



CARBONILLA COMO COMPONENTE DE SUSTRATOS PARA EL CRECIMIENTO DE PETUNIA (*Petunia hybrida*) Y CALIBRACHOA (*Calibrachoa hybrida*) EN MACETAS

FINE CHARCOAL AS A COMPONENT OF SUBSTRATES FOR THE GROWTH OF PETUNIA (*Petunia hybrida*) AND CALIBRACHOA (*Calibrachoa hybrida*) IN POTS

Esteban Julián Rubio^{1a*}, Alejandra Bernardez^{1b}, Lorena Alejandra Barbaro² y Mónica Alejandra Karlanian^{1c}

^{1a} Instituto de Floricultura, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Nicolás Repetto 2751 (1686), Hurlingham, Argentina

<https://orcid.org/0000-0003-3120-4324>

^{1b} Instituto de Floricultura, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Nicolás Repetto 2751 (1686), Hurlingham, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-8338-4075>

^{1c} Instituto de Floricultura, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Nicolás Repetto 2751 (1686), Hurlingham, Argentina

<https://orcid.org/0009-0003-1874-8770>

² Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Ruta Nacional 14. Km. 836 (3313), Cerro Azul, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-7462-7872>

* Autor para correspondencia: rubio.esteban@inta.gob.ar

RESUMEN

La carbonilla es un residuo de la producción de carbón vegetal con potencial para utilizarse como componente de sustratos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inclusión de carbonilla en el sustrato sobre el crecimiento de *Petunia hybrida* y *Calibrachoa hybrida*. Para ello, se formularon sustratos mezclando turba con 20, 30, 40 y 50% de carbonilla. Los sustratos se incubaron por cinco semanas para determinar el tiempo de estabilización del pH y la conductividad eléctrica (CE). Se caracterizaron fisicoquímicamente sustratos y componentes. El diseño utilizado fue completamente aleatorizado, con doce repeticiones, para evaluar parámetros de crecimiento de ambas especies crecidas en los sustratos formulados y en un sustrato comercial, así como también el pH y la CE al final del cultivo. El pH y la CE se incrementaron y se estabilizaron después de tres semanas de incubación. El pH, la aireación y el contenido de K aumentaron, mientras que la retención de agua disminuyó con el incremento de la proporción de carbonilla en la mezcla. Las mayores masas aéreas, índices de crecimiento e índice SPAD ocurrieron en el sustrato con 20% de carbonilla y el sustrato comercial en ambas especies. Con porcentajes de carbonilla superiores al 20% se redujo el crecimiento. Al final del cultivo, el pH en los sustratos con carbonilla fue superior al recomendado para ambas especies, mientras que el sustrato comercial mantuvo un pH cercano al inicial. En conclusión, la carbonilla puede incluirse en una proporción de hasta un 20% en el sustrato, sin afectar el crecimiento de *Petunia hybrida* y *Calibrachoa hybrida*.

Palabras clave: biocarbón, ornamentales, medio de cultivo sin suelo.

ABSTRACT

Fine charcoal is a residue from charcoal production, with potential to be used as a substrate component. The aim of this work was to evaluate the effect of the addition of fine charcoal to the substrate on the growth of *Petunia hybrida* and *Calibrachoa hybrida*. For this, substrates were formulated by mixing peat with 20, 30, 40 and 50% fine charcoal. The substrates were incubated for five weeks to determine pH and electrical conductivity (EC) stabilization time. Substrates and components were characterized physicochemically. The study was conducted using a completely randomized design with twelve replications to evaluate growth parameters of both species grown in the formulated substrates and in a commercial substrate, as well as pH and EC at the end of the culture. pH and EC increased and stabilized after three weeks of incubation. pH, aeration and K content increased, while water retention decreased with increasing amounts of charcoal in the mixture. The highest aerial mass values, growth rates and SPAD index occurred in the substrate with 20% fine charcoal and the commercial substrate in both species. Growth was reduced with fine charcoal applied at higher than 20%. At the end of the culture, pH in the substrates with fine charcoal was higher than that recommended for both species, while the commercial substrate maintained values close to the initial pH. In conclusion, fine charcoal can be included at a rate of up to 20% in the substrate without affecting the growth of *Petunia hybrida* and *Calibrachoa hybrida*.

Keywords: biochar, ornamentals, soilless growing media.

INTRODUCCIÓN

Un sustrato es un medio poroso que, colocado en un contenedor, proporciona anclaje, agua y oxígeno a las plantas que crecen en él (Svartz y Raimondo 2022). Para ello, debe poseer determinadas propiedades físicas y químicas acordes con las características del sistema de cultivo en el que será empleado, por ejemplo, el sistema de riego, tamaño de contenedor, especie y fertilizantes. La turba es uno de los sustratos más utilizados a nivel mundial debido a sus excelentes características fisicoquímicas como su alta capacidad de retención de agua, su alta capacidad de aireación y su bajo contenido de sales y pH. Sin embargo, recientemente ha habido cuestionamientos desde el punto de vista ambiental y económico al uso de la turba al ser un recurso no renovable extraído de humedales que prestan importantes servicios ecosistémicos. (Taparia et al., 2021). Por eso, en los últimos años, se ha incrementado el uso de otros componentes como la fibra de coco, la fibra de madera y los compost de residuos animales y vegetales (Gruda et al., 2019). El biocarbón es uno de los materiales que ha comenzado a estudiarse recientemente como alternativa (Escuer et al., 2021). Es un material con alto contenido de carbono, resultante de la combustión lenta de la biomasa en condiciones limitadas de oxígeno, proceso denominado pirólisis (Chrysargyris et al., 2019). El biocarbón es un subproducto de ciertos procesos de generación de energía y de la producción de carbón vegetal (Escuer et al., 2021) y su producción es además una alternativa para el tratamiento de residuos agroindustriales (Rex

et al., 2023). Se ha demostrado que su aplicación a suelos agrícolas mejora sus propiedades y como consecuencia el crecimiento de los cultivos, sumado esto al beneficio medioambiental en cuanto a la posibilidad de secuestro del carbono en el suelo y la consecuente disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (Li y Tasnady, 2023). Como propiedades para ser empleado como sustrato, se destacan su baja densidad aparente, su alta porosidad, capacidad de retención de agua, aireación, capacidad de intercambio catiónico y disponibilidad de ciertos nutrientes (Zulfiqar et al., 2022). Los biocarbones suelen tener pH alcalino mientras que, por el contrario, la turba tiene pH muy bajos (3-4). Por esta razón es que algunos autores han evaluado la combinación de biocarbón con turba para lograr un pH adecuado sin la necesidad del agregado de carbonato de calcio o dolomita, sustancias comúnmente usadas para tal fin (Zaccheo et al., 2014; Judd et al., 2017).

