



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización química de mezclas de materiales orgánicos y minerales con potencial de uso en cultivos sin suelo

Oscar Iván Monsalve Camacho

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Maestría en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas
Bogotá, Colombia
2016

Caracterización química de mezclas de materiales orgánicos y minerales con potencial de uso en cultivos sin suelo

Oscar Iván Monsalve Camacho

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas

Directora:
Martha Cecilia Henao Toro, Ph.D.
Profesor Asociado

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Maestría en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas
Bogotá, Colombia
2016

*A mi esposa Nadia Luque y nuestro hijo
Jacobó Monsalve Luque, porque son mi fortaleza y
mi verdadero horizonte.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia y a todas las personas que me brindaron su apoyo para la realización de este trabajo.

A la profesora Martha Henao por su guía, apoyo y sobre todo por su comprensión e inmensa humanidad, quien no solo se limitó a guiar y corregir mi trabajo, sino que además fue un apoyo constante desde antes de entrar a la maestría.

A Ferdy Alfonso Alvarado, Edwin Villagran y Sebastian Gutierrez por su apoyo durante todo el proceso de recolección de datos en campo.

A Ceniflores por todo el apoyo financiero, logístico y administrativo.

A Cenired y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por el apoyo financiero

A las empresas Aurora SAS, Suata Plants S.A. e Ipanema LTDA por abrirme sus puertas para realizar la investigación en campo.

A la Universidad Nacional de Colombia

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)

Y a todos los que directa o indirectamente aportaron su granito de arena para que pudiera alcanzar el objetivo.

Resumen

En Colombia existen 227 viveros certificados, aproximadamente 1.200 ha de clavel y mini clavel, 500 ha de rosa, y otras áreas no reportadas de especies hortícolas sembradas en sistemas de cultivo sin suelo (CSS). El manejo del agua en este sistema de cultivo es uno de los factores clave del proceso, por lo que la investigación de las propiedades físicas e hidrofísicas de algunos materiales ha tenido gran relevancia, no obstante, el estudio de sus propiedades químicas es escasa. Es así, como se realizó una búsqueda de materiales provenientes de residuos agrícolas o agroindustriales principalmente, pero también de residuos industriales y de minas, disponibles en el territorio nacional, que fueran viables para su implementación en CSS. Los materiales se caracterizaron, determinando sus propiedades químicas, algunas propiedades físicas, concentración de metales pesados, propiedades de estabilidad, presencia de organismos fitopatógenos, costo, disponibilidad y facilidad de manejo. Con base en los resultados, los materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), sustrato de coco (SC) y cascarilla de palma (CP) y los materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), piedra pómez (PP), perlita (PE), vermiculita (VE) y zeolita (ZE) se definieron como los más promisorios y aptos para ser utilizados en sistemas de cultivo sin suelo. De acuerdo con esto, se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de estos materiales mezclados en tres proporciones (orgánico:mineral): 75-25, 50-50 y 25-75, sobre 1) las propiedades químicas de los sustratos: pH, CE, CIC, concentración de iones en fase soluble: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , en fase intercambiable: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , y micronutrientes: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} tanto en estado natural, sin contacto con raíces, agua o nutrientes externos y en fase de cultivo (muestreos a los 7 y 24 ddt); 2) las propiedades químicas de los lixiviados: pH, CE, concentración de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y Cl^- ; y 3) porcentaje de prendimiento, peso fresco de raíces (Pf.Raíz), peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y concentración de macro y micronutrientes de esquejes de clavel. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3+8)$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Los resultados muestran que la concentración de sales disminuye y la reacción se hace más ácida cuando se comparan los sustratos en estado natural con su estado en fase de cultivo. Así mismo, el SC y la VE mostraron la mayor CIC, que concuerda con el mayor Pf.Raíz. No se aprecian diferencias notables entre los 7 y los 24 ddt, aunque si se aprecian diferencias entre la fase cultivo y la fase en estado natural. Se presentó una correlación altamente significativa entre CE, pH, K^+ y PO_4^{2-} de los lixiviados y la CA mostró los mayores valores. Ninguna de las mezclas presentó una concentración de NO_3^- que sobrepasara el rango adecuado. El porcentaje de prendimiento fue del 100% en todos los sustratos evaluados. Aunque se presentaron diferencias en cuanto a la concentración de nutrientes en tejido vegetal, no hubo una correlación significativa entre esta concentración y el Pf.Raíz. Los materiales de origen

mineral no mostraron una tendencia que evidenciara una influencia clara de algún material en particular sobre el Pf.Raíz. Los sustratos que generaron un mayor Pf.Raíz mostraron adecuadas relaciones elementales N/P, N/S, N/K, Ca/K y Ca/B y Mg/Mn en el tejido vegetal. Los sustratos presentan propiedades químicas que se deben tener en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización. Se sugiere tener en cuenta la tendencia salina y alcalina de la CA para establecer programas de riego y fertirriego. Los esquejes ganaron mayor Pf.Raíz en aquellas mezclas con SC, mientras que la CP no presentó diferencias significativas con la CA, por lo que la CP se muestra como un material promisorio para ser utilizado en sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: material mineral, material orgánico, propiedades químicas, propiedades de estabilidad, cationes, aniones, adsorción, desorción, acidez, salinidad, clavel.

Abstract

In Colombia exists 227 certified nurseries, near to 1.200 ha of carnation and mini carnation, 500 ha of roses, and another areas of vegetable species not reported, planted in soilless culture (SLC). Water manage in this crop system is one of the key factors of the process, so that the research of the physical and hydro physical properties of some materials has been very important, however, the study of it's chemical properties is scare. Thus, as a search of materials from agricultural waste and/or agroindustrial mainly took place, but also industrial waste and mining available in the country, which were viable for implementation in (SLC). Materials were characterized, determining it's chemical properties, some physical properties, heavy metals concentration, stability properties, phytopathogen organism presence, cost, availability and ease of handling. Based on the results, the organic origin materials: rice husk (RH), coconut substrate (CS) and palm husk (PH) and the mineral origin materials: coal slag (CS), pumice, (PU), perlite (PE), vermiculite (VE) and zeolite (ZE) were defined as the most promissory and suitable to be used in soilless culture. Accordingly, an investigation was conducted to evaluate the behavior of these materials mixed in three proportions (organic: mineral): 75-25, 50-50 and 25-75, on 1) the chemical properties of the substrates: pH, EC, CEC, ion concentration in soluble phase: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} ; exchangeable phase: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ and micronutrients: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} and Zn^{2+} , both, natural state, non contact with roots, water or nutrients and external growth phase (sampling at 7 and 24 ddt); 2) the chemical properties of leachates: pH, EC, concentration of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} and Cl^- ; and 3) anchorage percentage, root fresh weight (Fw.Root), shoot fresh weight (Fw.Shoot) and concentration of macro and micornutrientes of carnation cuttings. A completely randomized design (CRD) was set with incomplete factorial arrangement of treatments, nested in 3 stages, with isolated control group (3X5X(3)+8), with three factors: factor 1) material of organic origin, with 3 levels; factor 2) material mineral origin; with 5 levels and factor 3) ratio (nested); with 3 levels, plus 8 unalloyed materials (isolated control group), for a total of 53 treatments (substrates). Results shows that the salt concentration decreases and the reaction becomes more acidic when compares substrates in unprocessed with state under cultivation. Likewise, the SC and VE showed the highest CIC, consistent with the highest Fw.Root. No significant differences between 7 and 24 ddt be seen, although differences between the cultivation phase and phase in their natural state are appreciated. A highly significant correlation between EC, pH, K^+ and PO_4^{3-} leachate was presented and RH showed the highest values. None of the mixtures has a concentration of NO_3^- that exceeded the appropriate range. The anchorage percentage was 100% in all substrates tested.

Although differences in the concentration of nutrients in plant tissue occurred, there was no significant correlation between the concentration and Fw.Root. Mineral materials doesn't showed a trend that evidenced a clear influence of any particular material on Fw.Root. Substrates that generated higher Fw.Root also showed suitable ratios N/P, N/S, N/K, Ca/K and Ca/B and Mg/Mn in plant tissue. Substrates exhibit chemical properties, it must be taken into account in water and fertilization integrated management programs. It is suggested to have the saline and alkaline trend of RH into account in establishing irrigation and fertigation programs. Cuttings gained higher Fw.Root in those mixtures with CS, while the PH showed no significant differences with the RH, for that reason, the PH is shown as a promising material for use in soilless systems.

Keywords: mineral material, organic material, chemical properties, stability properties, cations, anions, adsorption, desorption, acidity, salinity, carnation.

