




Manejo de sistemas productivos

Artículo de investigación científica y tecnológica

Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo

 Oscar Iván Monsalve Camacho^{1*},  Martha Cecilia Henao Toro¹,

 Joan Sebastián Gutiérrez Díaz²

¹Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

²Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 # 45 -03 Edificio: 500 – Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá, Colombia. oimonsalvec@unal.edu.co

Editor temático: Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Recibido: 12 de mayo de 2020

Aprobado: 12 de agosto de 2020

Publicado: 28 de febrero de 2021

Para citar este artículo: Monsalve Camacho, O. I., Henao Toro, M. C., & Gutiérrez Díaz; J. S. (2021).

Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), e1977. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1977



Resumen

A pesar de su baja capacidad de retención de agua y de cationes, la cascarilla de arroz es el sustrato más utilizado en cultivos sin suelo (CSS) en Colombia; sin embargo, su disponibilidad ha venido disminuyendo debido a la diversificación de su uso. Con el fin de proponer materiales alternativos, se realizó la caracterización de las propiedades químicas y físicas más relevantes en once sustratos orgánicos y siete minerales, para conocer su viabilidad de uso, inocuidad y estabilidad. Los resultados indican que el pH de la perlita y piedra pómez se encuentra muy por encima del rango adecuado, al igual que la conductividad eléctrica del ladrillo molido y la tuza prensada de palma. La perlita presenta una alta concentración de potasio, la vermiculita, de hierro, y los materiales provenientes del cultivo de coco, la zeolita y piedra pómez, de sodio. El sustrato de coco muestra una alta capacidad de intercambio catiónico, que contrasta con una muy baja en la arena de río. Esta última, junto con la escoria de carbón, ladrillo molido y zeolita, tiene una alta densidad aparente. A excepción de la cascarilla de arroz, todos los materiales orgánicos presentan una óptima relación carbono/nitrógeno. La vermiculita presenta un alto contenido total de cromo, mientras que los demás sustratos presentan niveles bajos de metales pesados. Se concluye que se pueden aprovechar las mejores características de los sustratos para preparar mezclas y obtener así un material adecuado para el establecimiento de sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: cultivo sin suelo, medios de cultivo, nutrientes, propiedades fisicoquímicas, sustratos

Characterizing potential substrate materials in soilless culture systems

Abstract

Despite its low water- and cation-retention capacity, rice husk is the most common substrate in soilless cultures (SLC) in Colombia; however, its availability has decreased due to the diversification of its use. The most relevant chemical and physical properties of eleven organic substrates and seven minerals were characterized to determine their feasibility of use, safety, and stability as alternative materials. The results indicate that the pH of perlite and pumice is over the appropriate range, just like the electrical conductivity of ground brick and pressed dry palm leave. Perlite has a high potassium concentration, while vermiculite is rich in iron and coconut crop-derived materials, zeolite, and pumice in sodium. The coconut substrate shows a higher cationic exchange capacity than river sand. Together with coal slag, ground brick, and zeolite, river sand has high bulk density. Except for rice husk, all organic materials have an optimal carbon-nitrogen ratio. Vermiculite has a high total chromium content, while other substrates have low levels of heavy metals. In conclusion, the substrates' best characteristics can be used to prepare mixtures and obtain suitable material to establish SLC systems.

Keywords: chemicophysical properties, growing media, nutrients, soilless culture, substrates

Introducción

Los sustratos, también denominados medios de crecimiento (Gruda, 2019), son materiales sólidos diferentes del suelo, que se emplean para la producción agrícola en sistemas de cultivos sin suelo (CSS). Los CSS se han venido desarrollando en el mundo desde hace más de ocho décadas (Raviv & Heinrick, 2019; Savvas & Gruda, 2018). En Colombia son utilizados en la producción de clavel y miniclavel, para evitar la presencia de *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* cuando se cultiva en suelo.

Los CSS se clasifican en hidropónicos, acuapónicos, aeropónicos y en sustrato (cultivos sobre materiales químicamente activos) (El-Kazzaz & El-Kazzaz, 2017; Raviv & Heinrick, 2019; Savvas & Gruda, 2018). Los CSS se utilizan cuando (1) existe presión por enfermedades o plagas del suelo de muy difícil control, (2) se presentan factores limitantes como la salinización, agotamiento de la fertilidad natural o deterioro físico del suelo, (3) existe la necesidad de un mayor control del suministro de agua y nutrientes en el entorno radicular, (4) se requiere transportar las plantas de un lugar a otro (Cárdenas et al., 2006; Othman et al., 2019) y (5) se implementan prácticas de horticultura urbana (Nwosisi & Nandwani, 2018). Los sustratos también se utilizan en los viveros comerciales para la producción de material de propagación.

Las propiedades físicas y químicas de los materiales empleados como sustratos varían ampliamente, y su caracterización es muy importante, ya que determina la capacidad del sustrato para almacenar y liberar agua y nutrientes, para permitir la aireación y promover el desarrollo de las raíces (Gruda, 2019). Por esa razón, el sustrato debe elegirse acertadamente y usarse apropiadamente (Mayo-Prieto et al., 2020). La elección de un sustrato depende de la disponibilidad; del costo; de sus propiedades químicas, físicas e hidráulicas; homogeneidad; del objetivo del CSS y de la especie cultivada; de las condiciones climáticas; de la experiencia de manejo, y de las posibilidades de instalación (Biauxuli & Aguilar, 2002). Las principales características que deben evaluarse para la selección de un sustrato son las siguientes: la tasa de descomposición, la densidad aparente, el espacio poroso total, el espacio poroso para aireación, la capacidad de retención de agua, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Henao & Flórez, 2006).

Los sustratos pueden ser de origen orgánico, como la cascarilla de arroz, la fibra de coco y la turba; o de origen mineral, como la lana de roca y la perlita. Comparados con los materiales de origen orgánico, los de origen mineral son más estables, es decir, mantienen sus propiedades durante periodos más largos, por lo que son ampliamente utilizados, principalmente en Europa. En Colombia su uso no ha sido tan extendido debido a su alto costo y baja disponibilidad. La cascarilla de arroz es el material con mayor uso en cultivos comerciales en Colombia, debido a su fácil accesibilidad, bajo costo y estabilidad. No obstante, no se recomienda su uso en crudo, recién salida del cultivo, debido a la posibilidad de que contenga residuos de productos agroquímicos, agentes fitosanitarios o semillas de arvenses. Además, tiene la desventaja de poseer una capacidad de retención de humedad demasiado baja (Monsalve et al., 2009), lo cual dificulta el manejo del riego y fertirriego. Todo esto hace que la cascarilla de arroz deba pasar primero por un proceso de tostado, que incrementa el costo del material. Durante los últimos años se han venido generando usos alternos para la cascarilla de arroz, como la elaboración de concreto, que amenaza su futura disponibilidad.