En los últimos años se han publicado varios trabajos en los que evaluaron el biocarbón como componente de sustratos. Algunos autores observaron efectos positivos sobre el crecimiento vegetal (Chrysargyris et al., 2019; Nobile et al., 2020) mientras que otros reportaron efectos negativos (Bai et al. 2022, Regmi et al. 2022). Estas diferencias en los resultados podrían estar relacionadas con la diversidad de los biocarbones evaluados. El origen de la materia prima y las condiciones de elaboración como la temperatura y la disponibilidad de oxígeno afectan las propiedades de los biocarbones y consecuentemente su efecto en el crecimiento de las plantas (Zulfiqar et al., 2022). Por eso, se

hace imprescindible evaluar las características físicas y químicas de los sustratos formulados con biocarbón.

El biocarbón utilizado en este estudio, denominado localmente carbonilla, es un residuo de la producción de carbón vegetal. y consiste en partículas de carbón cuyo reducido tamaño no permite que puedan ser aprovechados comercialmente. La carbonilla se genera durante el proceso de fabricación, transporte y comercialización del carbón vegetal. En la Argentina, el carbón vegetal mayormente se produce en hornos de barro denominados de media naranja y la producción se concentra principalmente en las provincias de Chaco y Santiago del Estero (Vargas et al., 2019). Las especies utilizadas son las presentes en el bosque nativo, como *Aspidosperma quebracho blanco* Schlecht, *Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl., *Prosopis nigra* Griseb y *Ziziphus mistol* Griseb entre otras (Araujo et al., 2019). El uso de la carbonilla como componente de sustrato contribuiría a la reducción de problemas ambientales que pudieran originarse del inadecuado manejo de este residuo.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el uso de la carbonilla como componente de sustrato, mezclándola en diferentes proporciones con turba, y estudiar su efecto sobre el crecimiento de petunia (*Petunia hybrida*) y calibrachoa (*Calibrachoa hybrida*). Se evaluó el tiempo de estabilización del pH y la CE de las mezclas antes de utilizarlas como sustrato para plantas. Luego se determinaron las características físicas y químicas de los sustratos formulados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Componentes puros y sustratos

Se utilizó una carbonilla proveniente de un distribuidor de carbón vegetal ubicado en el partido de La Plata, Buenos Aires, Argentina y una turba de *Sphagnum* (Terrafertil®). El carbón vegetal fue elaborado con las especies *Aspidosperma quebracho blanco* Schlecht y *Prosopis nigra* Griseb. El tiempo y la temperatura de elaboración fueron de 7 días y 500 °C, respectivamente. La carbonilla fue previamente tamizada con una malla de 10 mm para eliminar los residuos muy gruesos. Se formularon cuatro sustratos mezclando la turba con 20% (20C), 30% (30C) 40% (40C) y 50% (50C) de carbonilla. Para los ensayos con plantas se utilizaron los cuatro sustratos formulados y se incluyó un sustrato comercial (SM) (Z-Floricultura, Terrafertil®), elaborado a base de turba, compost de corteza de pino, compost de residuo de poda, y perlita

que contiene además una fertilización de base con fertilizante inorgánico soluble.

Estabilización del pH y la CE de los sustratos formulados

Con el objetivo de estudiar la estabilización del pH y la CE de cada sustrato formulado, luego de su mezcla se conformaron tres repeticiones de cada tratamiento (20C, 30C, 40C y 50C). Se incluyó la turba pura como control. Cada repetición consistió en 10 L de sustrato contenidos en una bolsa negra semicerrada. Semanalmente y durante cinco semanas se tomaron muestras a las cuáles se les determinó el pH y la CE. Las bolsas se mantuvieron en un depósito del Instituto de Floricultura a una temperatura media de 20°C.

Caracterización fisicoquímica de componentes puros y sustratos

La carbonilla, la turba, los sustratos formulados previamente estabilizados y el sustrato comercial se caracterizaron física y químicamente. Se midieron las siguientes variables de acuerdo a las metodologías descritas por Barbaro et al. (2019): densidad aparente (Dap); espacio poroso total (EPT); capacidad de retención de agua (CRA) y poros con aire (PA); granulometría, mediante tamizadora vibratoria (Itoh, modelo MS-200, Mitsuya-cho, Yokkaichi-shi Mie, Japón), expresándose los resultados como porcentajes de partículas mayores a 3,35, entre 3,35 y 1 mm y menores a 1 mm; pH (potenciómetro Hanna, modelo Edge, Woonsocket, Rhode Island, EUA) y conductividad eléctrica (CE) (conductímetro Thermo Orion modelo 145, Waltham, Massachusetts, EUA) en una suspensión acuosa con una relación 1:5 v/v de sustrato/agua. En la suspensión filtrada, se midió la concentración de calcio, magnesio y potasio con un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian modelo 220 A, Mulgrave Victoria, Australia) y fósforo (Murphy y Riley, 1964) y nitratos (Cataldo et al., 1974) con un espectrofotómetro UV/visible (Shimadzu, modelo UV-1900i, Kyoto, Japón).

Desarrollo de plantas de petunia y calibrachoa en macetas

El experimento fue realizado en un invernáculo del Instituto de Floricultura, provincia de Buenos Aires, República Argentina (34°36' latitud S, 58°40' longitud O) durante los meses de septiembre y octubre del año 2023. Se evaluaron cinco tratamientos: las cuatro formulaciones conteniendo carbonilla (20C, 30C, 40C y 50C) y el sustrato comercial desarrollado para trasplante (SM). Se utilizaron plantas de calibrachoa var. Garden Rose y petunia var. Limbo Sweet Pink cultivados en bandejas de 200 celdas provistos

por una plantinera comercial. Los plantines se trasplantaron a macetas plásticas termoformadas de 370 mL de capacidad, una planta por maceta. Se empleó un diseño completamente aleatorizado, con doce repeticiones por tratamiento, siendo cada maceta una repetición. Las plantas se regaron con agua de pozo (pH: 7,5; CE: 0,75 dS m⁻¹; alcalinidad: 360 ppm de CaCO₃) y se fertilizaron semanalmente con 50 mL por maceta de una solución con 200 ppm de N resultante de la combinación de fertilizante soluble a dosis de 1 g L⁻¹ de Hakaphos Rojo® (18% N, 8% P, 15% K, 0,8% S, 0,7% Mg, y menos de 0,05% de Fe, Cu, Zn, Mn, B y Mn) y 0,2 g L⁻¹ de nitrato de calcio (16,5% de N, 19,5% de Ca). Luego de 28 y 42 días desde el trasplante para petunia y calibrachoa, respectivamente, se midieron la masa seca aérea, el número de flores abiertas por planta y el índice SPAD con un clorofilómetro (SPAD 502, Minolta, Tokyo, Japan). Los valores medidos con este instrumental, para una determinada especie y variedad y bajo las mismas condiciones de cultivo, pueden ser usados como un indicador de contenido relativo de clorofila (de Souza Terassi et al., 2023). Los valores del índice SPAD se obtuvieron del promedio de tres mediciones tomadas de tres hojas diferentes por planta. Se calculó además el índice de crecimiento (IC), utilizando la siguiente fórmula: $IC = (H+A1+A2)/3$; donde H es la altura de la planta, A1 es el ancho de mayor magnitud de la planta y A2 es el ancho de la planta perpendicular a A1 (Parajuli et al., 2023). Al final del ensayo se determinaron el pH y la CE

de los sustratos con la metodología de extracción acuosa 1:5 (v/v), descrita anteriormente. Para ello, las determinaciones se hicieron por triplicado, cada repetición consistió en una muestra compuesta con sustrato de cuatro macetas de cada tratamiento.