Contenido

| | Pág. |
|--|-----------|
| Resumen | IX |
| Lista de figuras..... | XVI |
| Lista de tablas | XX |
| Lista de Símbolos y abreviaturas..... | XXVI |
| Introducción general..... | 29 |
| 1. Marco teórico..... | 32 |
| 1.1 El cultivo sin suelo (CSS)..... | 32 |
| 1.1.1 El cultivo sin suelo en Colombia | 32 |
| 1.2 Generalidades sobre sustratos | 33 |
| 1.3 Propiedades químicas de los sustratos..... | 34 |
| 1.3.1 Capacidad de intercambio catiónico..... | 35 |
| 1.3.2 Liberación de nutrientes a partir de los sustratos | 36 |
| 1.3.3 Propiedades químicas de sustratos orgánicos | 37 |
| 1.3.4 Propiedades químicas de sustratos inorgánicos..... | 39 |
| 1.4 Relación química sustrato planta | 42 |
| 1.4.1 Efecto de la planta sobre la disponibilidad de nutrientes | 42 |
| 1.4.2 Relación entre la planta y las propiedades químicas de las superficies de los sustratos | 42 |
| 2. Caracterización y selección de materiales promisorios para uso en sistemas de cultivo sin suelo, en Colombia | 44 |
| 2.1 Resumen | 44 |
| 2.2 Introducción | 45 |
| 2.3 Materiales y métodos..... | 45 |
| 2.3.1 Ubicación y adquisición de materiales. Construcción de la base de datos con materiales de referencia (BMR) | 45 |
| 2.3.2 Variables evaluadas | 45 |
| 2.3.3 Análisis de datos | 46 |
| 2.3.4 Priorización de materiales a partir de la BMR..... | 46 |
| 2.4 Resultados y discusión | 50 |
| 2.4.1 Ubicación y adquisición de materiales..... | 50 |
| 2.4.2 Concentración total de nutrientes..... | 51 |
| 2.4.3 Caracterización de las propiedades de intercambio | 54 |
| 2.4.4 Concentración de metales pesados | 57 |
| 2.4.5 Propiedades físicas | 58 |

| | | |
|---|---|------------|
| 2.4.6 | Propiedades de estabilidad..... | 59 |
| 2.4.7 | Propiedades microbiológicas | 60 |
| 2.4.8 | Costo, manejo y disponibilidad | 61 |
| 2.4.9 | Priorización de materiales a partir de la BMR | 62 |
| 2.4.9.1 | Priorización de materiales de origen orgánico | 62 |
| 2.4.9.1 | Priorización de materiales de origen mineral | 63 |
| 2.1 | Conclusiones..... | 65 |
| | | |
| 3. Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales | | 66 |
| 3.1 | Resumen..... | 66 |
| 3.2 | Introducción..... | 66 |
| 3.1 | Materiales y métodos | 67 |
| 3.1.1 | Localización y material vegetal | 67 |
| 3.1.2 | Diseño experimental y de tratamientos | 67 |
| 3.1.2.1 | Caracterización de sustratos en crudo | 67 |
| 3.1.2.2 | Caracterización de sustratos en cultivo..... | 68 |
| 3.1.3 | Variables estudiadas..... | 68 |
| 3.1.3.1 | Variables asociadas a la respuesta del sustrato | 68 |
| 3.1.3.1 | Variables asociadas a la respuesta de la planta | 69 |
| 3.1.4 | Análisis de datos..... | 69 |
| 3.2 | Resultados y Discusión | 70 |
| 3.2.1 | Mezclas de sustratos en su estado natural | 70 |
| 3.2.2 | Respuesta de la planta | 71 |
| 3.2.3 | Conductividad eléctrica..... | 73 |
| 3.2.4 | pH..... | 75 |
| 3.2.5 | Concentración de iones en fase soluble | 78 |
| 3.2.6 | Propiedades de intercambio | 83 |
| 3.2.7 | Concentración de micronutrientes..... | 87 |
| 3.3 | Conclusiones..... | 90 |
| | | |
| 4. Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos | | 92 |
| 4.1 | Resumen..... | 92 |
| 4.2 | Introducción..... | 92 |
| 4.3 | Materiales y métodos | 93 |
| 4.4 | Resultados y Discusión | 94 |
| 4.4.1 | Conductividad eléctrica y pH..... | 94 |
| 4.4.2 | Concentración de cationes | 98 |
| 4.4.3 | Concentración de aniones | 104 |
| 4.4.4 | Fracción lixiviada | 107 |
| 4.5 | Conclusiones..... | 109 |
| | | |
| 5. Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos..... | | 110 |
| 5.1 | Resumen..... | 110 |
| 5.1 | Introducción..... | 111 |
| 5.1 | Materiales y Métodos | 112 |
| 5.2 | Resultados y Discusión | 113 |
| 5.2.1 | Porcentaje de prendimiento y peso fresco de brotes y raíz | 113 |
| 5.2.2 | Concentración de elementos mayores en tejido vegetal | 117 |

| | | |
|-------------------------------------|--|------------|
| 5.2.3 | Concentración de elementos menores en tejido vegetal | 121 |
| 5.3 | Conclusiones | 124 |
| Conclusiones generales | | 125 |
| Literatura citada | | 126 |
| Anexos | | 136 |
| | ANEXO 1. Resultados de la comparación entre los tratamientos evaluados en el estudio “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales” | 136 |
| | ANEXO 2. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos” | 150 |
| | ANEXO 3. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos” | 160 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Materiales de origen orgánico. Donde a) coco astillas; b) coco fibra; c) coco sustrato; d) palma cascarilla; e) palma fibra; f) palma tusa prensada; g) madera viruta; h) madera aserrín e i) café cisco. | 50 |
| Figura 2. Materiales de origen mineral. Donde a) arena; b) cobre escoria; c) carbón escoria; d) perlita; e) piedra pómez; f) ladrillo molido; g) vermiculita y h) zeolita. | 52 |
| Figura 3. Resultados de la calificación de cada material de origen orgánico caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Estb = Propiedades de estabilidad; Micr = Propiedades microbiológicas; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad. | 63 |
| Figura 4. Resultados de la calificación de cada material de origen mineral caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad. | 64 |
| Figura 5. Evaluación de la propagación de esquejes de clavel var. Pomodoro en condiciones de invernadero, en los diferentes sustratos evaluados. | 68 |
| Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP). | 72 |
| Figura 7. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$ | 73 |
| Figura 8. CE de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$ | 75 |
| Figura 9. Comparación del pH de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$ | 76 |
| Figura 10. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$ | 77 |
| Figura 11. Comparación de la concentración de cationes en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$ | 78 |
| Figura 12. Comparación de la concentración de aniones en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de trasplante. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$ | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 13. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 80 |
| Figura 14. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 81 |
| Figura 15. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 82 |
| Figura 16. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 83 |
| Figura 17. Propiedades de intercambio de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 84 |
| Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3. | 85 |
| Figura 19. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 86 |
| Figura 20. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 87 |
| Figura 21. Concentración de micronutrientes de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 88 |
| Figura 22. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 89 |
| Figura 23. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 90 |
| Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15..... | 95 |
| Figura 25. Comparación del pH de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 96 |
| Figura 26. CE de los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3. | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 27. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3. | 98 |
| Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas en los lixiviados. | 100 |
| Figura 29. Concentración de cationes de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 101 |
| Figura 30. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 102 |
| Figura 31. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 103 |
| Figura 32. Concentración de aniones de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 104 |
| Figura 33. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3. | 105 |
| Figura 34. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3. | 106 |
| Figura 35. Comparación de la fracción lixiviada (FL) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 107 |
| Figura 36. Fracción lixiviada (FL) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3. | 108 |
| Figura 37. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP). | 116 |
| Figura 38. Peso fresco de parte aérea (Pf.Aérea) y de raíz (Pf.Raíz) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 116 |
| Figura 39. Peso fresco de brotes (Pf Aérea) y peso fresco de raíz (Pf Raíz) de las pantas sembradas en CA, CP y SC mezclada en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3. | 117 |
| Figura 40. Concentración de N, P, K, Ca, (a y d); Mg, S, Na y Fe (b y e) y Cu, Mn, Zn y B (c y f) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15. | 118 |
| Figura 41. Concentración de N, P y S del tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3. | 119 |

Figura 42. Concentración de cationes intercambiables en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3. 120

Figura 43. Concentración de Fe, Cu, Mn, Zn y B en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3. 123