En búsqueda de materiales alternativos a la cascarilla de arroz, para uso individual o en mezcla, localmente se han desarrollado investigaciones con otros sustratos tales como fibra de coco, escoria de carbón y zeolita, mezclados en diferentes proporciones entre ellos, o mezclados con cascarilla de arroz (Cárdenas et al., 2006; Chaparro et al., 2006; Fariás et al., 2006; Flórez et al., 2006; Monsalve et al., 2009; Nieto & Flórez, 2006; Peña et al., 2014; Petitt, 2011).

La mayoría de la información publicada sobre cultivos sin suelo y uso de sustratos en horticultura se centra en la respuesta en crecimiento, producción y calidad de la cosecha de las especies hortícolas, pero se hace poca mención sobre las características físicas y químicas de los sustratos que afectan el desarrollo y rendimiento de las plantas. El conocimiento de las propiedades de los sustratos debe usarse como criterio de selección. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar las propiedades químicas, físicas y de estabilidad más importantes de algunos de los materiales de origen mineral y orgánico con uso potencial en CSS, disponibles en el territorio colombiano.

Materiales y métodos

Se seleccionaron once sustratos de origen orgánico (tabla 1) y siete de origen mineral (tabla 2) y que, al no ser muy demandados en otros procesos (como materias primas para construcción, abonos, concentrados, etc.), pueden presentar mayor disponibilidad. Se incluyeron sustratos orgánicos provenientes de la misma especie vegetal, pero con diferente morfología y tamaño de partículas, para observar el efecto de esas características en las propiedades físicas del sustrato.

Tabla 1. Materiales de naturaleza orgánica evaluados como sustratos

Material	Presentación	Proceso de producción
Cascarilla de arroz	Quemada al 70 %	Subproducto de la trilla de arroz
Cascarilla de café	Cisco	Subproducto del despulpado del fruto de café para obtención de la almendra
Mesocarpio del fruto de coco	Astillas	Subproductos del proceso de separación del mesocarpio de la pulpa del fruto de coco, posterior desfibrado del mesocarpio y molienda
	Fibra	
	Sustrato fino	
	Sustrato grueso	
Madera	Aserrín	Industria maderera (aserraderos)
	Viruta	
Mesocarpio del fruto de palma de aceite	Cascarilla	Subproductos del proceso de separación de los frutos del racimo y de la cáscara de la almendra
	Fibra	
	Tuza	

Fuente: Elaboración propia

A los materiales seleccionados se les determinaron las propiedades químicas: pH con el método potenciométrico; conductividad eléctrica (CE), por lectura con conductímetro a 25 °C en el extracto de la pasta saturada; capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+), por el método del acetato de amonio 1M pH 7. Para determinar la CIC se desplazó el NH_4^+ intercambiado con NaCl y se hizo la valoración por titulación. Las bases se determinaron en el extracto de acetato de amonio por espectrofotometría de absorción atómica. La concentración de los elementos totales se determinó mediante calcinación de la muestra a 600 °C, realizando la cuantificación de los elementos Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn y Zn por espectrofotometría de absorción atómica; el P por valoración colorimétrica con molibdato y vanadato de amonio; y el B, mediante valoración colorimétrica con azometina-H. La concentración de metales pesados se hizo mediante solubilización con digestión ácida y valoración de Cd, Co y Cr; Pb por absorción atómica con llama, y As, Hg y Se, por absorción atómica con generador de hidruros.

Tabla 2. Materiales de naturaleza mineral evaluados como sustratos

Material	Origen	Composición
Arena de río	Recurso natural (depósitos de corriente)	Cuarzo ($\text{SiO}_2 > 99\%$) y fragmentos de roca
Escoria de carbón	Combustión de carbón (p. ej., termoeléctricas)	Material silíceo-aluminoso (78%) ¹
Ladrillo molido	Obras civiles	SiO_2 (50-60%); Al_2O_3 (20-30%); Fe_2O_3 (< 10%) ²
Perlita	Recurso natural volcánico	SiO_2 (71-75%); Al_2O_3 (12-18%); K_2O (4-5%); Na_2O (1-4%); CaO (< 1%); MgO (< 1%) ⁴
Piedra Pómez	Recurso natural volcánico	SiO_2 (60- 70%); Al_2O_3 (12- 15%); K_2O (4- 5%); Na_2O (1- 4%); Fe_2O_3 (2%); CaO (<2%) ⁴
Vermiculita	Recurso natural (en rocas ígneas ultramáficas)	SiO_2 (40-50%); Al_2O_3 (13 %); MgO (24 %); Fe_2O_3 (4-6 %); K_2O (< 1 %); Na_2O (< 1 %); CaO (1- 3 %) ⁵
Zeolita	Recurso natural (rocas ígneas volcánicas)	SiO_2 (40-50%); Al_2O_3 (16 %); Fe_2O_3 (1-3%); K_2O (1- 4 %); Na_2O (1- 3 %); CaO (< 1%) ⁶

Fuente: Elaboración propia con base en ¹ Robayo et al. (2016); ² Lourenço et al. (2010); ³ Samar y Saxena (2016); ⁴ Amato et al. (2012); ⁵ Campos et al. (2010); ⁶ Jha y Singh (2016).

Las propiedades físicas se determinaron así: densidad aparente (D_a), mediante pesado de un volumen conocido de material seco; densidad real (D_r), por el método del picnómetro; retención de agua a 33, 500 y 1.500 KPa de presión, con el método del plato y olla de presión, y la granulometría por separación en seco de las partículas empleando los tamices de 2 y 8 mm.

A los materiales de origen orgánico se les determinaron las propiedades de estabilidad: relación C/N, concentración de hemicelulosa, celulosa, lignina y silicio de acuerdo con la metodología sugerida por Van Soest et al. (1991).

Resultados y discusión

pH

De los sustratos evaluados, aquellos con un pH entre 5,5 y 7 (tabla 4) presentan la ventaja de estar dentro del rango adecuado de pH, al cual la mayoría de los nutrientes son solubles y están disponibles para las plantas (Savvas & Gruda, 2018). Entre estos se destacan la cascarilla de arroz, la tuza de palma y los subproductos de coco, cuyos pH cercanos a la neutralidad muestran condiciones óptimas como medio de crecimiento para las plantas (tabla 3).

Todos los materiales minerales presentan un pH ligeramente ácido a fuertemente alcalino, destacándose los sustratos de piedra pómez y perlita, ambos de origen volcánico, por su naturaleza moderada a fuertemente alcalina (tabla 3). A estos pH se pueden generar limitantes en el proceso de absorción de elementos menores por parte de la planta, principalmente hierro, cuya solubilidad es extremadamente baja a pH altos, debido a la formación de hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de hierro (Lemanceau et al., 2009).

Los sustratos minerales presentan pH generalmente más altos que los sustratos orgánicos, lo que refleja la naturaleza ácida de los compuestos orgánicos y los contenidos más altos de cationes alcalinos (Na) y alcalinotérreos (Ca y Mg) en los minerales.