Análisis estadístico

Se utilizó el análisis de varianza para detectar diferencias significativas entre los tratamientos y las diferencias entre medias se analizaron mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$) en todos los parámetros evaluados. Las diferencias entre el pH y la CE final e inicial de cada tratamiento en el ensayo con plantas se analizaron mediante la prueba t de Student, para muestras apareadas ($p < 0,05$). Se empleó el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estabilización del pH y la CE de los sustratos formulados

El pH se incrementó rápidamente con el tiempo en todas las mezclas hasta la segunda semana, a partir de la cual, el incremento semanal fue mínimo hasta la quinta semana (Fig. 1a). Estos resultados coinciden con los de Zaccheo et al. (2014), que al incubar turba con 30 o 40% de biocarbón durante 3 semanas, encontraron que el pH aumentó con el tiempo y se estabilizó a la segunda semana.

Se observó un aumento de la CE, pero a partir

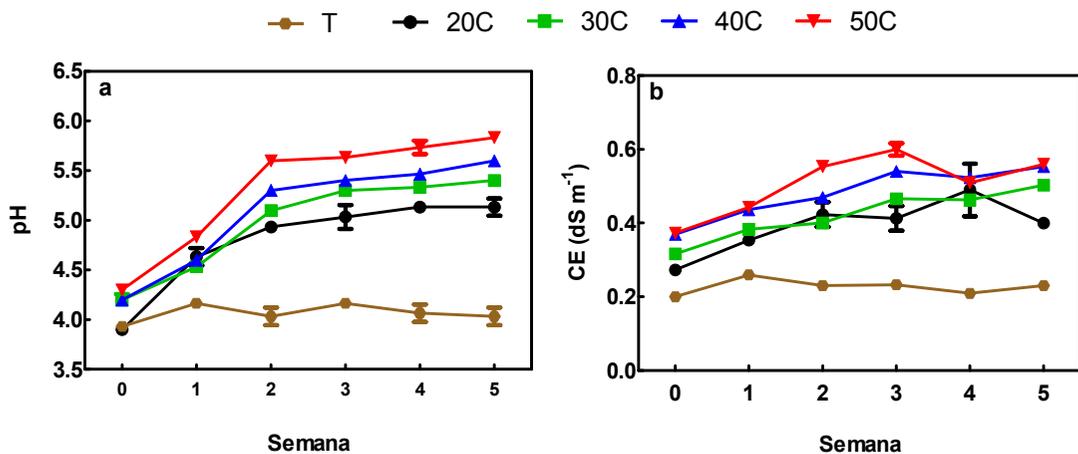


Fig. 1. pH (a) y conductividad eléctrica (CE)(b), medidos semanalmente en un extracto acuoso 1:5 (v/v). Los tratamientos son: turba pura (T) y mezclada con 20% (20C), 30% (30C), 40% (40C) y 50 % (50C) de carbonilla. Barras verticales indican el error estándar de cada media.

Fig. 1. pH (a) and electrical conductivity (EC)(b), measured weekly in a 1:5 (v/v) aqueous extract. The treatments are: pure peat (T) and mixed with 20% (20C), 30% (30C), 40% (40C) and 50% (50C) of fine charcoal. Vertical bars indicate the standard error of each mean.

de la tercera semana comenzó a estabilizarse en todos los tratamientos (Fig. 1b).

Características de componentes y sustratos

En la Tabla 1 se presentan las características físicas de la carbonilla, la turba, los sustratos formulados y el sustrato comercial. La carbonilla y la turba presentaron valores contrastantes en sus características físicas. La Dap de la turba fue la más baja de todos los sustratos evaluados mientras que la carbonilla presentó la Dap más alta. En los sustratos formulados, la Dap se incrementó de manera significativa con el aumento del contenido de carbonilla en la mezcla, coincidiendo con los resultados obtenidos por Dispenza et al. (2016), quienes evaluaron mezclas de biocarbón con turba y observaron que la Dap del sustrato aumentó al aumentar su contenido de biocarbón. Sin embargo, todos los sustratos formulados tuvieron valores de Dap inferiores a 400 kg m⁻³. Dap mayores a ese valor dificultan la manipulación y transporte del sustrato (Abad et al., 2001; Barbaro et al., 2019).

La carbonilla presentó predominantemente partículas de granulometría media (1-3,5 mm) y en menor proporción partículas gruesas (>3,5 mm). En la turba, por el contrario, predominaron las partículas finas (<1mm) y en menor proporción las partículas medianas. En todos los sustratos formulados con carbonilla, el porcentaje de partículas entre 3,5 a 1 mm fue superior al 54% y se incrementó con el aumento de la proporción de carbonilla en la mezcla, mientras que el porcentaje de partículas menores a 1 mm fue inferior al 35% y disminuyó al aumentar la proporción de

carbonilla en la mezcla. En el sustrato comercial, por el contrario, fueron predominantes las partículas menores a 1 mm (53%), respecto a las partículas entre 3,5 mm y 1 mm (34%). El porcentaje de partículas mayores a 3,5 mm fue similar en todos los sustratos formulados con carbonilla (11,11 a 13,93%), excepto en el 50C que tuvo un valor significativamente superior.

La proporción de los diferentes tamaños de partículas de un sustrato determinan la relación entre los poros que estarán ocupados con aire y aquellos ocupados con agua (Agarwal et al., 2021). En general, las partículas menores a 1 mm contribuyen a la retención de agua, mientras que las partículas por encima de esta medida contribuyen a dar aireación a un sustrato (Barbaro et al., 2019). Esto se refleja en los valores de PA y CRA de los sustratos evaluados. La carbonilla presentó una alta PA y una baja CRA en contraste con la turba. De manera similar, Bedussi et al. (2015) encontraron una alta PA y una baja CRA en un biocarbón de madera de picea con predominancia de partículas medias a gruesas (>2mm) y, por el contrario, una alta CRA y una baja PA en un biocarbón de madera de álamo, en el que predominaban las partículas menores a 2 mm. En cuanto a los sustratos formulados, la PA aumentó y la CRA disminuyó con el aumento de la proporción de carbonilla en la mezcla. Los sustratos formulados con carbonilla presentaron una PA con valores entre 33 y 42% y una CRA del 39 al 54%. Northup (2013) y Dispenza et al. (2016) también encontraron un aumento en la PA y una disminución de la CRA al incrementar el porcentaje de biocarbón en mezclas con turba.