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen orgánico utilizados en cultivo sin suelo..... | 39 |
| Tabla 2. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen mineral utilizados en cultivo sin suelo..... | 41 |
| Tabla 3. Niveles óptimos recomendados para las características químicas de sustratos para cultivo. | 47 |
| Tabla 4. Ponderación de las variables evaluadas en la selección de materiales promisorios para uso en CSS en Colombia”. | 48 |
| Tabla 5. Inventario de materiales recolectados para la selección de materiales..... | 51 |
| Tabla 6. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen orgánico seleccionados..... | 53 |
| Tabla 7. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen mineral seleccionados..... | 53 |
| Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre los cationes totales e intercambiables presentes en los materiales seleccionados. | 54 |
| Tabla 9. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen orgánico seleccionados. | 54 |
| Tabla 10. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen mineral seleccionados. | 55 |
| Tabla 11. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales orgánicos seleccionados..... | 56 |
| Tabla 12. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales minerales seleccionados..... | 56 |
| Tabla 13. Concentración de metales pesados de cada material de origen orgánico recolectado. | 57 |
| Tabla 14. Concentración de metales pesados de cada material de origen mineral recolectado. | 57 |
| Tabla 15. Análisis físico de los materiales de origen orgánico recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad. | 58 |
| Tabla 16. Análisis físico de los materiales de origen mineral recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad..... | 59 |
| Tabla 17. Propiedades de estabilidad de los materiales de origen orgánico recolectados. | 60 |
| Tabla 18. Análisis microbiológico de los materiales orgánicos. | 61 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 19. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen orgánico recolectados en la caracterización y selección de materiales. | 61 |
| Tabla 20. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen mineral recolectados en la caracterización y selección de materiales. | 62 |
| Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables en fase soluble e intercambiable evaluadas (n = 318)..... | 70 |
| Tabla 22. Componentes (CP), escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 19 se alcanzó el 71% de la variabilidad de los datos. | 71 |
| Tabla 23. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001)..... | 72 |
| Tabla 24. Propiedades y composición química del agua de riego utilizada en la investigación. | 79 |
| Tabla 25. Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades y composición química de los lixiviados evaluados (n = 318)..... | 99 |
| Tabla 26. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados en la caracterización de lixiviados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001)..... | 99 |
| Tabla 27. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP) en la caracterización de los lixiviados. En el CP 4 de 13 se alcanzó el 72% de la variabilidad de los datos. | 100 |
| Tabla 28. Niveles de nutrientes (en base seca) reportados para clavel en la sabana de Bogotá. Fuente: Ortega (1997)..... | 111 |
| Tabla 29. Relaciones catiónicas óptimas en tejido vegetal de clavel, establecidas para los elementos expresados en mg Kg ⁻¹ . Fuente: Medina, 2006. | 112 |
| Tabla 30. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001); (“***” 0,001); (“*” 0,01); (“.” 0,05). | 113 |
| Tabla 31. Variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel al momento de la siembra en sustratos. Pf. Aérea = Peso fresco de parte aérea (brotes); Pf.Raíz = Peso fresco de raíz. | 114 |
| Tabla 32. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel evaluados. | 114 |
| Tabla 33. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 14 se alcanzó el 62% de la variabilidad de los datos. | 115 |
| Tabla 34. Relaciones elementales en tejido vegetal de las tres mezclas que produjeron esquejes con mayor y menor Pf.Raíz, comparado con las relaciones adecuadas definidas por Medina (2006) y el sustrato testigo utilizado comercialmente (CA100). Datos presentados en mg Kg ⁻¹ | 122 |
| Tabla 35. Propiedades químicas y concentración de iones en fase soluble, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. | 136 |
| Tabla 36. Propiedades químicas y concentración de cationes en fase intercambiable, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. | 137 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 37. Propiedades químicas y concentración de micronutrientes y P disponibles, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”..... | 139 |
| Tabla 38. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 140 |
| Tabla 39. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9). | 142 |
| Tabla 40. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 143 |
| Tabla 41. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9). | 144 |
| Tabla 42. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 145 |
| Tabla 43. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9)..... | 147 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 44. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$)..... | 148 |
| Tabla 45. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$)..... | 149 |
| Tabla 46. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$)..... | 150 |
| Tabla 47. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$)..... | 152 |
| Tabla 48. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$)..... | 153 |
| Tabla 49. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$)..... | 154 |
| Tabla 50. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$)..... | 155 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 51. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 156 |
| Tabla 52. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9). | 158 |
| Tabla 53. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9)..... | 159 |
| Tabla 54. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y raíz (Pf.Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 160 |
| Tabla 55. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y raíz (Pf.Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico-material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos de sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), demás datos son medias de nueve observaciones (n=9)..... | 161 |
| Tabla 56. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3)..... | 162 |
| Tabla 57. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico – material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron | |

| | |
|---|-----|
| diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$)..... | 164 |
| Tabla 58. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico-material mineral-proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$)..... | 164 |
| Tabla 59. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$)..... | 166 |

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

| | |
|------------|--|
| <i>CSS</i> | Cultivo sin suelo |
| <i>MPr</i> | Material priorizado |
| <i>MO</i> | Material de origen orgánico |
| <i>MM</i> | Material de origen mineral |
| <i>BMR</i> | Base de datos con materiales de referencia |
| <i>AR</i> | Arena |
| <i>ECf</i> | Carbón escoria fina |
| <i>ECm</i> | Carbón scoria mixta |
| <i>CE</i> | Cobre scoria |
| <i>LM</i> | Ladrillo molido |
| <i>PE</i> | Perlita |
| <i>PP</i> | Piedra pómez |
| <i>VE</i> | Vermiculita |
| <i>ZE</i> | Zeolita |
| <i>CA</i> | Cascarilla de arroz quemada |
| <i>CC</i> | Café cisco |
| <i>AC</i> | Coco astillas |
| <i>FC</i> | Coco fibra |
| <i>SCf</i> | Coco sustrato fino |
| <i>SCg</i> | Coco sustrato grueso |
| <i>AM</i> | Madera aserrín |

Abreviatura Término

| | |
|-----------|---------------------|
| <i>AV</i> | Madera viruta |
| <i>CP</i> | Palma cascarilla |
| <i>FP</i> | Palma fibra |
| <i>TP</i> | Palma tuza prensada |

Introducción general

En Colombia existen 227 viveros certificados (ICA, 2012), aproximadamente 1.200 ha de clavel y mini clavel, 500 ha de rosa (Asocolflores, 2013), y otras áreas no reportadas de especies hortícolas sembradas en sistema de cultivo sin suelo (CSS). Este sistema generalmente se utiliza cuando existe presión por enfermedades o plagas de suelo de muy difícil control (Cárdenas *et al.*, 2006), aunque también se implementa cuando hay necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro, la de superar problemas de salinidad y agotamiento del suelo, cuando se realizan cultivos intensivos de manera continua, y la de controlar el suministro de agua y nutrientes en el entorno radicular (Fornes y Belda, 2014; Medina, 2006). En el país este sistema ha ganado tanta importancia, que una de las demandas de la agenda de Flores y Follajes – Flores tradicionales, en el área temática “Manejo de suelos y aguas” es la “Viabilidad técnica y económica en la implementación de diferentes sustratos dentro del sistema productivo de flores” (Portal siembra, 2015).

En viveros comerciales¹, donde se utiliza turba principalmente, se han venido desarrollando estudios encaminados a encontrar materiales alternativos (Pulido y Escobar, 2009). De igual forma, en cultivos comerciales se ha venido utilizando casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA) como material para CSS, debido a su amplia disponibilidad y bajo costo. No obstante, las áreas sembradas en CSS están creciendo² y la disponibilidad de CA está disminuyendo³.

Localmente se han desarrollado investigaciones con materiales alternativos a la CA, tales como sustrato de coco, escoria de carbón y zeolita, mezclados en diferentes proporciones entre ellos, o mezclados con CA (Flórez *et al.*, 2006; Ulloa *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2006; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Monsalve *et al.*, 2009; Peña *et al.*, 2009; Petitt, 2011). Sin embargo, dada su gran relevancia, estos estudios se han enfocado principalmente en el desarrollo de los cultivos y las propiedades físicas de estos sustratos, y aunque existe una amplia investigación relacionada con el riego, la fertilización y las propiedades físicas de sustratos implementados en CSS, la literatura enfocada a las propiedades químicas de estos medios de cultivo es escasa (Silber, 2008).

¹ En este documento se diferencia cultivo comercial de vivero comercial. El primero hace referencia a cultivos de los cuales se obtiene el producto cosechable. El segundo hace referencia a lugares especializados donde se obtiene material de propagación, como esquejes y plántulas.

² Existen aproximadamente 5000 ha sembradas en rosa, y aproximadamente 500 de esas 5000 en sustrato. Cada año más fincas de producción de rosa trasladan su producción de rosa en suelo a sustrato (Asocolflores, 2013).

³ Debido a los TLCs se está viendo amenazada la producción de arroz en Colombia (Quintero *et al.*, 2013).

Por otro lado, la determinación de las proporciones de los materiales en la mezcla obedece más a un procedimiento de prueba y error, que a un esquema técnico, basado en las características físicas y químicas de los materiales a mezclar y del resultado de su mezcla, y teniendo en cuenta que pocas veces un material por sí solo tiene las propiedades más adecuadas para unas determinadas condiciones del cultivo, en la mayoría de los casos será necesario mezclarlo con otros materiales, en distintas proporciones, para adecuarlo a las condiciones requeridas (Ansorena, 1994; Cadahía, 2005; Henao y Flórez, 2006 y Raviv y Heinrick, 2008). Sin embargo, definir cuál es la mejor mezcla de materiales a utilizar para una determinada especie, resulta en un proceso largo y dispendioso, pues pueden existir cientos o miles de combinaciones, dependiendo de los materiales disponibles y la cantidad y proporción de los mismos dentro de la mezcla.