Tabla 3. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales evaluados

Material	pH	CE	C	N	P	K	Ca	Mg	Na
		dS m ⁻¹							
Orgánico									
Cascarilla arroz	7,2	1,5	77,2	2,9	4,5	5,1	2,3	0,8	nd
Cisco café	4,7	0,5	450,0	6,4	0,1	2,6	0,8	1,8	6,8
Astillas coco	6,7	0,9	456,1	3,0	0,2	7,2	1,2	1,1	75,4
Fibra coco	6,6	0,9	459,5	1,8	0,2	5,9	1,3	0,6	87,5
Sustrato fino coco	6,3	0,7	391,4	3,4	0,2	5,8	2,2	1,8	90,0
Sustrato grueso coco	6,3	0,8	391,4	3,4	0,4	7,9	3,1	2,5	94,4
Aserrín madera	5,4	0,8	448,5	3,0	0,1	2,2	2,1	0,5	7,0
Viruta madera	5,4	1,3	448,5	3,0	0,2	2,2	1,6	0,4	4,8
Cascarilla palma	4,8	1,5	454,1	3,9	0,1	2,0	0,5	0,4	1,7
Fibra palma	5,6	1,6	461,2	6,1	0,9	6,0	2,7	1,5	3,9
Tuza palma	6,9	2,6	450,1	5,3	0,9	14,2	1,8	1,0	7,5
Mineral									
Arena río	7,6	0,8	-	-	0,5	0,9	7,4	1,5	6,0
Escoria carbón	6,7	0,9	-	-	1,8	0,5	3,6	0,2	15,1
Ladrillo molido	7,3	3,2	-	-	0,1	2,0	1,2	0,2	44,2
Perlita	8,3	0,0	-	-	0,1	131,7	1,4	40,9	10,0
Piedra pómez	9,6	0,7	-	-	0,1	1,2	1,1	0,9	115,4
Vermiculita	6,7	0,1	-	-	0,5	0,9	1,6	22,7	nd
Zeolita	8,1	0,1	-	-	0,1	1,5	13,2	3,0	192,1

Nota: nd: no determinado.

Fuente: Elaboración propia

Los sustratos ácidos resultan más fáciles de manejar que los más alcalinos, si se usan de manera individual, ya que el pH se puede aumentar del mismo modo que se hace en suelos, por la aplicación de cal. Las diferencias en pH en los sustratos podrían ser de utilidad para preparar mezclas y obtener sustratos con pH en el rango apropiado.

Conductividad eléctrica

Con excepción de la tuza de palma y el ladrillo molido, la CE fue menor de 2 dS/m en los sustratos, independiente de su origen (tabla 3). El rango óptimo en sustratos varía entre 0,75 y 1,99 dS/m (Abad & Noguera, 2005). Por encima de 2 dS/m, Ansorena (1994) indica la presencia de sales solubles que podrían generar riesgo para las plantas por estrés osmótico. Los materiales evaluados no poseen una concentración de sales solubles que limite el crecimiento de las plantas. El ladrillo molido es el sustrato que presenta la mayor concentración de sales; sin embargo, los problemas de salinidad son más fáciles de manejar en sustratos que en suelos y pueden corregirse haciendo abundantes lavados con agua de buena

calidad (baja conductividad eléctrica y baja relación de adsorción de sodio). También está la alternativa de hacer mezclas de sustratos de alta y baja conductividad eléctrica.

Concentración total de elementos mayores y menores

La principal diferencia entre los sustratos orgánicos con los minerales es el predominio de carbono y nitrógeno, en los primeros, y de silicio y aluminio, en los segundos, ya que todos los sustratos minerales evaluados corresponden a aluminosilicatos. Para esta caracterización, solamente se determinaron el C, N (tabla 3) y Si (tabla 7) en los sustratos orgánicos, como medida de estabilidad de los materiales en el tiempo. La composición elemental total no es una propiedad química relevante del sustrato desde el punto de vista del suministro de nutrientes para la planta, ya que los sistemas de cultivos sin suelo generalmente involucran planes de fertirrigación. Sin embargo, la concentración de los nutrientes aplicados se ve afectada por la composición química del material, como es el caso del N y P en los sustratos orgánicos, cuya disponibilidad está asociada a las tasas de mineralización del sustrato. Por otra parte, la liberación de algunos elementos presentes en el compuesto sólido orgánico o mineral implicará la descomposición del sustrato y, en consecuencia, su papel como medio físico de crecimiento de las raíces se vería comprometido.

En las tablas 3 y 4 se muestra que, de los demás elementos, el K, Ca, Mg y Na, se encuentran en concentraciones entre el 0,2 % y el 19 %, tanto en sustratos orgánicos como minerales, que resultan del mismo orden que las halladas en materiales geológicos, edáficos y vegetales. El hierro es mucho más alto en los sustratos minerales (0,5-24 %), que en los sustratos orgánicos (< 0,4 %), acorde con la naturaleza del material. Los otros elementos, Mn, Zn, Cu y B están presentes en niveles de trazas (< 0,1 %), tanto en sustratos orgánicos como minerales. Para todos los elementos se evidencia una alta variabilidad entre los diferentes sustratos.

Tabla 4. Concentración total de micronutrientes de los materiales evaluados

Material	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			
Orgánico					
Cascarilla de arroz	0,49	331,4	6,9	28,9	6,3
Cisco de café	8,67	163,2	4,1	66,3	8,0
Astillas de coco	0,19	9,3	3,1	77,2	23,9
Fibra de coco	0,24	10,6	6,4	17,9	1,6
Sustrato fino de coco	2,05	20,7	3,3	18,8	3,5
Sustrato grueso de coco	3,73	23,1	3,4	nd	18,6
Aserrín de madera	0,13	25,6	0,2	70,2	5,1
Viruta de madera	0,06	18,9	3,4	39,4	3,5
Cascarilla de palma	0,14	23,4	1,4	6,8	1,2
Fibra de palma	0,51	129,0	7,9	24,4	1,9
Tuza de palma	0,28	161,8	23,1	26,0	2,5
Mineral					
Arena de río	18,04	182,0	5,6	48,0	9,8
Escoria de carbón	23,25	47,1	10,9	14,0	23,0
Ladrillo molido	14,09	223,6	2,0	9,5	5,2
Perlita	72,85	137,4	5,3	41,2	6,3
Piedra pómez	5,38	38,1	5,0	17,4	3,3
Vermiculita	239,69	390,2	20,7	37,8	79,5
Zeolita	8,90	224,5	10,7	37,8	3,8

Nota: nd: no determinado.

Fuente: Elaboración propia

En los sustratos orgánicos se obtuvieron contenidos de C cercanos al 40 %, a excepción de la cascarilla de arroz, con 8 % (tabla 3). La baja concentración de carbono en la cascarilla de arroz también fue reportada por Schmitz et al. (2002), con 17 %. Es bien conocido que en este material los óxidos de silicio representan un componente importante (Prada-Matiz & Cortés-Castillo, 2010) y, por eso, el C está por debajo del promedio de los materiales orgánicos.