Tabla 1. Densidad aparente (Dap), porcentaje de partículas mayores a 3,5 mm, entre 3,5 mm y 1 mm y menores a 1 mm, porosidad de aireación (PA), capacidad de retención de agua (CRA) y espacio poroso total (EPT) de componentes, sustratos formulados y sustrato comercial.

Table 1. Bulk density (Dap), percentage of particles greater than 3.5 mm, between 3.5 mm and 1 mm and less than 1 mm, aeration porosity (PA), water retention capacity (CRA) and total pore space (EPT) of components, formulated substrates and commercial substrate.

Sustrato	Dap (Kg m ⁻³)	Partículas (%)			PA (%)	CRA (%)	EPT (%)
		> 3,35 mm	3,35-1 mm	< 1 mm			
Turba	119,30 f	4,58 d	30,66 f	64,80 a	26,57 e	65,07 a	91,69 a
20C	201,33 e	11,11 c	54,53 d	34,36 c	32,96 d	54,37 b	87,33 c
30C	246,67 d	14,13 c	60,23 c	25,64 d	37,13 c	48,30 c	85,43 d
40C	288,00 c	13,93 c	66,24 b	19,83 e	38,16 c	44,87 d	83,03 e
50C	318,00 b	18,74 b	66,52 b	14,74 f	42,47 b	39,43 e	81,90 f
Carbonilla	422,00 a	28,26 a	71,01 a	0,73 g	54,67 a	20,01 f	74,67 g
SM	200,33 e	12,43 c	33,64 e	53,93 b	40,32 bc	48,33 c	88,65 b

20C, 30C, 40C y 50C corresponden a sustratos elaborados con turba y proporciones del 20, 30, 40 y 50 % de carbonilla, respectivamente. SM: sustrato comercial para trasplante. Letras diferentes indican diferencias significativas entre medias para cada parámetro (Prueba de Tukey, p<0,05).

Para los sustratos se recomiendan, en general, valores de PA entre 20 a 30%, CRA entre 50 a 60% y EPT superior al 80% (Abad et al., 2001; Atzori et al., 2021). El EPT de los sustratos formulados, si bien disminuyó con el aumento de la proporción de carbonilla, resultó estar dentro del rango óptimo. Por otro lado, los sustratos formulados y el sustrato comercial tuvieron valores de PA superiores a lo recomendado, y la CRA en algunos casos estuvo por debajo del límite inferior. Sin embargo, el problema de una excesiva PA y una baja CRA puede ser resuelto aumentando la frecuencia de riego y no sería una limitante tan severa como un exceso de retención de agua (Fornes y Belda, 2018). Por lo tanto, la carbonilla evaluada, debido a su alta PA, podría ser utilizada como componente de sustratos para mejorar la aireación, de manera similar a la perlita o el compost de corteza de pino.

Se encontraron diferencias significativas en las propiedades químicas de los sustratos y componentes evaluados (Tabla 2). La carbonilla presentó un pH superior al neutro (7,73) lo cual coincide con lo observado por otros autores. Por ejemplo, Nobile et al. (2020) observaron que los pH de seis biocarbones, hechos a partir de diferentes residuos vegetales, tuvieron un pH que varió entre 7,9 a 11,4. La turba presentó bajos valores de pH tal como se esperaba. El pH de las mezclas se incrementó con el aumento de la proporción de carbonilla en el sustrato. El menor valor de pH (5,13) se obtuvo con el 20% de carbonilla mientras que el mayor valor (5,83) con la incorporación de 50% de carbonilla en la mezcla (Tabla 2). Estos resultados son similares a los obtenidos por Gasco et al. (2018) y Nieto et al. (2016) quienes informaron valores de pH

superiores en las mezclas de biocarbón con turba, en relación con el pH de la turba pura. En el mismo sentido, Bedussi et al. (2015) demostraron que la mezcla de biocarbón con turba permitió amortiguar su acidez y de esta manera obtener un pH óptimo para el cultivo de plantas en contenedor sin la necesidad del agregado de otros agentes enclantes. Para evitar deficiencias o exceso de nutrientes, se recomienda que el pH del sustrato para la mayoría de las plantas cultivadas en maceta se encuentre entre 5,2 a 6,5 (Abad et al., 2001). Los sustratos formulados con 30, 40 y 50% de carbonilla se encuentran dentro de este rango. La CE de los sustratos formulados varió entre 0,40 dS m⁻¹ a 0,56 dS m⁻¹ (Tabla 2), valores considerados adecuados para la metodología empleada que recomienda que los valores estén por debajo de 1 dS m⁻¹ (Barbaro et al., 2019). La baja CE en un sustrato previo a su uso, facilita el manejo de la nutrición a través de la fertilización durante el ciclo del cultivo (Barbaro et al., 2023).

Respecto a la concentración de elementos solubles, la carbonilla presentó valores significativamente superiores de Ca, Mg y K, respecto al resto de los sustratos. Resultó particularmente alto el contenido de potasio de la carbonilla y consecuentemente, de los sustratos formulados con ella al aumentar su proporción en los mismos. Hossain et al. (2020) y Xiu et al. (2023) también observaron altos valores de potasio soluble en biocarbones. Chrysargyris et al. (2019) coinciden en informar que los niveles de K aumentaron en los sustratos formulados al incrementar la proporción de biocarbón en la mezcla. La concentración de P resultó menor en la carbonilla, respecto a la turba, y disminuyó en los sustratos formulados al aumentar su proporción

Tabla 2. pH, conductividad eléctrica (CE) y contenido de N-NO₃, P, K, Ca y Mg en extracto acuoso 1:5 (v/v) de componentes, sustratos formulados y sustrato comercial.

Table 2. pH, electrical conductivity (EC) and content of N-NO₃, P, K, Ca and Mg in aqueous extract 1:5 (v/v) of components, formulated substrates and commercial substrate.