Con base en todo lo anterior, se aprecia que es necesario desarrollar un estudio que permita conocer detalladamente las propiedades químicas, tanto de los materiales promisorios que se encuentren en el territorio nacional, como de sus mezclas en diversas proporciones, complementando de esta forma los estudios encaminados a conocer sus propiedades físicas e hidrofísicas. Esto con el fin de tener un acervo de materiales que puedan ser implementados para diversos cultivos y viveros en CSS y que a su vez permitan sustituir o complementar el uso de los materiales utilizados tradicionalmente. Es así, como en el presente documento se desarrollaron cinco capítulos: en el primero se presenta una revisión del estado actual de los cultivos sin suelo en Colombia y el mundo, haciendo énfasis en el estudio químico que se ha desarrollado; en el segundo se exponen los resultados de la búsqueda de materiales de origen orgánico y mineral, disponibles en el territorio nacional, que mostraron posibilidad para ser utilizados en CSS, a estos materiales se les realizó una caracterización física, química, de estabilidad y económica para definir cuales presentaban la mayor viabilidad para ser utilizados en CSS; posteriormente, en el capítulo tres, se realizaron mezclas entre los materiales de origen orgánico y mineral viabilizados y se evaluaron sus propiedades y composición química en el sistema sustrato-planta; en el capítulo cuatro se evaluó el comportamiento químico de los lixiviados generados por cada uno de los sustratos viabilizados y sus mezclas; y finalmente, en el capítulo cinco, se evaluó el comportamiento de los exquejes de clavel sembrados en cada uno de los sustratos.

Objetivo General

Caracterizar materiales de origen orgánico y mineral disponibles en el territorio nacional, y seleccionar, a partir de sus propiedades individuales y en mezcla, los más promisorios para ser utilizados en cultivos sin suelo.

Objetivos específicos

1. Caracterizar materiales obtenidos a partir de residuos de mina, industriales, agrícolas y/o agroindustriales, y priorizar aquellos que pueden ser implementados en Cultivos Sin Suelo (CSS).
2. Evaluar la composición y propiedades químicas de la fase soluble e intercambiable de las mezclas (orgánico-mineral) de materiales priorizados.

3. Evaluar la composición química del lixiviado de las mezclas (orgánico-mineral) de materiales priorizados.
4. Identificar los sustratos más promisorios, en función de la respuesta en establecimiento, crecimiento y concentración de nutrientes de esquejes de clavel.

1. Marco teórico

1.1 El cultivo sin suelo (CSS)

Por cultivo sin suelo (CSS), se entiende cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva, o sobre cualquier sustrato con adición de esta solución (Biauxuli y Aguilar, 2002).

Los CSS se han venido desarrollando desde hace más de ocho décadas en el mundo (Ulloa, *et al.*, 2006; Raviv y Heinrick, 2008). Se clasifican en hidropónicos (cultivo de agua más nutrientes o sobre minerales inertes) y cultivos en sustrato (cultivos sobre materiales químicamente activos) (Botero y Flórez, 2006; Raviv y Heinrick, 2008). Lo que los caracteriza a todos es el uso de soluciones nutritivas⁴ para el desarrollo de las plantas que crecen en este medio.

Este sistema generalmente se utiliza cuando existe presión por enfermedades o plagas de suelo de muy difícil control. No obstante, esta forma de cultivo también se utiliza cuando hay otros factores fuertemente limitantes en el suelo, como la salinización, el agotamiento de la fertilidad natural y el deterioro físico (Medina, 2006).

1.1.1 El cultivo sin suelo en Colombia

La implementación en Colombia de este sistema de cultivo se inició principalmente en viveros comerciales, los cuales utilizan sustratos para el desarrollo del material de propagación. Posteriormente, se desarrolló en cultivos de clavel y mini clavel, inducida por la presencia de *Fusarium oxysporum f. sp. Dianthi* (Quintero, 2013 y Medina, 2006), que es posiblemente el patógeno más importante para este cultivo. La presencia de este patógeno en los suelos de la sabana de Bogotá y el hecho de que la desinfección de estos sea inviable desde el punto de vista económico, ambiental y legal⁵ (Quintero, 2013), hizo necesaria la implementación de CSS para el cultivo de clavel. Nuevos cultivos han comenzado a trasladarse a CSS. Es así, como rosa, tomate y algunas hortalizas de hoja ya se están produciendo en CSS, debido a problemas de salinidad, degradación estructural de los suelos y con el fin de mantener un mayor control del Manejo Integrado del Riego y la Fertilización (MIRFE).

En la mayoría del área en CSS en Colombia se ha venido utilizando casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA) como sustrato, no obstante, el uso de este material posee los siguientes problemas técnicos:

⁴ Por solución nutritiva se entiende, el agua con oxígeno (O₂) y todos los nutrientes esenciales para las plantas, disueltos en una forma inorgánica completamente dissociada, aunque en la solución pueden existir formas orgánicas disueltas, procedentes de los micro elementos en forma de quelato (Biauxuli y Aguilar, 2002).

⁵ La prohibición del uso de bromuro de metilo está consignado en el Protocolo de Montreal de 1987

- No es conveniente utilizar la cascarilla recién salida del cultivo (cruda), debido a la posibilidad de que contenga residuos de productos agroquímicos, agentes fitosanitarios o semillas de arvenses. Su implementación en este estado tiene la desventaja de que el material posee 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 el material deba pasar por un proceso de tostado, que genera problemas ambientales (Quintero *et al.*, 2014) e incrementa el costo del material.
- Durante los últimos años se ha venido generando usos alternos a esta cascarilla (elaboración de concreto, por ejemplo), que amenaza su futura disponibilidad (Asocolflores, 2013).
- Se han estado reduciendo las áreas sembradas con arroz (2004 – 580.000 ha; 2013 – 240.000 ha (Agronet, 2015), debido a la importación de arroz proveniente de países con los que Colombia ha generado tratados de libre comercio (Quintero *et al.*, 2013).

1.2 Generalidades sobre sustratos

De acuerdo con Abad y Noguera (1998), el término sustrato se aplica a todo material distinto al suelo *in situ*, colocado en un contenedor (puro o mezclado) para permitir el anclaje del sistema radicular vegetal. El sustrato puede o no intervenir en el proceso de nutrición de las plantas, dependiendo si es o no químicamente inerte (Medina, 2006). En general, se puede resumir que un sustrato para el cultivo de plantas es todo material que puede proporcionar anclaje, oxígeno y agua suficiente para el óptimo desarrollo de las mismas, o en su caso nutrimentos, requerimientos que pueden cubrirse con un solo material o en combinación con otros, los cuales deberán ser colocados en un contenedor (Cruz *et al.*, 2013).

Los sustratos implementados en CSS requieren de un manejo muy similar al de un suelo, ya que, como lo menciona Henao y Flórez (2006), cumplen cinco funciones básicas: 1. Proporcionar un soporte físico a la planta, 2. Retener agua en forma disponible, 3. Disponer del espacio poroso necesario para garantizar el intercambio gaseoso entre la raíz de la planta y la atmósfera, 4. Servir como un reservorio de nutrientes para las plantas, y 5. Albergar poblaciones de microorganismos importantes en el ciclo de nutrientes y el control de enfermedades. Esto indica que lo deseable de un sustrato, es que sea un material que se asemeje a las características físicas y químicas de un suelo “ideal” para el desarrollo del cultivo que se va a sembrar en él.

La elección de un determinado sustrato va a depender, por orden de prioridad: de la disponibilidad del mismo, del costo, de sus propiedades, de la finalidad de la producción y especie cultivada, de las condiciones climáticas, de la experiencia de manejo, homogeneidad y de las posibilidades de instalación (Biauxuli y Aguilar, 2002). Como complemento, Henao y Flórez (2006), indican que las principales propiedades físicas y químicas que deben evaluarse para la selección de un sustrato son: tasa de

descomposición⁶, densidad aparente, espacio poroso total, espacio poroso para aireación, capacidad de retención de humedad, pH, conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

El uso de sustratos para cultivo de plantas debe tener en cuenta, entre otras, las siguientes consideraciones:

- El suelo y los sustratos son medios porosos y sus principios físicos y químicos son similares (Wallach, 2008), sin embargo, cuando se estudia la física de los sustratos es necesario hacer ciertas adaptaciones, debido al limitado espacio para el crecimiento de las raíces, en comparación al suelo (Wallach, 2008).
- El desafío para el productor en CSS es el control de la solución nutritiva, ya que si bien, la capacidad tampón del sustrato podría ayudar a regular el contenido nutricional del mismo, disminuyendo la inducción de deficiencias o toxicidades nutricionales, no todas las mezclas de sustratos tienen esta capacidad tampón, por lo que un error en la aplicación de fertilizantes, afectaría más seriamente a las plantas que crecen en CSS que aquellas cultivadas en suelo.
- El riego y fertirriego dependen de las propiedades del sustrato, no es factible establecer un régimen que cubra todos los posibles materiales y sus mezclas, ya que como lo mencionan Raviv y Heinrick, 2008, si varios sustratos se riegan con regímenes de riego idénticos, a pesar de sus diferentes características físicas, se podría dar ventajas a unos, mientras que otros pueden ser regados en una frecuencia que no responde con sus propiedades.
- No existe un sustrato con propiedades físicas y químicas ideales para el desarrollo de todas las especies. Cada especie requiere, para su correcto desarrollo, unas condiciones particulares del medio de cultivo. Por ejemplo, para el enraizamiento de esquejes de algunas especies de flores es necesario un porcentaje de porosidad de aire mayor al 20 %, mientras que para el crecimiento de plántulas de algunos frutales, este no debe superar el 10 %, por esta razón, se evidencia un menor desarrollo para algunas especies que crecen en medios de cultivo con un porcentaje de porosidad de aire considerado ideal (Wallach, 2008).
- La combinación y proporción de los materiales del sustrato debe ser cuidadosamente estudiada, según los requerimientos de cada especie, pues el volumen limitado de los contenedores exige óptimas propiedades físicas y químicas para el crecimiento de las plantas (Landis *et al.*, 1.990; Gerding *et al.*, 1996; Lavado, 2000).