Los niveles de N son del mismo orden en todos los materiales caracterizados y están dentro del rango normalmente reportado para materia orgánica humidificada (< 1 %) (Blume et al., 2016b), pero muy por debajo del rango usualmente reportado para tejido vegetal fresco (1-5 %) (Hawkesford et al., 2012). Comparativamente, entre los once sustratos orgánicos, el cisco de café y la fibra de palma presentaron los niveles más altos de N total (0,6 %).

Aunque la cascarilla de arroz presentó la más alta concentración de P (4,5 g/kg), está por debajo del rango ideal expuesto por Ansorena (1994) (4,5 a 10 g/kg) (tabla 3). Okon et al. (2005) reportaron valores entre 0,7 y 2,2 g/kg de fósforo para cascarilla de arroz quemada.

La concentración total de K, Ca, Mg y Na presenta los niveles esperados para materiales orgánicos, pues sumados corresponden a menos del 2 % de la materia seca. Los sustratos derivados de coco sobresalen por la alta concentración de Na (tabla 3), lo cual puede ser propio de la ecofisiología de la planta que, aunque no se considera halófila, se cultiva extensamente a lo largo de zonas costeras sujetas a la influencia de agua de mar, pudiendo crecer en suelos con altos niveles de cloruro de sodio (Ohler, 1999).

En cuanto a los sustratos minerales, se destaca la alta concentración de K de la perlita (tabla 3), que corresponde a un buen atributo para este material, al tener el potencial de liberar este nutriente en formas disponibles para las plantas y competir con otros iones de características fisicoquímicas similares (valencia y diámetro), tal como el sodio (White, 2012).

La zeolita presenta una alta concentración natural de Na, debido a que esta familia de minerales, dentro de la que se encuentran la natrolita ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la clinoptilolita [$(\text{NaKCa}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72})\sim 20\text{H}_2\text{O}$], empleada en este estudio, poseen sodio en su composición. El sodio es también predominante en la piedra pómez. Los niveles de Ca son más altos en la zeolita, mientras que los de Mg lo son en la perlita y la vermiculita. Como los sustratos minerales evaluados son silicatos de muy baja solubilidad, no se espera que liberen fácilmente estos elementos a la solución; sin embargo, la liberación de elementos tanto esenciales como no esenciales para las plantas podría generar toxicidad, en función de las cantidades liberadas. Tal podría ser el caso del Fe y Mn en la vermiculita y el Na en la zeolita y piedra pómez, debido a sus contenidos altos en estos elementos (tabla 3).

Caracterización de las propiedades de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico de los sustratos orgánicos fue baja en las cascarillas de arroz y de palma (cerca a 10 cmol_c/kg) y alta en los sustratos de coco ($> 40 \text{ cmol}_c/\text{kg}$) (figura 1). De acuerdo con los niveles óptimos de CIC ($> 20 \text{ cmol}_c/\text{kg}$) (Abad & Noguera, 2005), a excepción de las mencionadas cascarillas, todos los materiales orgánicos presentan una capacidad de retención de cationes adecuada. Al igual que en este estudio, Kroeff et al. (2004) reportaron una baja CIC en la cascarilla de arroz quemada (8,5 cmol_c/kg), en contraste con Quintero et al. (2011), quienes hallaron valores entre 25,5 y 32,5 cmol_c/kg . La baja CIC de la cascarilla de arroz coincide con su baja concentración de carbono total (figura 1), una medida indirecta de la presencia de grupos funcionales de la materia orgánica, que son las partes reactivas de las moléculas orgánicas que participan en la CIC (Blume et al., 2016b).

En contraste con los sustratos orgánicos, los materiales de origen geológico presentan muy baja CIC ($< 10 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), con excepción de la vermiculita y zeolita (27 y 23 cmol_c/kg , respectivamente). Estos dos minerales son silicatos cristalinos que presentan cargas negativas superficiales por sustitución isomórfica, que son independientes del pH del medio (Sposito, 2008). La arena de río se considera un

sustrato casi inerte, con baja CIC, debido a que se compone principalmente de cuarzo (99 % de SiO₂), mineral con muy poca sustitución isomórfica y muy baja superficie específica (0,15 cm²/g) (Molina, 2014).

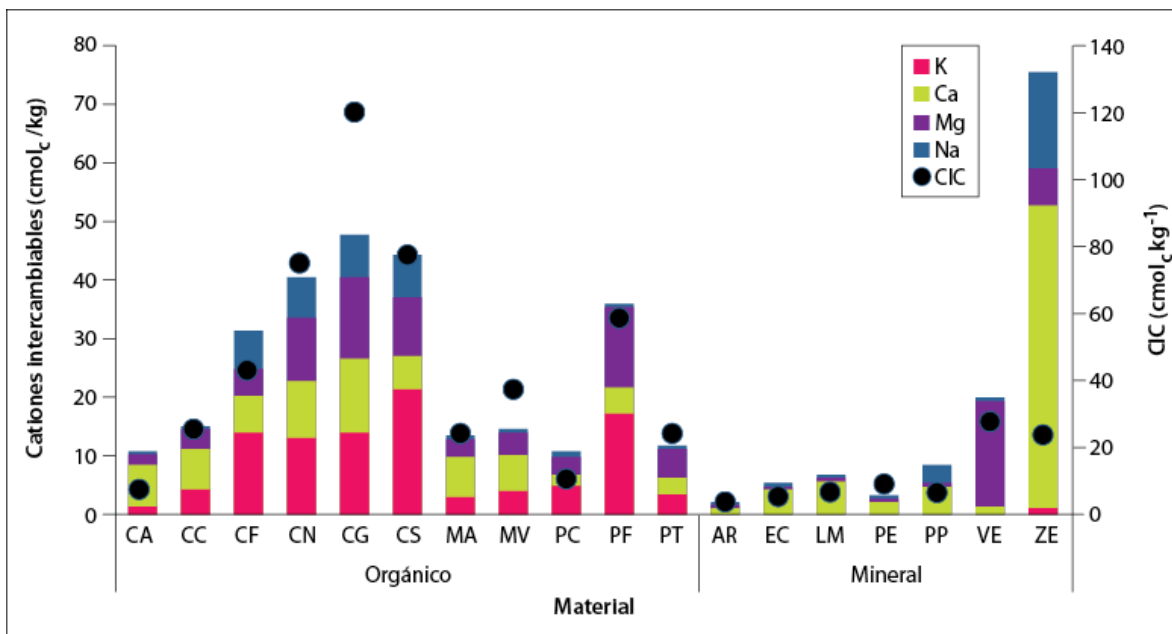


Figura 1. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales evaluados. CA = Cascarilla de arroz, CC = Cisco de café, CF = Fibra de coco, CN = Sustrato fino de coco, CG = Sustrato grueso de coco, CS = Astillas de coco, MA = Astillas de madera, MV = Viruta de madera, PC = Cascarilla de palma, PF = Fibra de palma, PT = Tuza de palma, AR = Arena de río, EC = Escoria de carbón, LM = Ladrillo molido, PE = Perlita, PP = Piedra pómez, VE = Vermiculita, ZE = Zeolita.