Sustrato	pH	CE (dS m ⁻¹)	Elementos solubles (mg L ⁻¹ de sustrato)				
			N-NO ₃	P	K	Ca	Mg
Turba	4,17 e	0,28 d	29,61 a	7,93 b	10,71 e	12,93 b	5,52 b
20C	5,13 d	0,40 c	13,42 b	8,93 b	145,83 d	18,57 b	7,43 b
30C	5,37 cd	0,50 b	7,25 c	7,57 bc	189,57 cd	20,1 b	7,90 b
40C	5,57 bc	0,55 a	3,35 cd	5,70 c	194,37 c	21,37 b	8,21 b
50C	5,83 b	0,56 a	5,20 c	5,63 c	243,93 b	19,9 b	8,02 b
Carbonilla	7,73 a	0,60 a	0,61 d	2,97 d	303,50 a	65,03 a	21,83 a
SM	5,10 d	0,29 d	7,33 c	24,30 a	151,53 cd	3,67 c	7,47 b

20C, 30C, 40C y 50C corresponden a sustratos elaborados con turba y proporciones del 20, 30, 40 y 50 % de carbonilla, respectivamente. SM: sustrato comercial para maceta. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre los sustratos para cada parámetro (prueba de Tukey, p<0.05).

de manera similar a lo observado por Dispenza et al. (2016). El contenido de Ca y Mg fue superior en la carbonilla respecto a la turba, sin embargo, esto no afectó de manera significativa sus concentraciones en los sustratos formulados. La composición química de los biocarbones puede ser muy variables en función de la materia prima y las condiciones de pirólisis (Gezahegn et al., 2019). Al respecto, Evans et al. (2017) evaluaron siete biocarbones diferentes y encontraron una gran variación en el contenido de elementos solubles y lo atribuyeron a las diferencias en la materia prima utilizada para su elaboración.

Ensayos con plantas en macetas

Al final del cultivo de petunia y calibrachoa se encontraron diferencias significativas en el valor de pH entre los tratamientos (Fig. 2). En petunia,

los pH resultaron muy elevados con más de 30% de carbonilla (6,63), mientras que se observaron valores aceptables en el sustrato comercial y el sustrato con 20% de carbonilla. En calibrachoa, los valores de pH fueron aún mayores que en petunia, ya que con sólo un 20% de carbonilla se alcanzó un pH final de 7,13; mientras que con un 40 y 50% de carbonilla se llegó a un valor de 7,93. En todos los sustratos formulados con carbonilla se encontraron diferencias significativas entre el valor de pH inicial y final en ambas especies (Fig. 2). En petunia no hubo diferencias entre el pH inicial y final en el sustrato SM mientras que en calibrachoa, si bien hubo una diferencia significativa, fue mínima. Para petunia el sustrato 20C tenía un pH inicial de 5,13, similar al pH inicial del SM (5,10); sin embargo, al final del cultivo de petunia los valores de pH fueron 6,23 y 5,3 para

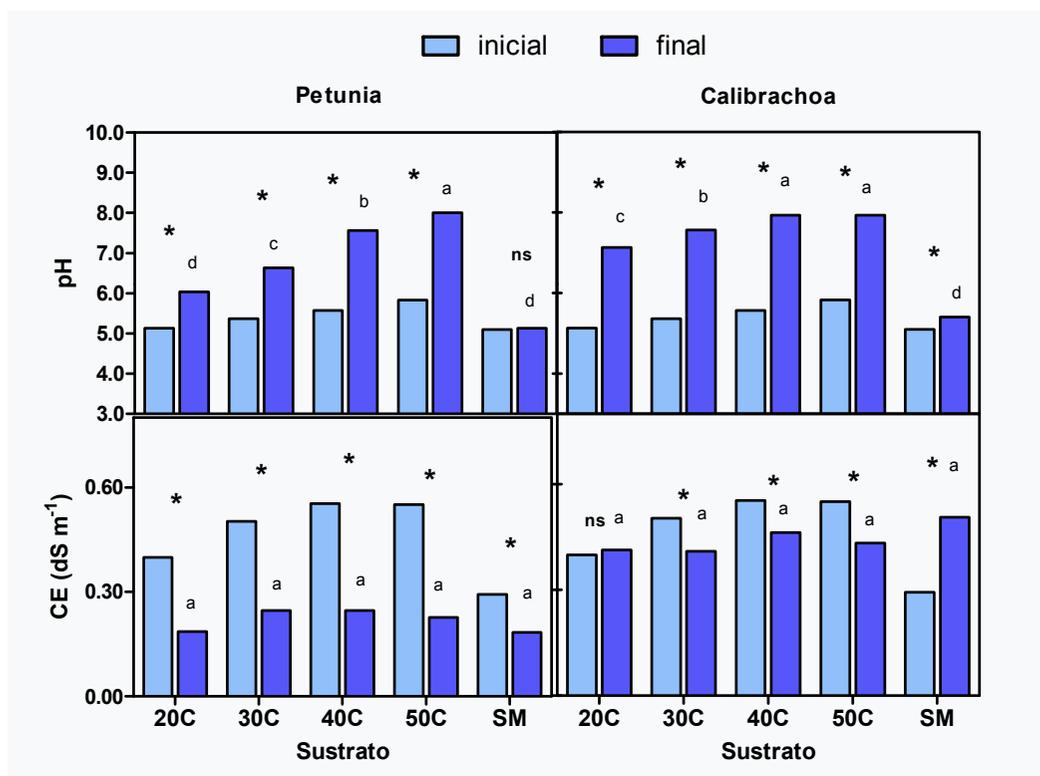


Fig. 2. pH y CE en extracto acuoso 1:5 (v/v) de los sustratos al inicio y al final del cultivo para petunia y calibrachoa. 20C, 30C, 40C y 50C corresponden a sustratos elaborados con turba y proporciones del 20, 30, 40 y 50 % de carbonilla, respectivamente. SM: sustrato comercial para trasplante. Letras diferentes indican diferencias significativas en el pH y la CE final entre sustratos (Prueba de Tukey, $p < 0,05$). Asteriscos indican diferencias significativas entre pH y CE inicial y final para cada sustrato (Prueba t de Student para muestras apareadas, $p < 0,05$).

Fig. 2. pH and EC in aqueous extract 1:5 (v/v) of the substrates at the beginning and at the end of cultivation for petunia and calibrachoa. 20C, 30C, 40C and 50C correspond to substrates made with peat and proportions of 20, 30, 40 and 50% fine charcoal, respectively. SM: commercial substrate for transplant. Different letters indicate significant differences in the final pH and EC between substrates (Tukey's test, $p < 0.05$). Asterisks indicate significant differences between initial and final pH and EC for each substrate (Student's t test for paired samples, $p < 0.05$).

los sustratos 20C y SM, respectivamente. Una de las causas de la gran diferencia entre el pH inicial y final en los sustratos conteniendo carbonilla podría ser que durante el cultivo la carbonilla se haya degradado y, como consecuencia, se hayan liberado sustancias alcalinizantes al sustrato. Escuer et al. (2021) tuvieron resultados similares al cultivar plantines de copete (*Tagetes patula* L.) durante un mes, en sustratos compuestos por turba y biocarbón en diferentes proporciones. En su trabajo, atribuyeron el aumento del pH durante el cultivo a la disolución de minerales alcalinos contenidos en el biocarbón. Respecto a la CE al final del cultivo, no hubo diferencias entre tratamientos en ninguna de las dos especies (Fig. 2); en petunia todos los valores estuvieron por debajo de $0,29 \text{ dS m}^{-1}$ y en calibrachoa por debajo de $0,55 \text{ dS m}^{-1}$. En petunia, la CE final fue significativamente inferior a la inicial en todos los tratamientos, siendo menor la diferencia en el sustrato comercial. Esta diferencia podría

explicarse por la pérdida de elementos solubles por lixiviación y absorción por parte de la planta durante su crecimiento. En calibrachoa, no hubo diferencias entre la CE final e inicial en el sustrato 20C, mientras que en los tratamientos 30C, 40C y 50C, la CE final fue menor a la inicial y en el SM, por el contrario, la CE final fue superior a la inicial. Este último hecho podría explicarse por la mayor capacidad de retención de agua del sustrato SM que pudo haber generado una mayor acumulación de sales en relación con los sustratos formulados con carbonilla.