1.3 Propiedades químicas de los sustratos

Aunque en Colombia no se ha reglamentado el uso de sustratos como medio de cultivo de plantas hortícolas, en el mundo se han definido los niveles óptimos para las propiedades químicas más importantes. Un resumen de estos niveles se presenta en la Tabla 3.

⁶ Esta tasa de descomposición no es tan relevante cuando los sustratos son utilizados en viveros y semilleros, debido a que comúnmente los tiempos de propagación son cortos, menores a sesenta días.

1.3.1 Capacidad de intercambio catiónico

Las superficies de las partículas y otros sólidos en sustratos hortícolas, sobre todo aquellos de origen orgánico o volcánico, poseen carga eléctrica permanente y/o variable. Las cargas negativas permanentes se presentan en sustratos minerales constituidos por silicatos, y resultan de procesos de sustitución isomórfica (Sposito, 2008), la cual es una sustitución del catión estructural de las capas tetraédricas u octaédricas de los silicatos, por otro de menor valencia, con el mismo número de coordinación y tamaño similar, (ejemplos comunes son: Si^{4+} por Al^{3+} o Al^{3+} por Mg^{2+}) (Sposito, 2008). El grado de adsorción de cationes a la superficie es la capacidad de intercambio catiónico (CIC; $\text{cmol}_{(c)} \text{Kg}^{-1}$) (Sposito, 2008). Las cargas variables dependen del pH de la solución del suelo y son generadas por procesos de adsorción de H^+ y OH^- en las superficies sólidas de óxidos metálicos, hidróxidos, silicatos microcristalinos (alófana o imogolita) o sobre grupos orgánicos funcionales (Stevenson, 1994).

La CIC de algunos sustratos de origen orgánico e inorgánico se presenta en la Tabla 1 y Tabla 2. La turba, viruta de pino y compost presentan alta CIC ($80 - 160 \text{ cmol}_{(c)} \text{Kg}^{-1}$), dependiente del pH (Brown y Pokorny, 1975; Puustjarvi, 1977; Daniels y Wright, 1988). Su carga es derivada principalmente de la ionización de grupos carboxilo COOH y en un menor grado de grupos fenólicos OH (Stevenson, 1994). Sustratos comunes como perlita y fibra de coco rara vez se utilizan individualmente, generalmente están contenidos dentro de una mezcla de materiales con cargas superficiales tanto permanentes como variables (Silber, 2008).

La afinidad de los cationes por las superficies cargadas negativamente, bajo igual concentración en la fase acuosa del sustrato, es afectada por las características del ion, tales como valencia, tamaño y estatus de hidratación (Silber, 2008). La afinidad de los cationes divalentes es más alta que los monovalentes, debido a su mayor carga, y usualmente la fuerza de adsorción relativa sigue el siguiente orden: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$ (Barber, 1995). Sin embargo, la concentración de los cationes en una solución de fertirriego no es igual, generalmente la concentración de K^+ excede la de Ca^{2+} , Mg^{2+} o NH_4^+ (Silver, 2008).

El K^+ no está envuelto en reacciones de precipitación de una forma substancial. Ya que es un catión, puede ser adsorbido por las superficies cargadas negativamente y esto puede reducir su disponibilidad para las plantas. Cabe resaltar, que al igual que otros cationes, el fraccionamiento del K^+ entre la solución del sustrato y la superficie sólida, depende de su concentración relativa en la solución y de la afinidad con los sitios de intercambio (Silber, 2008). El NH_4^+ es una fuente de N para las plantas que generalmente no se precipita. La alta afinidad del NH_4^+ por las superficies cargadas negativamente, afecta su disponibilidad para las plantas (Silber, 2008). Los cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} también presentan una alta afinidad a las superficies cargadas negativamente (Barber, 1995) y además están envueltos en reacciones de precipitación, especialmente con H_2PO_4^- y SO_4^{2-} . La disponibilidad del P en la rizósfera es gobernada por la actividad del Ca^{2+} y Mg^{2+} (Silber, 2008). Debido a que los micronutrientes como Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} son iones de adsorción específica (IAE), su afinidad a las superficies cargadas es más alta que la de los otros cationes, y por estar involucrados en reacciones de precipitación, su disponibilidad para las plantas es muy baja (Silber, 2008).

En condiciones de cultivo, la reacción de intercambio puede ser benéfica en los casos donde a) la concentración de Na^+ o de un catión tóxico (tal como un metal pesado) en la solución del medio de crecimiento disminuye, como resultado de la adsorción, o b) cuando la concentración de un catión benéfico en el medio acuoso se incrementa como resultado de la desorción. Por otro lado, la reacción de intercambio podría ser nociva cuando a) hay un incremento en la concentración de un catión tóxico en la solución, por procesos de desorción o b) por la disminución de la concentración de un catión benéfico en la solución del suelo, a través del proceso de adsorción (Silber, 2008).

La solubilidad del NO_3^- , que es la mayor fuente de N para crecimiento de plantas, es muy alta, sin embargo su afinidad con los sitios de carga positiva es muy baja, comparado con H_2PO_4^- o SO_4^{2-} , en consecuencia, la concentración de NO_3^- en la solución del sustrato es prácticamente inalterada por reacciones de precipitación y/o de adsorción (Silber, 2008).

1.3.2 Liberación de nutrientes a partir de los sustratos

El objetivo de reducir el riesgo de contaminación que representan para el medio ambiente el exceso de fertilización en la producción sin suelo, ha llevado a encaminar esfuerzos para regular la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera y para desarrollar sustratos que puedan suministrar nutrientes durante el periodo de crecimiento de los cultivos hortícolas (Silber, 2008). La reducción del exceso de fertilización puede ser obtenido, en cierta medida, a través de dos procesos: 1) pre-carga de los sustratos con nutrientes que son posteriormente liberados durante el periodo de crecimiento, es decir, el sustrato funciona como un fertilizante de lenta liberación, y 2) liberación de nutrientes nativos de los sustratos, como un resultado de procesos bioquímicos, tales como mineralización de N en medios orgánicos o disolución de nutrientes nativos desde componentes inorgánicos (Silber, 2008).

Para pre-cargar los sustratos es necesario que estos tengan una alta CIC y/o capacidad de intercambio aniónico (CIA). Algunos materiales utilizados ampliamente, como perlita y piedra pómez, poseen una baja CIC, por lo que no serían susceptibles de ser pre cargados, mientras que las zeolitas, que poseen una muy alta CIC (200-400 cmol. Kg^{-1}) (Mumpton, 1999) podrían ser pre-cargadas, adicionando los cationes adecuados. Teóricamente, si todos los sitios de intercambio de la zeolita fueran pre-cargados con iones de K^+ , el cúmulo de K^+ total sería de 80 a 160 g Kg^{-1} . Según Bar-Yosef (1999), aproximadamente 200 g de zeolita son requeridos para satisfacer la demanda de K^+ a través del ciclo de crecimiento de tomate y pimentón en condiciones de cultivo intensivo, que es de 15 a 20 g por planta. La tasa de liberación debe coincidir con la demanda de la planta, de acuerdo con el estado fenológico, que puede ser baja al inicio y se incrementa gradualmente durante las siguientes etapas de crecimiento. Además, los nutrientes pre-cargados son liberados desde los sitios de la superficie a través de reacciones de intercambio con otros iones (para el caso del K^+ , con Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ y Na^+). Factores tales como concentración de iones antagonistas en la solución del sustrato, dosis de irrigación y actividad de la planta, afectan la tasa de liberación de nutrientes, por consiguiente, su disponibilidad no es regulable y puede ser diferente a la demanda de la planta (Silber, 2008).