Fuente: Elaboración propia

Los materiales que cuentan con una CIC elevada generan condiciones adecuadas de adsorción de cationes, conveniente en el manejo integrado del riego y la fertilización, ya que nutrientes como K, Ca, Mg y NH₄ pueden permanecer retenidos en el complejo de cambio, para luego ser liberados a la solución en el medio de crecimiento y así ser absorbidos por las plantas (Silber, 2019). Al presentarse bajos niveles de CIC y una disminución en el pH del medio, elementos como el potasio y magnesio pueden estar en el agua alrededor de las partículas del sustrato, y no realmente retenidos, favoreciendo la lixiviación de estos nutrientes y, por tanto, la dificultad de ser absorbidos por las plantas (Silber, 2019).

Las superficies de las partículas de los sustratos pueden llevar cargas permanentes o variables (Silber, 2019). Las cargas variables están relacionadas con la desprotonación de grupos funcionales de moléculas como la celulosa, hemicelulosa y lignina, en respuesta a aumentos de pH, lo cual genera cargas negativas. Las cargas variables pueden estimarse como la diferencia entre la CIC determinada con acetato de amonio

1M pH 7 y la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) estimada como la suma de cationes intercambiables. Esta diferencia es grande para la mayoría de los materiales orgánicos evaluados (con excepción de las cascarillas de arroz y de palma), con un rango de variación entre 10 y 35 cmol_c/kg , valores que indican la cantidad de cargas negativas que se pueden desarrollar por aumento del pH en el sustrato.

La CICE es considerada una medida de la capacidad de intercambio catiónico al pH del material (Blume et al., 2016a). La diferencia entre ambas medidas (CIC y CICE) está relacionada con la desprotonación de grupos funcionales como respuesta al aumento de pH del material al entrar en contacto con el acetato de amonio a pH 7, lo cual genera cargas variables en función del pH (Sposito, 2008). La carga variable de los sustratos minerales es baja ($< 5 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), ya que para los aluminosilicatos laminares como la vermiculita proviene en más del 80 % de la sustitución isomórfica (Prakash, 2002), y la desprotonación de grupos OH^- en los bordes de las arcillas puede ser muy baja, debido a la cercanía entre el pH de estos sustratos (> 7) y el del acetato de amonio con el que se hace la determinación.

La zeolita muestra una CICE mucho más alta que la CIC obtenida con acetato de amonio, lo que podría estar reflejando la solubilización de Ca y Na del mineral, ambos con contenidos totales altos (tabla 3). Esto conlleva a la sobreestimación de los niveles intercambiables de ambos cationes (figura 1) y, por lo tanto, también de la CICE. La alta solubilidad del calcio y el sodio en acetato de amonio ha sido reportada por Schollenberger y Simon (1945).

Cationes intercambiables

La figura 1 muestra que en los sustratos orgánicos los niveles de los cationes intercambiables que cumplen el papel de nutrientes para las plantas se consideran altos a muy altos para potasio (1,4-17,5 cmol_c/kg), y medios a altos para calcio (1,8-12,4 cmol_c/kg) y magnesio (1,9 -13,8 cmol_c/kg).

En los sustratos minerales sucede lo contrario, especialmente los niveles de K y Mg resultan bajos. La excepción es el Ca en la zeolita, como se mencionó, y el Mg en la vermiculita. La vermiculita es una arcilla tipo 2:1 trioctaédrica con altos niveles de magnesio dentro de las láminas y de magnesio y potasio entre las capas que conforman la estructura del mineral (Prakash, 2002). La alta concentración de Mg intercambiable ha sido documentada por Peterson et al. (1965), quienes la explican por la mayor adsorción selectiva del ion Mg sobre otros iones como el Ca.

La concentración de cationes intercambiables presente en los sustratos orgánicos y minerales (figura 1), al considerarse como contenidos disponibles para las plantas, debe tenerse en cuenta en programas de fertirriego, para hacer formulaciones racionales de las sales nutritivas.

Los niveles de sodio, que en altas cantidades puede resultar perjudicial en el sistema sin suelo (Sonneveld & Van der Burg, 1991), son bajos en los sustratos evaluados. La excepción en los materiales orgánicos son los subproductos del cultivo de coco; la alta concentración de Na intercambiable ya ha sido reportada por Jeganathan (2008). Estos sustratos representan también las mayores concentraciones de K, Ca y Mg

intercambiables (figura 1). En los materiales minerales la excepción fue la zeolita, cuya alta concentración de Na intercambiable (figura 1) concuerda con el contenido de Na total (19,2%) (tabla 3). El alto contenido de sodio total en la piedra pómez se refleja en los niveles relativamente altos de este elemento en el complejo de intercambio de cationes, generando un desbalance con el potasio, con una relación Na/K igual a 6.

Concentración de metales pesados

Los contenidos totales de metales pesados en los sustratos evaluados mostraron un rango estrecho de variación para cadmio y selenio, y muy amplio para arsénico, cromo y mercurio (tabla 5). La concentración máxima de metales pesados en el sustrato que es considerada segura puede equipararse con la que se ha establecido para el suelo. En general, todos los materiales orgánicos tienen concentraciones de metales pesados por debajo de la concentración máxima permisible según la norma del Departamento de Ambiente del Reino Unido (Nicholson et al., 2003) (tabla 5), por lo que se pueden considerar inocuos. Tan solo la vermiculita presenta una concentración de cromo muy por encima de la máxima permisible en el suelo (400 mg/kg) según la mencionada norma (tabla 5). Se presume que aquellos materiales con altas concentraciones de un determinado metal pesado presentan un potencial mayor de liberarlo en formas lábiles una vez entre en contacto con agua y con los exudados presentes en la rizosfera, por lo que la alta concentración de cromo debe ser tenida en consideración al elegir este sustrato.

Tabla 5. Concentración total de metales pesados de los materiales evaluados

Material	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Se
	mg/kg				µg/kg		
Orgánico							
Cisco de café	0,0	2,1	0,0	4,2	0,5	3,1	0,01
Astillas de coco	0,0	0,1	0,2	2,1	11,0	5,2	0,01
Sustrato de coco fino	0,5	12,6	0,4	5,9	34,9	46,8	0,02
Aserrín de madera	0,0	0,1	0,2	2,1	11,0	5,2	0,01
Viruta de madera	0,0	1,9	0,0	13,3	10,5	3,8	0,01
Cascarilla de palma	0,4	1,2	0,1	48,3	9,3	10,0	0,01
Tuza de palma	0,5	1,8	0,3	66,8	7,5	6,5	0,01
Mineral							
Arena de río	2,4	2,5	0,3	25,5	12,0	138,0	0,02
Escoria de carbón	0,4	1,4	0,2	1,8	23,4	6,4	0,01
Ladrillo molido	2,2	3,6	0,0	22,0	14,3	3,4	0,01
Perlita	0,8	10,1	0,0	2,4	28,0	4,2	0,01
Piedra pómez	0,6	1,7	0,0	1,3	0,0	13,8	0,02
Vermiculita	36,5	1,9	0,0	728,0	7,6	2,2	0,02
Zeolita	1,2	3,0	0,0	3,1	45,2	45,9	0,01
CMP*	sd	300	3	400	1.000	50.000	3.000

* Concentración máxima permitida de elementos potencialmente tóxicos en suelos después de la aplicación de lodos de depuradora (Nicholson et al., 2003). sd: sin dato

Fuente: Elaboración propia

Las correlaciones entre las propiedades químicas más relevantes de los sustratos y los niveles de metales pesados no resultaron significativas (datos no mostrados), por lo que no se puede relacionar la naturaleza del sustrato o el tipo de material con su toxicidad potencial. La relación positiva entre Fe total y los contenidos de cobalto ($r = 0,96$) y cromo ($r = 0,94$) está acentuada por los altos niveles de ambos metales pesados en la vermiculita, que corresponde al sustrato más rico en hierro, al igual que sucede con el boro total ($r = 0,89$).