Se encontraron diferencias significativas en la masa seca aérea entre los tratamientos (Fig. 3a). En petunia y en calibrachoa, las mayores masas se obtuvieron con los sustratos 20C y SM, aunque en calibrachoa la masa aérea en el sustrato 30C no se diferenció significativamente del sustrato 20C y el SM. En petunia, la masa seca aérea fue baja y similar entre sí en los sustratos 30C, 40C y 50C. En calibrachoa, en estos tratamientos,

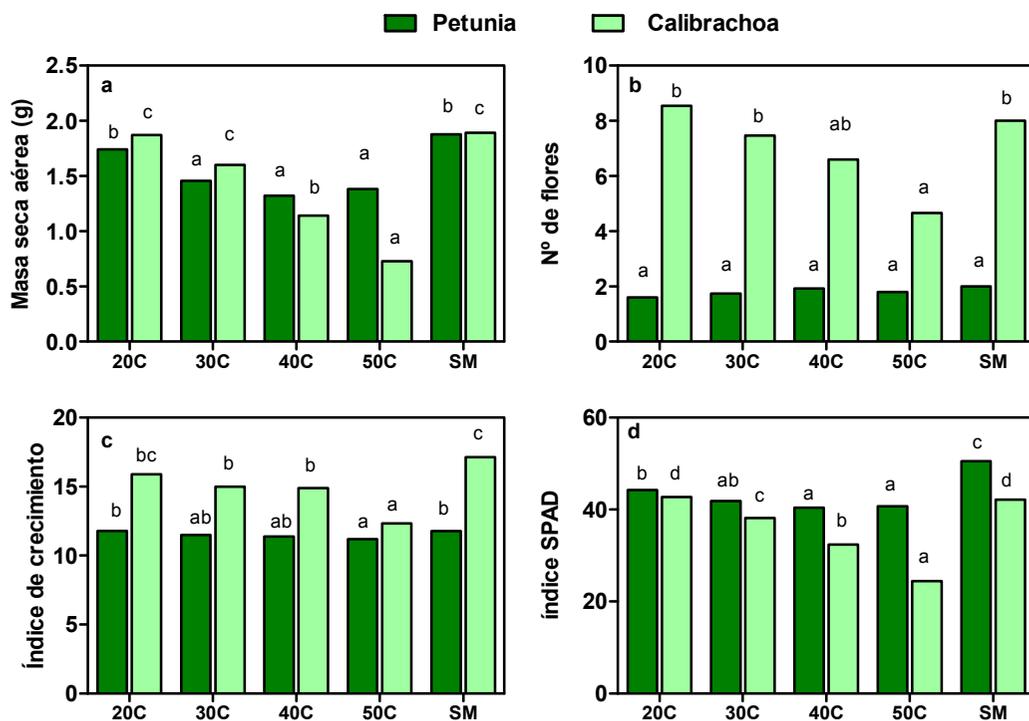


Fig. 3. Masa seca aérea (a), número de flores (b), índice de crecimiento (c) e índice SPAD (d) de plantas de petunia y calibrachoa en los diferentes tratamientos. 20C, 30C, 40C y 50C corresponden a sustratos elaborados con turba y proporciones del 20, 30, 40 y 50 % de carbonilla, respectivamente. SM: sustrato comercial para macetas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada parámetro. (Prueba de Tukey, $p < 0,05$).

Fig. 3. Aerial dry weight (a), number of flowers (b), growth index (c) and SPAD index (d) of petunia and calibrachoa plants in the different treatments. 20C, 30C, 40C and 50C correspond to substrates made with peat and proportions of 20, 30, 40 and 50% fine charcoal, respectively. SM: commercial potting substrate. Different letters indicate significant differences between treatments for each parameter. (Tukey test, $p < 0,05$).

la masa seca aérea disminuyó gradualmente al incrementarse la proporción de carbonilla en la mezcla, observándose de esta manera diferencias entre ellos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Lamichhane et al. (2024), quienes también encontraron una reducción en la biomasa aérea de plantas de crisantemo (*Chrysanthemum* L.) y kale (*Brassica oleracea* L.), crecidos en sustratos con 25 y 75% de biocarbón en relación con el sustrato a base de turba sin biocarbón.

El número de flores no se vio afectado por los tratamientos en petunia. En calibrachoa, en cambio, se encontraron diferencias significativas en este parámetro entre los sustratos. El mayor número de flores se observó en los tratamientos 20C y SM, aunque no se diferenciaron significativamente de los tratamientos 30C y 40C. El menor número de flores se observó en el tratamiento 50 C (Fig. 3b). De manera similar, Regmi et al. (2022) encontraron que una proporción de biocarbón del 50% en el sustrato redujo la floración de planta de *Viola cornuta* L, aunque proporciones de 10 y 25% incrementaron el número de flores, respecto al sustrato control sin biocarbón.

Las plantas de petunia crecidas en los sustratos 20C, 30C y 40C presentaron un índice de crecimiento similar al sustrato comercial SM, mientras que este parámetro fue inferior en el sustrato 50C respecto a los sustratos 20C y SM. En calibrachoa, sólo el índice de crecimiento de las plantas crecidas en el sustrato 20C fue similar al sustrato SM, pero no se diferenció significativamente de los sustratos 30C y 40C, aunque sí del sustrato 50C donde se obtuvo el valor más bajo (Fig. 3c).

En cuanto al índice SPAD, las plantas de petunia tuvieron su mayor valor en el sustrato SM, que se diferenció de manera significativa del resto de los tratamientos. El índice SPAD de los sustratos 20C y 30C fue similar, y los menores valores se obtuvieron en los sustratos 40C y 50C que se diferenciaron de manera significativa del sustrato 20C. En calibrachoa, los mayores índices SPAD se obtuvieron con los sustratos SM y 20C sin diferencias significativas entre ellos, y los menores valores en los sustratos 30C, 40C y 50C en ese orden (Fig. 3d). En coincidencia, García-Rodríguez et al. (2022) encontraron una reducción en el índice SPAD de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con el aumento de la proporción de biocarbón el sustrato mezclado con turba; observaron que, proporciones de hasta un 30%, no afectaron el índice SPAD, mientras que con un 50% de biocarbón, el índice SPAD se redujo en relación con la turba pura. Nocentini et al. (2024) obtuvieron una reducción en el índice SPAD en plantas de albahaca (*Ocimum basilicum*

L.), crecidas en un sustrato a base de turba con 25% de biocarbón en relación con el control de turba pura.