La contribución de nutrientes nativos, liberados a partir de sustratos inorgánicos es usualmente muy baja durante el ciclo de cultivo y, excepto en unos pocos casos donde

se utiliza roca fosfórica, es casi despreciable. Los sustratos orgánicos, por otro lado, y especialmente compost, contienen altas cantidades de N, por consiguiente, la producción en estos medios de cultivo puede ser importante (Silber 2008). De igual forma, la tasa de liberación de N va a depender del tipo de sustrato orgánico, de su relación C/N, de su grado de madurez, de su forma de obtención y de las condiciones climáticas, especialmente temperatura y humedad relativa, que pueden afectar los procesos biológicos y bioquímicos. Sin embargo, la incorporación de compost con altas concentraciones de N, puede permitir una reducción de la tasa de aplicación de N durante las primeras etapas de crecimiento del cultivo (Silber, 2008). Esto es particularmente importante bajo sistemas de agricultura orgánica y en situaciones donde la reducción de contaminantes es importante (Silber, 2008). Estos hallazgos pueden ser particularmente aplicables en cultivos de ciclo corto, tales como plántulas, que generalmente toman hasta 35 días (Raviv et al., 1998).

1.3.3 Propiedades químicas de sustratos orgánicos

Cascarilla de arroz (CA): Es un sustrato orgánico, obtenido a partir de la producción de granos de arroz (*Oryza sativa* L.), los cuales se encuentran dentro de una cascarilla formada por las glumillas adheridas al grano. Cuando el grano se descascara se obtiene como subproducto la CA, que es de baja tasa de descomposición por su alto contenido de sílice (Quintero, 2014), su pH es circumneutral (6,3) y su conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico son bajas (0,3 dS cm⁻¹ y 21 cmol_c Kg⁻¹, respectivamente) (Quintero *et al.*, 2012).

Schmitz *et al* (2002), quien caracterizó las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz en comparación con otros materiales, encontró que el pH de la CA se encuentra por encima del óptimo reportado para sustratos de origen orgánico, el cual debe estar dentro del rango 5,2 - 5,5 (Kampf y Fermino, 2000). Por otra parte, el contenido total de sales solubles debe encontrarse por debajo de los 0,5 g L⁻¹ para sustratos hortícolas (Conover, 1967). En cuanto a este aspecto, la CA presentó valores de 0,30 g L⁻¹, que se ajustan a lo reportado como ideal (Tabla 3). En relación con la CIC y contenido de carbono orgánico, la CA quemada presenta valores bajos (8,5 cmol_c Kg⁻¹ y 17,3%, respectivamente). De acuerdo con Quintero *et al.* (2011), el K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ intercambiable de la CA quemada, previo a su uso, presentan un nivel promedio de 10,2, 3,76, 2,45 y 1,88 cmol_c Kg⁻¹, respectivamente.

Sustrato de coco: Fibra es el nombre que se le da al material que constituye el mesocarpio del fruto de coco (*Cocos nucifera*) (Abad *et al.*, 2002) y del cual se obtiene el sustrato de coco.

Evans *et al* (1996), determinaron las propiedades físicas y químicas del sustrato de coco proveniente de diversas fuentes. En cuanto a las variables químicas, los valores más altos se presentaron en el contenido de K y Cl para todos los materiales estudiados, encontrándose entre 19 a 948 y 26 a 1636 mg Kg⁻¹, para K y Cl, respectivamente, lo que se relaciona posiblemente con que en algunas zonas productoras de fibra de coco para sustrato, el manejo de la fertilidad de la plantación se realiza con base en fuentes como KCl (Evans *et al.*, 1996). Adicionalmente, la planta de coco se considera semi-halófito, lo que hace que absorba sales y las transporte incluso al fruto en desarrollo (Jenagathan, 1992). En general, la variabilidad en los contenidos nutricionales de la fibra de coco está

en función del procesamiento del material de partida y de las condiciones en las cuales se produce la palma. Se debe tener en cuenta además, que leves deficiencias de N pueden presentarse cuando se usa fibra de coco en cultivos (Noguera *et al.*, 2000).

Apaolaza y Guerrero (2008), compararon la capacidad de retención de cadmio (Cd) plomo (Pb), zinc (Zn) y nitrato (NO_3^-) de la corteza de pino y la fibra de coco cuando son mezcladas con cantidades crecientes de sedimentos (0%, 15% y 30% v:v). La alta capacidad de retención de iones minimiza el riesgo ambiental de liberación de contaminantes al ambiente, cuando este tipo de residuos son usados con fines agrícolas. Se encontró además, que la corteza de pino presentó menor cantidad de NO_3^- en el lixiviado en comparación con la fibra de coco. Orlando *et al.* (2002), afirmaron con respecto a esto, que la capacidad de adsorción de NO_3^- por parte de la corteza de pino es mayor ($1,06 \text{ mmol g}^{-1}$) en comparación con la de la fibra de coco ($0,89 \text{ mmol g}^{-1}$). Con relación a los metales pesados estudiados, la corteza de pino puede adsorber los elementos de la solución acuosa en el orden $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. La retención de metales pesados por estos materiales puede ser atribuida a la formación de complejos con los grupos carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato y grupos aminoácidos de proteínas, carbohidratos y compuestos fenólicos.

De Farias *et al.* (2012), caracterizaron algunas propiedades físicas y químicas del sustrato de coco. Con relación al pH y la conductividad eléctrica, se encontraron valores de 5,97 y $0,6 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente.

Cascarilla de palma: Aunque existe un gran potencial de este residuo agrícola, no hay muchos trabajos concernientes a su uso en CSS. Asiah *et al.* (2004), determinaron las diferencias en cuanto a propiedades físicas y químicas entre sustratos locales a base de cascarilla de palma y su efecto en el crecimiento y el contenido de nitrógeno de plantas de coliflor. Con respecto a las propiedades químicas, el pH mostró valores de 6,9, la CE $1,3 \text{ dS m}^{-1}$, N total 0,42%, P 0,23%, K 1,56%, Ca 0,08% y Mg 0,05%. Las propiedades químicas, en particular el pH, que para este material tiende a ser alcalino, puede causar problemas en cuanto a la disponibilidad de micronutrientes. La baja respuesta que se presentó en el crecimiento de las plantas sembradas en cascarilla de palma se relacionó con las altas tasas de inmovilización de N por los microorganismos. Adicionalmente, un efecto negativo del material sobre el crecimiento de las plantas se explica por el cambio en sus propiedades físicas y químicas, es decir, por la inestabilidad del sustrato, que puede causar compactación, disminución del espacio poroso, alteración del tamaño de partículas e incrementos del pH y la salinidad. Reportes de Zanin *et al.* (1998), sobre bajos contenidos de lignina de la cascarilla de palma (22-25%) en comparación con otros materiales, muestran que este material es susceptible a la degradación microbiana, lo cual lo hace inestable si se usa como sustrato antes de ser compostado. Se concluye que la cascarilla de palma debe ser sometida a un proceso de compostaje para alcanzar su bioestabilidad, antes de ser usada como sustrato para crecimiento de plantas.

En la Tabla 1 se pueden apreciar las propiedades y composición química de algunos sustratos de origen orgánico.

Tabla 1. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen orgánico utilizados en cultivo sin suelo.

| PROPIEDAD | Unidad | Cascarilla arroz | Turba | Sustrato coco | Cascarilla palma |
|------------------|------------------------------------|------------------|--------------|---------------|------------------|
| pH | | 5,8 (a) | 6,1 (d) | 5,97 (f) | 6,9 (g) |
| CE | dS m ⁻¹ | 0,3 (b) | 0,36 (d) | 0,6 (f) | 1,3 (g) |
| CIC | | 25,5 (a) | 90 a 140 (e) | 39 a 60 (e) | 95 (h) |
| K | | 10,2 (a) | 0,32 (d) | 0,59 (d) | 0.13 (h) |
| Ca | cmol _c Kg ⁻¹ | 3,76 (a) | 0,86 (d) | 0,14 (d) | 0.15 (h) |
| Mg | | 2,45 (a) | 0,25 (d) | 0,05 (d) | 0.21 (h) |
| Na | | 1,88 (a) | 0,16 (d) | 0,55 (d) | |
| NO ₃ | | | 85 (d) | 14 (d) | |
| Cl | | | 57 (d) | 206 (d) | |
| SO ₄ | mg Kg ⁻¹ | | 340 (d) | 51 (d) | |
| PO ₄ | | 183 a 275 (a) | 18 (d) | 14 (d) | 42.8 (h) |
| SiO ₂ | % | 94 (c) | | | |

Fuente: a) Fuente: a) Quintero *et al.* (2011); b) Quintero *et al.* (2012); c) Quintero (2014); d) Ansorena (1994); e) Puustjarvi y Robertson (1975); f) De Farias *et al.* (2012); g) Asiah *et al.* (2004); h) Ghehsareh y Kalbasi (2012).

