwestern United States. *HortTechnology* 21(3):314-322. doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.314
- Soulis, K.X., N. Ntoulas, P.A. Nektarios, and G. Kargas. 2017. Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological Engineering* 102:80-89. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.031
- Susca, T., S.R. Gaffin, and G.R. Dell'Osso. 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution* 159:2119-2126. doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007
- Sutton, R.K. 2015. Introduction to green roof ecosystems. p. 1-25. In Sutton, R.K. (ed.). *Green Roof Ecosystems*. Springer, United States. doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7.
- Valenzuela, O., F. Nicolau, M. Rode, H. Schlund, y C. Gallardo. 2003. Respuesta de *Tagetes patula* a sustratos formulados con compost y perlita. *Revista Científica Agropecuaria* 7(1): 57-61.
- Vence, L.B., O.R. Valenzuela, H.A. Svartz, y M.E. Conti. 2013. Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencia del Suelo* 31(2):153-164.
- 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. doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119
- Wilcox, C.D., S.B. Dove, W.M. Doss, and D.B. Greer. 2002. UTHSCSA Image Tool. IT Versión 3.0. Department of Dental Diagnostic Science. University of Texas Health Science Center. 57 p. San Antonio, Texas, United States.
- Wong, G.K., and C.Y. Jim. 2014. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering* 70:366-378. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.025
- Zheng, Y., and M.J. Clark. 2013. Optimal growing substrate pH for five *Sedum* species. *HortScience* 48(4):448-452. doi.org/10.21273/HORTSCI.48.4.448