Propiedades físicas

De acuerdo con los resultados presentados en la 0, todos los sustratos orgánicos corresponden a materiales livianos y de alta porosidad total, ya que su densidad aparente (D_a) está dentro del rango óptimo del sustrato ideal (0,4-0,6 g/cm³, establecido por Ansorena (1994). Los materiales minerales de arena de río, escoria de carbón, ladrillo molido y zeolita están por encima del rango óptimo de densidad aparente. Como lo mencionaron Quintero et al. (2012), la D_a es muy importante para el diseño del contenedor, pues esta propiedad determinará las condiciones de resistencia mecánica en las estructuras de las camas de cultivo. El empleo de los materiales con densidad aparente más alta requiere de soportes más resistentes para establecer las camas de cultivo, sobre todo para el caso del ladrillo molido y la zeolita, con D_a igual a 1,0 y 0,8 g/cm³, respectivamente (tabla 6). Sumado a esto, el transporte y manejo de estos materiales requiere un mayor esfuerzo por parte de los operarios de cultivo.

La porosidad más baja (igual o menor a 71 %) se presentó en los sustratos de origen mineral, aunque la perlita, vermiculita y piedra pómez presentaron una porosidad mayor del 80 %. Todos los materiales orgánicos presentaron una porosidad total > 90 %, excepto por la tusa de palma, con 82 %. Esto sugiere que en todos los materiales puede haber un buen desarrollo de raíces y unas condiciones adecuadas para el suministro de agua y oxígeno.

Tabla 6. Análisis físico de los materiales evaluados

Material	D_a	D_r	PT	CRA		Granulometría	
				0,33 KPa	> 8	2 a 8	< 2
				g/cm ³	%	mm	mm
Orgánico							
Cascarilla de arroz	0,12	2,02	94	33,81	0,6	75,5	23,9
Cisco de café	0,11	1,91	94	39,90	0,0	74,8	25,2
Astillas de coco	0,10			216,36	78,2	19,3	2,5
Fibra de coco	0,13			216,36	0,0	0,0	100,0
Sustrato fino de coco	0,11	1,23	91	372,31	2,2	11,0	86,8
Sustrato grueso de coco	0,10			283,46	8,2	18,1	73,7
Aserrín de madera	0,16	1,86	91	87,93	0,4	2,9	96,7
Viruta de madera	0,15	1,55	90	119,85	74,1	23,4	2,5
Cascarilla de palma	0,14	1,34	90	32,77	32,8	62,7	4,5
Fibra de palma	0,21			150,64	69,3	14,0	16,7
Tuza de palma	0,25	1,36	82	190,58	0,0	0,0	100,0
Mineral							
Arena de río	0,7	2,25	71	2,46	2,1	25,7	72,2
Escoria de carbón	0,6	1,65	67	12,65	0,0	32,8	67,2
Ladrillo molido	1,0	2,68	63	19,22	33,8	48,3	17,9
Perlita	0,3	1,82	82	47,62	3,5	85,1	11,4
Piedra pómez	0,3	1,91	84	75,18	52,1	38,7	9,2
Vermiculita	0,1	1,31	92	283,99	0,5	81,5	18,0
Zeolita	0,8	2,19	64	7,49	0,0	81,4	18,6

Nota: D_a = Densidad aparente; D_r = Densidad Real; PT = Porosidad total y CRA = Capacidad de retención de agua.

Fuente: Elaboración propia

A excepción de las cascarillas de arroz y de palma, del cisco de café y del aserrín de madera, los demás materiales orgánicos presentan una capacidad de retención de agua (CRA) mayor a 100 % a 33 KPa de presión (tabla 6), lo cual indica una óptima CRA. En cuanto a los materiales minerales, tan solo la vermiculita presenta una CRA mayor al 100 % a 33 KPa de presión (tabla 6). Las vermiculitas son arcillas expansivas (Velde & Meunier, 2008) que tienen la capacidad de hidratarse, lo que les confiere una alta capacidad de retención de agua (Prakash, 2002). En contraste, los materiales de arena de río y zeolita mostraron los valores más bajos de CRA, con 2,5 y 7,5 % a 33 KPa de presión (tabla 6). Las cascarillas de arroz y de palma y el cisco de café presentan baja capacidad de retener agua (< 40 % a 33 KPa), por lo que para su uso deben ser mejoradas sus propiedades físicas a través de mezclas con materiales de mayor capacidad de retención de agua.

En cuanto a la granulometría, a excepción de la fibra de palma, viruta de madera y astillas de coco, los demás materiales orgánicos presentan tamaños de partícula menor a 8 mm. A excepción de la piedra pómez, todos los materiales minerales contienen más del 65 % de sus partículas con un tamaño menor a 8 mm. De acuerdo con Ansorena (1994), los sustratos deben presentar una granulometría de 0,25 a 2,5 mm para ser utilizados en campo. En los materiales más gruesos se puede ajustar la granulometría por medio de procesos de molienda, e inclusive algunos, como piedra pómez, perlita y zeolita, son suministrados por el proveedor con la granulometría deseada.

Propiedades de estabilidad de los materiales orgánicos

Es conveniente tener en cuenta la durabilidad de los sustratos, puesto que los materiales resistentes a la alteración pueden ser reutilizados, reduciendo de esta forma los costos de producción a largo plazo. Dependiendo del sistema de producción, sea cultivo comercial, agricultura urbana o vivero, la estabilidad toma relevancia o no. En procesos de plantulación los ciclos no tardan más de 30 días, mientras que en cultivos como clavel estos son de dos años, tiempo durante el cual es necesario que el sustrato no pierda sus propiedades.