1.3.4 Propiedades químicas de sustratos inorgánicos

Escoria de carbón: En Colombia existen un gran número de industrias y plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan el carbón como fuente de energía (Quintero, 2014). Cuando el carbón se quema se produce como residuo entre el 12 y el 20% en peso de un material grueso y granular, así como un 2% de cenizas que pueden ser utilizados como sustrato (Quintero, 2014).

Este material también se puede obtener a partir de los hornos siderúrgicos, que trabajan fundamentalmente a partir de chatarra y arrabio, que es una forma de hierro mineral, compuesto básicamente por hierro, óxidos y chatarra. Cualquiera sea la base del acero producido, como subproducto del proceso se generará una escoria (Serna, 2012).

La escoria de carbón se ha evaluado en producción de especies como tomate (Peña *et al.*, 2009) y clavel (Quintero *et al.*, 2012), encontrando que las plantas crecen de forma óptima en este sustrato, ya sea mezclado, o de forma individual, y aunque algunos autores pueden considerarlo un material inerte, la escoria de carbón puede presentar fijación de fósforo o excesos de boro (Martínez y Roca, 2011). En la Tabla 2 se pueden apreciar algunas de las propiedades químicas de este material.

Perlita: Es un silicato de aluminio de origen volcánico, compuesto de rocas vítreas formadas por enfriamiento rápido que dan lugar a un material amorfo con un 2-5% de agua (Abad *et al.*, 2004). Este material es tratado industrialmente con altas temperaturas, de forma que el agua se evapora rápidamente, haciendo que el material se expanda, dando un producto final de baja densidad (Fernández, 2010).

Silver *et al.* (2012), determinaron que la adsorción de Zn por la perlita fue dependiente del pH, la fuerza iónica y la temperatura; todo esto relacionado con una combinación de afinidad química por los sitios de adsorción y un componente electrostático que se relaciona, a su vez, con la carga superficial, todo controlado por el pH. El incremento en la temperatura condujo a un incremento del pH y finalmente al aumento en la adsorción de Zn. La adsorción específica de Zn modificó las características de carga de la perlita, por lo tanto, la adsorción de este elemento afectó indirectamente el comportamiento de otros iones, tales como P.

Gul *et al.* (2007), compararon el efecto de dos fuentes fertilizantes, abono orgánico y solución nutritiva, sobre la producción de pepino, sembrado en diferentes sustratos: perlita + zeolita (3:1), perlita + zeolita (1:1), toba volcánica + zeolita (3:1) y toba volcánica + zeolita (1:1), (v:v). El rendimiento del cultivo mostro mejores resultados en medios basados en perlita. Lo anterior relacionado con una mayor capacidad de retención de agua de la perlita en comparación con la toba volcánica.

Piedra pómez: La piedra pómez, pumita o pumicita, es un mineral de origen volcánico (piroclastico) poroso; se origina durante el enfriamiento muy rápido del magma ascendente de alta viscosidad; características de las vulcanitas claras y ácidas, como la riolita, y por ello son de color blanco grisáceo hasta amarillento, algunas veces de color pardo o gris (Daniels y Hammer, 1992).

Está compuesta de 71% de SiO₂, 12,8% de Al₂O₃, 1,75% de Fe₂O₃, 1,36% de CaO, 3,23% de Na₂O, 3,83% de K₂O y 3,83 de H₂O (Boodt *et al.*, 1974). Sus propiedades pueden variar de unos a otros lugares (Martínez y Roca, 2011). En general su pH es ligeramente alcalino, con baja salinidad ocasional que se puede reducir parcialmente con lavado (Martínez y Roca, 2011).

Vermiculita: Se obtiene a partir de un tipo de micas sometido a temperaturas superiores a los 800°C. Su densidad aparente es de 990 a 1400 kg m⁻³, puede retener hasta 350 L de agua m⁻³ y posee alta capacidad de aireación, aunque tiende a compactarse (Terrés *et al.*, 2001). Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa, como la vermiculita, tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral (Abad, 1993; Abad y Noguera, 1998).

Olivo y Baduba (2006), estudiaron la influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernadero. En la comparación de los sustratos se observó que las plantas desarrolladas en el sustrato turba + vermiculita obtuvieron mayor tamaño en todas las variables. El mejor comportamiento de los sustratos formados con vermiculita puede deberse a que dicho componente inorgánico brindaría las mejores condiciones fisicoquímicas para el crecimiento vegetal. Sin embargo, Landis *et al.* (1990), señalan que la vermiculita es estructuralmente inestable y por ello debe emplearse en mezclas con un componente que provea resistencia a la compactación. En este estudio, la combinación de turba con vermiculita resolvió satisfactoriamente esta debilidad cuando se analizó el peso húmedo de toda la planta, el peso seco de la parte radical y el peso seco de las raíces secundarias.

Zeolita: Son silicatos de aluminio hidratados, cristalinos, caracterizados por poseer una estructura que les genera propiedades particulares de adsorción e intercambio de

cationes, lo cual las hace potencialmente útiles en CSS, particularmente la clinoptilolita (una especie de zeolita), que tiene una alta capacidad de intercambio de iones (Harland *et al.*, 1999). La fórmula general de la clinoptilolita es $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5}, \text{Mg}_{0.5})_6 [\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}] \sim 20\text{H}_2\text{O}$ (Montes *et al.*, 2014).

Según Quian *et al.* (2001), las zeolitas son minerales con estructura porosa (porosidad > 40%), que presentan alta capacidad de intercambio catiónico. En el estudio realizado por Harland *et al.* (1999), se examinó la reutilización de zeolita como sustrato para cultivo de pimiento. Las mediciones de crecimiento, rendimiento y calidad de fruto no mostraron disminuciones con el reciclaje del material. Los análisis de tejido foliar y específicamente los contenidos de nitrógeno, mostraron una caída significativa a través de los tres años de duración del experimento. Los análisis de lixiviados mostraron una disminución en los niveles de nitrógeno y potasio, mientras que se presentó un aumento en los niveles de sodio, relacionado con la baja capacidad de adsorción de sodio de este material.

Gul *et al.* (2005), evaluaron el efecto de zeolita y perlita, sobre el crecimiento de plantas de lechuga crespa, absorción de nutrientes y cantidad de lixiviados como NO_3^- , P, K^+ , Ca^{2+} y Na^+ . Los resultados mostraron que la zeolita presenta ventajas como sustrato en comparación con la perlita, ya que con el uso de este material se obtuvo un incremento en el peso de la cabeza de la lechuga. Este efecto se atribuyó a un incremento en la absorción de algunos nutrientes, como N y K cuando se usa la zeolita, debido a su alta CIC. Además, este material actúa como reservorio, manteniendo elementos en su estructura para su lenta desorción a la solución del sustrato o directamente a la rizósfera. De igual manera, se presentó una disminución en la lixiviación de K^+ y NO_3^- .

En la Tabla 2 se pueden apreciar las propiedades y composición química de algunos sustratos de origen mineral.

Tabla 2. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen mineral utilizados en cultivo sin suelo.

| PROPIEDAD | Unidad | Escoria carbón | Perlita | Piedra pómez | Vermiculita | Zeolita |
|------------------|------------------------------------|----------------|-----------|--------------|-------------|-----------|
| pH | | 5.5 (a) | 6.9 (b) | 6.3 (e) | 7.5 (b) | 5.65 (g) |
| CE | dS m ⁻¹ | 2.5 (a) | 0.4 (c) | | 2 a 5.4 (f) | 0.30 (g) |
| CIC | | 3.3 (a) | 13 (c) | 10 a 60 (c) | 27 (b) | 23 (b) |
| K | | | 0.02 (c) | | | 42.57 (g) |
| Ca | cmol _c Kg ⁻¹ | | 0,1 (c) | | | 6.65 (g) |
| Mg | | | 0.05 (c) | | | 6.08 (g) |
| Na | | | | | | 31.36 (g) |
| PO ₄ | mg Kg ⁻¹ | | 6 (c) | | | |
| SiO ₂ | % | | 73-74 (d) | 70-75 (e) | 20-25(e) | 64-68 (e) |

Fuente: a) Quintero *et al.* (2012); b) Martínez y Roca (2011); c) Ghehsareh y Kalbasi (2012); d) Abad *et al.* (2005); e) Sonneveld y Voogt (2009); f) Kang *et al.* (2004); g) Urbina *et al.* (2006).

1.4 Relación química sustrato planta

1.4.1 Efecto de la planta sobre la disponibilidad de nutrientes

Los efectos del crecimiento de la planta sobre la solubilidad de nutrientes en la rizósfera son específicos y principalmente relacionados con la constante de formación entre iones inorgánicos y ligandos orgánicos excretados por las raíces (Silber, 2008). Por ejemplo, las constantes de formación ($\log K^0$) de ácido cítrico y ácido oxálico con K son 1,2 y 1,1 respectivamente, comparado con 4,8, 3,8, y 4,7, y 3,4, 9,9 y 13,0 para los mismos dos ácidos con Ca, Mg y Al, respectivamente (Martell y Smith, 1989). Por consiguiente, en presencia de plantas y con la consecuente formación de ácidos orgánicos excretados por la raíz a la rizósfera, los complejos solubles Ca-, Mg- y Al-ligando serán predominantes, mientras la proporción de K-ligando será menor.