El alto pH de los sustratos formulados con la carbonilla podría ser la causa principal de los efectivos negativos observados en los parámetros de crecimiento medidos en este trabajo. En ese sentido, Escuer et al. (2021) obtuvieron una correlación negativa entre el pH del sustrato conteniendo biocarbón y parámetros de crecimiento de la parte aérea y radical de plantines de copete (*Tagetes patula* L.). De manera similar, Nobile et al. (2020) encontraron una correlación negativa entre el pH del sustrato formulado con biocarbón y la biomasa de plantines de lechuga y pensamiento (*Viola wittrockiana* Gams.). El incremento del pH con la incorporación de la carbonilla podría reducir la disponibilidad de hierro en el sustrato.

Radhamani et al. (2016) encontraron una correlación positiva y significativa entre los valores de índice SPAD foliares y el contenido de hierro foliar, debido a la importancia de este elemento para la síntesis de clorofila. Tanto en petunia como en calibrachoa, dos especies ineficientes en la absorción de hierro, se ha estudiado previamente el efecto del pH del sustrato sobre el crecimiento. Dickson et al. (2016) observaron que plantas de calibrachoa, crecidas en sustrato a base de turba con pH ajustado a 7, presentaron valores muy bajos de índice SPAD, masa seca y concentración de hierro en la parte aérea, en contraste con plantas crecidas en sustrato con un valor 5 de pH. Smith et al. (2004) encontraron que al incrementar gradualmente el pH del sustrato de 5,3 a 7 disminuyeron el índice SPAD y la biomasa aérea de plantas de petunia.

En función de los resultados se puede considerar, en general, que la incorporación de hasta un 20% de carbonilla permitió el crecimiento adecuado de plantas de petunia y calibrachoa. Los resultados del presente estudio coinciden con lo publicado por Blok et al. (2017), quienes concluyeron en su trabajo que el biocarbón de madera puede ser utilizado en un 20% en una mezcla con turba sin afectar de manera negativa el crecimiento de las plantas.

CONCLUSIONES

La carbonilla estudiada, derivada de *Aspidosperma quebracho blanco* Schlecht y *Prosopis nigra*. Griseb, puede ser utilizada como componente de sustrato, mezclado con turba en una proporción de hasta un 20% para el cultivo en macetas de petunia y calibrachoa, sin afectar de manera negativa el crecimiento. Por su alta porosidad, la carbonilla puede ser utilizada en la

elaboración de sustratos para proveer aireación. El pH de los sustratos formulados con carbonilla en todas las proporciones evaluadas estuvo dentro del rango adecuado antes de su uso. Sin embargo, los valores de pH al final del cultivo estuvieron por encima del valor recomendado, con excepción del sustrato con 20% de carbonilla en petunia. Por eso, se requieren futuros ensayos para estudiar este fenómeno y evaluar posibles soluciones. Se recomienda además realizar ensayos con un mayor número de especies.

Contribución de los autores

- a. Participación activa en la revisión bibliográfica: E.J.R.
- b. Participación activa en la elaboración de la metodología: E.J.R., M.A.K, A.B.
- c. Participación activa en la discusión de los resultados: E.J.R., L.A.B.
- d. Revisión y aprobación de la versión final del artículo: E.J.R., M.A.K., A.B., L.A.B.

LITERATURA CITADA

- Abad, M., P. Noguera, and S. Burés. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology* 77(2):197-200. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8).
- Agarwal, P., S. Saha, and P. Hariprasad. 2021. Agro-industrial-residues as potting media: Physicochemical and biological characters and their influence on plant growth. *Biomass Conversion and Biorefinery* 13(11):9601-9624. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01998-6>.
- Araujo, P.A., C. Escalada, M.P. Rueda, M.C. Iturre, C.V. Rueda, M.A. Basualdo et al. 2019. Producción del carbón vegetal en sistemas campesinos de Santiago del Estero. Una aproximación desde el enfoque de cadena de valor. *Nexo Agropecuario* 7(1):3-10.
- Atzori, G., C. Pane, M. Zaccardelli, S. Cacini, and D. Massa. 2021. The role of peat-free organic substrates in the sustainable management of soilless cultivations. *Agronomy* 11(6):1236. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010002>.
- Bai, X., S. Zhang, J. Shao, A. Chen, J. Jiang, A. Chen et al. 2022. Exploring the negative effects of biochars on the germination, growth, and antioxidant system of rice and corn. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10(3): 107398. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107398>.
- Barbaro, L. A., B. E. Iwasita, M. A. Karlanian, and E. Rubio. 2023. Use of basalt rock dust in comparison to dolomite to adjust the pH of a pine bark compost substrate and its response in nutrient availability. *Agriscientia* 40(2):49-56. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v40.n2.40487>.
- Barbaro, L., M. Karlanian, P. Rizzo y N. Riera. 2019. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 35(2):126-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>.
- Bedussi, F., P. Zacheo, and L. Crippa. 2015. Pattern of pore water nutrients in planted and non-planted soilless substrates as affected by the addition of biochars from wood gasification. *Biology and Fertility of Soils* 51:625-635. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1011-6>.
- Blok, C., C. Van der Salm, J. Hofland-Zijlstra, M. Streminska, B. Eveleens, B., i. Regelink et al. 2017. Biochar for horticultural rooting media improvement: Evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agronomy* 7(1):6. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010006>.
- Cataldo, D. A., L. E. Schrader, and V. L. Youngs. 1974. Analysis by digestion and colorimetric assay of total nitrogen in plant tissues high in nitrate 1. *Crop Science* 14(6):854-856.
- Chrysargyris, A., M. Prasad, A. Kavanagh, and N. Tzortzakis. 2019. Biochar type and ratio as a peat additive/partial peat replacement in growing media for cabbage seedling production. *Agronomy* 9:693. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110693>.
- Dickson, R. W., P. R. Fisher, S. R. Padhye, and W. R. Argo. 2016. Evaluating calibrachoa (*Calibrachoa × hybrida cerv.*) genotype sensitivity to iron deficiency at high substrate pH. *HortScience* 51(12): 1452-1457. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11038-16>.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, and C.W. Robledo. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Dispenza, V., C. De Pasquale, G. Fascella, M. M. Mammano, and G. Alonzo. 2016. Use of biochar as peat substitute for growing substrates of *Euphorbia × lomi* potted plants. *Spanish Journal of Agricultural Research* 14(4): e0908-e0908. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016144-9082>