La relación carbono-nitrógeno (C/N) es un indicador del origen, madurez y estabilidad del material orgánico (Abad et al., 2002). En ese sentido, a excepción de la cascarilla de arroz (26,9) todos los materiales presentan una relación C/N mayor a 40, lo cual obedece principalmente a su alto contenido de C y bajo contenido de N (tabla 7). Aunque esta alta relación C/N puede conllevar a una inmovilización del N soluble (Abad et al., 2002), el déficit de N puede ser suplido mediante fertilización (Noguera et al., 2000). En todos los materiales orgánicos el C se encuentra principalmente en forma de celulosa y lignina y, en menor porcentaje, en forma de hemicelulosa (tabla 7). Esta condición puede hacer que los materiales sean más resistentes a la degradación microbiana (Abad et al., 2002), pues, como fue expuesto por Blume et al. (2016b), la lignina es un polisacárido altamente resistente a esta degradación.

Tabla 7. Propiedades de estabilidad de los materiales de origen orgánico recolectados

Material	C/N	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	SiO ₂	Materia seca
Cascarilla de arroz	26,9	32,1	38,4	23,2	26,9	85,2
Cisco de café	70,3	10,8	54,0	23,8	0,1	90,8
Astillas de coco	152,0	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
Fibra de coco	255,3	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
Sustrato fino de coco	115,1	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
Sustrato grueso de coco	115,1	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
Aserrín de madera	149,5	1,2	56,8	28,6	5,1	78,3
Viruta de madera	149,5	7,7	50,6	27,4	1,7	87,5
Cascarilla de palma	116,4	11,7	33,1	51,0	2,0	86,6
Fibra de palma	75,6	10,5	28,1	41,5	4,8	74,5
Tuza de palma	84,9	6,1	47,1	23,0	2,3	64,1

Fuente: Elaboración propia

La concentración de óxido de silicio (SiO₂) en la cascarilla de arroz está por encima del 25 % (tabla 7), dato que concuerda con lo encontrado por Johar et al. (2012) y Yalçın y Sevinç (2001).

El silicio se ha asociado con complejos de lignina-carbohidrato en la pared celular de la epidermis de arroz, lo que protege y fortalece mecánicamente el tejido de la planta (Feng, 2015). El contenido de Si le otorga a la cascarilla de arroz su gran resistencia a la degradación (Quintero et al., 2006).

Conclusiones

Los sustratos evaluados muestran un amplio rango de variación en sus propiedades físicas y químicas, por lo que se puede aprovechar las mejores características de cada uno de estos para hacer mezclas y obtener un sustrato adecuado para el establecimiento de sistemas de cultivo sin suelo. Por ejemplo, el empleo de materiales provenientes del coco mejorará la capacidad de retención de agua, mientras que la inclusión de vermiculita incrementará la capacidad de intercambio catiónico y, por lo tanto, la retención de iones en las mezclas.

La composición química de los sustratos se debe considerar para formular las soluciones de fertirriego, pudiendo disminuir la cantidad de los nutrientes que se encuentran en contenidos altos. Los sustratos provenientes de coco no requerirán de niveles muy altos de K en las soluciones de fertirriego. En ese mismo sentido, el uso de vermiculita permitiría disminuir los niveles de magnesio con respecto a los que normalmente se utilizan en las formulaciones.

Agradecimientos

Los autores manifiestan sus agradecimientos a Asocolflores, Ceniflores, CeniRed y a la Universidad Nacional de Colombia.

Descargos de responsabilidad

Este documento fue planeado, desarrollado y revisado por todos los autores, quienes declaramos que en este estudio no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Abad, M., & Noguera, P. (2005). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En L.C. Cadahía (Ed.), *Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales*, 2ª Ed. (pp. 290-339). Ediciones Mundi-Prensa. <https://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484762478/fertirrigacion--cultivos-hortícolas--frutales-y-ornamentales->
- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., & Noguera, V. (2002). Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology*, 82(3), 241-245. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00189-4)
- Amato, G., Campione, G., Cavaleri, L., Minafò, G., & Miraglia, N. (2012). The use of pumice lightweight concrete for masonry applications. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(5), 679-693. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9789-7>
- Ansorena, M. (1994). *Sustratos: Propiedades y Caracterización*. Madrid. Mundi-Prensa.
- Biauxuli, C., & Aguilar, J. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas – Aspectos prácticos y experiencias*. Generalitat Valenciana. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=105109>
- Blume, H. P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B. M. (2016a). Chemical properties and processes. En F. Scheffer, & P. Schachtschabel (Eds.), *Soil Science* (pp. 123-174). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7_3
- Blume, H. P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B. M. (2016b). Soil Organic Matter. En F. Scheffer, & P. Schachtschabel (Eds.), *Soil Science* (pp. 55-86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7_3
- Campos, A., Moreno, S., & Molina, R. (2010). Characterization of vermiculite by XRD and spectroscopic techniques. *Earth Sciences Research Journal*, 13(2), 108-118. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/21106/36379>
- Cárdenas, C., Rivera, I., Flóres, V., Piedrahita, W., & Chávez, B. (2006). Análisis de crecimiento en clavel estándar variedad Nelson cultivado en sustratos. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 111-128). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores.

- https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Chaparro, L., Farias, A., Chaves, B., Miranda, D., & Flórez, V. (2006). Análisis de crecimiento en rosa variedad Charlotte en los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 77-90). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- El-Kazzaz, K. A., & El-Kazzaz, A. A. (2017). Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: An introduction. *Agricultural Research & Technology Open Access Journal*, 3(2), 63-72. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.03.555610>
- Farias, A., L. Chaparro., A. Campos., Chavez, B., & Flórez, V. (2006). Curvas de crecimiento de rosa en sistemas de cultivo sin suelo en la sabana de Bogotá. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá* (pp. 91-110). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Feng, J. M. (2015). Silicon. En A.V. Barker, & D.J. Pilvean (Eds.). *Handbook of plant nutrition* (pp. 681-693). Taylor and Francis. <https://www.routledge.com/Handbook-of-Plant-Nutrition/Barker-Pilbeam/p/book/9781439881972>
- Flórez, V., Miranda, D., Chavez, B., Chaparro, L., Cárdenas, C., & Fariás, A. (2006). Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo sin suelo. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 43-52). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 1-24. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.)* (pp. 135-189). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Henao, M., & Flórez, V. (2006). Relación entre la composición química de los lixiviados y el tipo de sustrato en un sistema de producción de rosa y clavel sin suelo. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 265-281). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Jeganathan, M. (2008). Communications in soil science and plant analysis nut water analysis as a diagnostic tool in coconut nutrition studies. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(17-20), 2667-2686. <https://doi.org/10.1080/00103629209368764>
- Jha, B., & Singh, D. (2016). Basics of Zeolites. *Fly Abs Zeolites. Innovations, Application, and Directions* (pp. 5-33). Springer Singapore. http://doi.org/10.1007/978-981-10-1404-8_2