- Escuer, O., K. Karp, J. Escuer-Gatius, H. Raave, T. Teppand, and M. Shanskiy. 2021. Hardwood biochar as an alternative to reduce peat use for seed germination and growth of *Tagetes patula*. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 71(5):408–421. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1903986>.
- Evans, M. R., B. E. Jackson, M. Popp, and S. Sadaka. 2017. Chemical properties of biochar materials manufactured from agricultural products common to the Southeast United States. *Horttechnology* 27(1):16-23. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03481-16>.
- Fornes, F., and R. M. Belda. 2018. Biochar versus hydrochar as growth media constituents for ornamental plant cultivation. *Scientia Agricola* 75(4): 304–312. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0062>.
- García-Rodríguez, A. F., F. J. Moreno-Racero, J. M. García de Castro Barragán, J. M. Colmenero-Flores, N. Greggio, H. Knicker et al. 2022. Influence of biochar mixed into peat substrate on lettuce growth and nutrient supply. *Horticulturae* 8(12):1214. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121214>.
- Gasco, G., J. Paz-Ferreiro, M. L. Álvarez, A. Saa, and A. Méndez. 2018. Biochars and hydrochars prepared by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of pig manure. *Waste management* 79:395-403. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.015>.
- Gezahegn, S., M. Sain, and S. C. Thomas. 2019. Variation in feedstock wood chemistry strongly influences biochar liming potential. *Soil Syst.* 3:26. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020026>.
- Gruda, N.S. 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 9(6):298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>.
- Hossain, M.Z., M.M. Bahar, B. Sarkar, S. W. Donne, Y. S. Ok, K. N. Palansooriya, et al. 2020. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar* 2:379–420. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>.
- Judd, L. A., B. E. Jackson, D. L. Hesterberg, M. D. Boyette, M. R. Evans, and W. C. Fonteno. 2017. Assessing biochar as a lime replacement for peat substrates. p. 21-26. In *International Symposium on Growing Media, Soilless Cultivation, and Compost Utilization in Horticulture 1266*. Portland Oregon, USA. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1266.4>
- Lamichhane, B., B. L. Dunn, H. Singh, A. Kumar, and B. Norwood. 2024. Determining eastern red cedar biochar soilless media supplementation rates for potted ornamental kale and chrysanthemum production. *HortScience* 59(6): 777-786. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17704-24>.
- Li, S., and D. Tasnady. 2023. Biochar for soil carbon sequestration: Current knowledge, mechanisms, and future perspectives. *C Journal of Carbon Research* 9(3):67. <https://doi.org/10.3390/c9030067>
- Murphy, J., and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta* 27:31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
- Nieto, A., G. Gasco, J. Paz-Ferreiro, J. M. Fernández, C. Plaza, and A. Méndez. 2016. The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. *Scientia Horticulturae* 199: 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012>.
- Nobile, C., J. Denier, and D. Houben. 2020. Linking biochar properties to biomass of basil, lettuce and pansy cultivated in growing media. *Scientia Horticulturae* 261:109001. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109001>.
- Nocentini, M., G. G. Mastrolonardo, M. Michelozzi, G. Cencetti, A. Lenzi, M. Panettieri et al. 2024. Effects of biochar and compost addition in potting substrates on growth and volatile compounds profile of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 104(3):1609-1620. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13045>
- Northup, J. I. 2013. Biochar as a replacement for perlite greenhouse soilless substrates. Thesis Master of sciences. Iowa State University, Iowa, USA. Disponible en <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/881e5fe8-792f-4270-9478-665bbe4cdd3c>.
- Parajuli, M., J. Shreckhise, D. Fare, B. Moore, P. Liyanapathirana, P. Subedi, and F. Baysal-Gurel. 2023. Evaluation of camellia cultivars and selections for growth, cold-hardiness, flowering, and disease resistance in Tennessee, USA. *HortScience* 58(12):1533-1541. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17430-23>
- Radhamani, R., R. Kannan, and P. Rakkiyappan. 2016. Leaf chlorophyll meter readings as an indicator for sugarcane yield under iron deficient typical haplotype. *Sugar Tech.* 18: 61–66. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0363-9>

- Regmi, A., S. Singh, N. Moustaid-Moussa, C. Coldren, and C. Simpson. 2022. The negative effects of high rates of biochar on violas can be counteracted with fertilizer. *Plants* 11(4):491. <https://doi.org/10.3390/plants11040491>
- Rex, P., K. R. Mohammed Ismail, N. Meenakshisundaram, P. Barmavatu, and A. V. S. L. Sai Bharadwaj. 2023. Agricultural biomass waste to biochar: A review on biochar applications using machine learning approach and circular economy. *Chem. Engineering* 7:50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>.
- Smith, B. R., P. R. Fisher, and W. R. Argo. 2004. Growth and pigment content of container-grown impatiens and petunia in relation to root substrate pH and applied micronutrient concentration. *HortScience* 39(6):1421–1425. <https://doi.org/10.21273/hortsci.39.6.1421>.
- de Souza Terassi, D., R. Rezende, G. S. Wenneck, P. S. Lourenço de Freitas, A. C. Andrade Gonçalves, V. Villa e Vila et al. 2023. Correlation of the SPAD index with absolute leaf pigments in irrigated lettuce culture in the Northwest Paraná, Brazil. *Journal of Plant Nutrition* 46(20):4657–4663. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2240816>.
- Svartz, H. A., and C. S. Raimondo. 2022. Elección y formulación adecuada de un sustrato y/o sus mezclas: Formulation and selection of an accurate substrate and/or soilless mixes. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science* 2(2):203–226. <https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n2-016>.
- Taparia, T., E. Hendrix, E. Nijhuis, W. de Boer, and J. van der Wolf. 2021. Circular alternatives to peat in growing media: A microbiome perspective. *Journal of Cleaner Production* 327: 129375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129375>.
- Vargas, A. R., J. A. Gauto, O. A. Gauto, F. Rechberger, and F. S. Bordin. 2019. Análisis socioeconómico de la producción de carbón vegetal de la cuenca de Gobernador Roca en la Provincia de Misiones. *Yvyrareta* 27:57-63. <https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/4972>.
- Xiu, L., W. Gu, Y. Sun, D. Wu, Y. Wang, H. Zhang et al. 2023. The fate and supply capacity of potassium in biochar used in agriculture. *Science of the Total Environment* 902:165969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165969>.
- Zaccheo, P., L. Crippa, and C. Cattivello. 2014. Liming power of different particle fractions of biochar. *Acta Horticulturae* 1034:363–368. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.45>.
- Zulfiqar, F., A. Moosa, M. M. Nazir, A. Ferrante, M. Ashraf, M. Nafees et al. 2022. Biochar: An emerging recipe for designing sustainable horticulture under climate change scenarios. *Frontiers in Plant Science* 13:1018646. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1018646>.