- Johar, N., Ahmad, I., & Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>
- Kroeff, J. A., Dutra de Sousa, P., & Kämpf, A. N. (2004). Physical and chemical properties of substrates with an organic origin for growth of potted plants. *Ciencia Rural Santa María*, 32(6), 937-944. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000600005>
- Lemanceau, P., Bauer, P., Kraemer, S., & Briat, J. F. (2009). Iron dynamics in the rhizosphere as a case study for analyzing interactions between soils, plants and microbes. *Plant and Soil*, 321(1-2), 513-535. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0039-5>
- Lourenço, P. B., Fernandes, F. M., & Castro, F. (2010). Handmade clay bricks: Chemical, physical and mechanical properties. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(1), 38-58. <https://doi.org/10.1080/15583050902871092>
- Mayo-Prieto, S., Porteous, A., Rodríguez, A., Gutiérrez, S., & Casquero, P. (2020). Evaluation of substrates and additives to *Trichoderma harzianum* development by qPCR quantification. *Agronomy Journal*, 112(4), 3188-3194. <https://doi.org/10.1002/agj2.20155>
- Molina, F. (2014). Oxide minerals. En F. Molina (Ed.). *Soil Colloids. Properties and ion binding* (pp. 299-336). CRC Press. Taylor & Francis Group. <http://93.174.95.29/main/55DE65C7F03AC7A2AC91A72B6D4107B0>
- Monsalve, O., Escobar, H. Medina, A., & Forero, A. (2009). *Estrategias de fertilización limpia y orgánica en la producción de tomate bajo invernadero*. Universidad Jorge Tadeo Lozano - Centro de Investigaciones y asesorías Agroindustriales.
- Nicholson, F. A., Smith, S. R., Alloway, B. J., Carlton-Smith, C., & Chambers, B. J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of the Total Environment*, 311(1-3), 205-219. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6)
- Nieto, D., & Florez, V. (2006). Producción y calidad de rosa y clavel cultivados en cascarilla de arroz y fibra de coco. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 129-143). Universidad Nacional de Colombia y Asocoflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., & Maquieira, A. (2000). Coconut coir waste, a new and viable ecologically- Friendly peat substitute. *Acta Horticulturae*, 517, 279-286. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.517.34>
- Nwosisi, S., & Nandwani, D. (2018) Urban Horticulture: Overview of recent developments. En D. Nandwani (Eds.), *Urban horticulture. sustainable development and biodiversity*, 18 (pp. 3-29). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67017-1_1
- Ohler, J. G. (1999). The coconut palm. En J.G. Ohler, (Ed.), *Modern coconut management. Palm cultivation and products* (pp. 11-26). Food and agriculture organization of the united nations (FAO). <https://www.nhbs.com/modern-coconut-management-book>
- Okon, P. B., Ogeh, J. S., & Amalu, U. C. (2005). Effect of rice husk ash and phosphorus on some properties of acid sands and yield of okra. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(7-8), 833-845. <https://doi.org/10.1081/css-200049460>
- Othman, Y., Bataineh, K., Al-Ajlouni, M., Alsmairat, N., Ayad, J., Shiyab, S., Al-Qarallah, B., & St Hilaire, R. (2019). Soilless culture: management of growing substrate, water, nutrient, salinity,

- microorganism and product quality. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28, 3249-3260. <https://eacademic.ju.edu.jo>
- Peña, M. Y., Posada, F. C., & Monsalve, O. I. (2014). Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y orgánicos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2), 217-227. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2236>
- Peterson, F. F., Rhoades, J., Arca, M., & Coleman, N. T. (1965). Selective adsorption of magnesium ions by vermiculite. *Soil Science Society of America Journal*, 29(3), 327-328. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900030031x>
- Petitt, E. (2011). *Caracterización química de un suelo y tres mezclas de sustrato en rosa (Rosa hybrida) variedad Charlotte en un sistema de cultivo a solución perdida*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <http://bdigital.unal.edu.co/4148/1/erickintyllanpetittbarroso.2011.pdf>
- Prada-Matiz, A., & Cortés-Castillo, C. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquía*, 14(Sup. 1), 155-170. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v14s1/v14s1a13.pdf>
- Prakash, B. M. (2002). Vermiculites. En J.B. Dixon, & D.G. Schulze (Eds.), *Soil mineralogy with environmental applications* (pp. 501-529). SSSA Book Series. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c16>
- Quintero C., M. F., Guzmán P., J. M., & Valenzuela, J. L. (2012). Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavel (*Dianthus caryophyllus* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 76-87. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v6n1/v6n1a08.pdf>
- Quintero, M. F., Melgarejo, M. R., Ortega, D. F., Valenzuela, J. L., & Guzmán, M. (2011). Temporal physicochemical variations in burnt rice husk: Improvement of fertigation protocols in carnation crops. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9(3-4), 727-732. https://www.researchgate.net/publication/235978760_Temporal_physicochemical_variations_in_burnt_rice_husk_Improvement_of_fertigation_protocols_in_carnation_crops
- Quintero, M. F. González-Murillo, C. A., & Florez, V. (2006). Evaluación de las características hidrofísicas de los sustratos cascarilla de arroz quemada, fibra de coco y sus mezclas. En V. Flórez, A. Fernández, D. Miranda, B. Chaves, & J. Guzmán (Eds.), *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana* (pp. 451-462). Universidad Nacional de Colombia y Asocolflores. https://ceniflores.org/centro_documental/avances-sobre-fertirriego-en-la-floricultura-colombiana/
- Raviv, M., & Heinrick, J. (2019). *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/soilless-culture-theory-and-practice/raviv/978-0-444-63696-6>
- Robayo, R. A., Matthey, P. E., Silva, Y. F., & Delvasto, S. (2016). Obtención de un concreto autocompactante empleando adiciones de escoria de carbón finamente molida. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(1), 24-43. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>
- Samar, M., & Saxena, S. (2016). Study of chemical and physical properties of perlite and its application in India. *International Journal of Science Technology and Management*, 5(4), 70-80. https://www.ijstm.com/images/short_pdf/1460020555_434V.pdf
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>

- Schmitz, J. A. K., Souza, P. V. D. de, & Kämpf, A. N. (2002). Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. *Ciência Rural*, 32(6), 937-944. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782002000600005>
- Schollenberger, C., & Simon, R. H. (1945). Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil- ammonium acetate method. *Soil Science*, 59(1), 13-24. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1945/01000/DETERMINATION_OF_EXCHANGE_CAPACITY_AND.4.aspx
- Silber, A. (2019). Chemical characteristics of soilless media. En M. Raviv, & J. Heinrick (Eds.). *Soilless culture – Theory and practice* (pp. 113-148). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00004-9>
- Sonneveld, C., & Van der Bug, M. M. (1991). Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 39(2), 115-122. <https://doi.org/10.18174/njas.v39i2.16546>
- Sposito, G. (2008). Soil particle surface charge. En G. Sposito (Ed), *The chemistry of soils* (pp. 174-194). Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/the-chemistry-of-soils-9780195313697?cc=co&lang=en&>
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Velde, B. B., & Meunier, A. (2008). *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75634-7>
- White, P. (2012). Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.* (pp. 7-47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00002-9>
- Yalçın, N., & Sevinc, V. (2001). Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*, 27(2), 219-224. [https://doi.org/10.1016/s0272-8842\(00\)00068-7](https://doi.org/10.1016/s0272-8842(00)00068-7)