En cuanto a la solubilidad de nutrientes, uno de los resultados más significativos del crecimiento de raíces, es el aumento de la disponibilidad de P, debido a que su presencia en la solución está gobernada por reacciones de adsorción/desorción y precipitación/disolución; por consiguiente su concentración puede caer a niveles de deficiencia (Silber, 2008). Los exudados de las raíces promueven un medio ácido en la rizósfera, que facilita la solubilización y posterior disponibilidad de P para las plantas (Marschner, 2012), por ende, el hecho de que en CSS la densidad de raíces sea mayor, probablemente implique un mayor efecto sobre la disponibilidad de P, comparado con lo sucedido en cultivos en suelo (Silber, 2008).

1.4.2 Relación entre la planta y las propiedades químicas de las superficies de los sustratos

Generalmente la CIC de las raíces tiene el mismo orden de magnitud de los constituyentes de los suelos ($10\text{-}100 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$) (Marschner, 2012). La CIC de las raíces es dependiente del pH y la adsorción de iones sigue el mismo mecanismo que el de los suelos. Sin embargo, no resulta tan clara la contribución de las raíces a las propiedades de carga del medio, debido a que los altos valores de CIC reportados para las raíces, fueron relacionados principalmente con las paredes celulares (Marschner, 2012), los iones deben atravesar el apoplasto desde la solución, lo cual sugiere que la CIC de la superficie de las raíces sea menor (Marschner, 2012).

Con respecto al pH, los efectos de sus cambios en la rizósfera son causados por la excreción de iones (principalmente H^+ , OH^- y ácidos o bases orgánicas), los cuales equilibran la carga eléctrica, siguiendo la absorción de iones por las raíces, respiración de las raíces, exudación de carbono o procesos redox (Hinsinger *et al.*, 2003). El efecto de las plantas sobre el pH de la rizósfera está ampliamente relacionado con las propiedades químicas de las fases sólidas, pues se sabe que la acumulación de ácidos orgánicos solubles, excretados desde las raíces en presencia de un medio inerte, puede inducir a la disminución del pH (Silber, 2008).

Finalmente, el CSS se caracteriza por las restricciones de expansión que tiene el sistema de raíces, en comparación con cultivos en suelo, lo cual conduce a una mayor densidad de raíces en CSS (Silber, 2008). Por esta razón, Morel y Hinsinger (1999) sugieren que

en CSS, las raíces tienen un impacto más significativo sobre las propiedades del medio que aquellas que crecen en suelo.

2. Caracterización y selección de materiales promisorios para uso en sistemas de cultivo sin suelo, en Colombia

2.1 Resumen

Los sistemas de cultivo sin suelo (CSS) utilizan sustratos compuestos por materiales provenientes de diversos orígenes, los cuales interactúan con la planta de la misma forma como lo hace el suelo. En Colombia, el sustrato más utilizado en cultivos comerciales es la cascarilla de arroz (CA), mientras que en viveros comerciales se usa principalmente la turba; lo cual ha generado una alta dependencia a estos materiales por parte de los agricultores. En búsqueda de otras alternativas se realizó una selección de materiales provenientes de residuos agrícolas o agroindustriales principalmente, pero también de residuos industriales y de minas, disponibles en el territorio nacional, que fueran viables para su implementación en CSS. Los materiales se caracterizaron, determinando sus propiedades químicas, concentración de metales pesados, propiedades de estabilidad, presencia de organismos fitopatógenos, costo, disponibilidad y facilidad de manejo. Para determinar cuáles materiales se consideraban más promisorios, se definieron ponderadores para cada variable y se asignó una puntuación ponderada. Con base en los resultados, el sustrato de coco, la cascarilla de palma y la cascarilla de arroz (materiales de origen orgánico), y la escoria de carbón, piedra pómez, perlita, vermiculita y zeolita (materiales de origen mineral), se definieron como los más promisorios y aptos para ser utilizados en sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: sustrato mineral, sustrato orgánico, propiedades químicas, propiedades de estabilidad.

Abreviaciones:

| | | | |
|------------|--|------------|----------------------|
| BMR | Base de datos con materiales de referencia | CC | Café cisco |
| CSS | Cultivo sin suelo | AC | Coco astillas |
| MO | Material de origen orgánico | FC | Coco fibra |
| MM | Material de origen mineral | SCf | Coco sustrato fino |
| MPr | Materiales priorizados | SCg | Coco sustrato grueso |
| AR | Arena | AM | Madera aserrín |
| ECf | Carbón escoria fina | AV | Madera viruta |
| ECm | Carbón escoria mixta | CP | Palma cascarilla |
| CuE | Cobre escoria | FP | Palma fibra |
| LM | Ladrillo molido | TP | Palma tuza prensada |
| PE | Perlita | | |
| PP | Piedra Pómez | | |
| VE | Vermiculita | | |
| ZE | Zeolita | | |
| CA | Arroz cascarilla quemada | | |

2.2 Introducción

Elegir un sustrato es un proceso que debe tener en cuenta múltiples factores, tales como: disponibilidad del mismo, costo, propiedades, finalidad de la producción y especie cultivada, condiciones climáticas, experiencia de manejo y homogeneidad (Biauxuli y Aguilar, 2002). Generalmente los sustratos son mezclas de diferentes materiales de origen orgánico y/o mineral, ya que como lo enuncian Ansorena (1994), Cadahía (2005); Henao y Flórez (2006) y Raviv y Heinrick, (2008), pocas veces un material por sí solo tiene las características físicas y químicas más adecuadas para unas determinadas condiciones del cultivo, en la mayoría de los casos, para adecuarlo a las condiciones requeridas, será necesario mezclarlo con otros materiales en distintas proporciones. Sin embargo, precisar cuál es la mejor mezcla de materiales a utilizar para una determinada especie resulta en un proceso largo y dispendioso, pues pueden existir muchas combinaciones, dependiendo de los materiales disponibles y la cantidad y proporción de los mismos dentro de la mezcla.

Existen diversos estudios llevados a cabo para caracterizar materiales que sirvan como medio de cultivo, principalmente de materiales disponibles cerca de las zonas de producción. No todos los materiales que existen para CSS están disponibles para su uso, y la elección de un material que sirva como medio de cultivo debe considerar múltiples variables (Liu, 2015). El objetivo del presente capítulo es caracterizar materiales obtenidos a partir de residuos de mina, industriales, agrícolas y/o agroindustriales, y priorizar aquellos que pueden ser implementados en Cultivos Sin Suelo (CSS).

2.3 Materiales y métodos

Se construyó una base de datos con información detallada de materiales provenientes de minas, residuos industriales, agrícolas y/o agroindustriales que tuvieran algún potencial para ser implementados en CSS. Esta base de datos con materiales de referencia (BMR) se construyó a partir de la siguiente secuencia de actividades:

2.3.1 Ubicación y adquisición de materiales. Construcción de la base de datos con materiales de referencia (BMR)

Para identificar y adquirir los materiales con posibilidad para ser utilizados en CSS se realizó una recopilación de información primaria y secundaria, revisando resultados de proyectos referentes a sustratos que se han realizado en Colombia. En la selección de los materiales, se dio énfasis a residuos agrícolas y agroindustriales y aquellos de origen mineral que ya tuvieran algún antecedente de uso en CSS.

Una vez se recopiló la información, se identificaron los materiales que se incluirían en la BMR y pasarían a la etapa de caracterización.

2.3.2 Variables evaluadas

Ya reunidos todos los materiales en la BMR, se determinaron las propiedades químicas: pH con el método potenciométrico; CE (Conductividad Eléctrica) con el método

conductimétrico – lectura a 25 °C; CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) y bases intercambiables (Ca, Mg, 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 (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn y Zn, se determinó mediante calcinación de la muestra a 600°C, realizando la valoración por espectrofotometría de absorción atómica; P total, mediante calcinación a 600°C, realizando valoración colorimétrica con molibdato y vanadato de amonio; B total, mediante calcinación a 600°C, realizando valoración colorimétrica con azometina-H. Las propiedades físicas se determinaron así: D_p (Densidad aparente), mediante pesado de un volumen conocido de material seco; la retención de agua a 0,33, 5 y 15 bares de presión, con el plato y olla de tensión.

Adicionalmente se determinó la concentración de los metales pesados: Cd, Co, Cr, mediante digestión ácida; Pb, con absorción atómica con llama, As^7 , Hg y Se, por absorción atómica con generador de hidruros. También se determinaron las propiedades de estabilidad: relación C/N y concentración de hemicelulosa, celulosa, lignina (de acuerdo con la metodología sugerida por Van Soest *et al.* (1991) y silicio.

Finalmente se determinó la presencia y concentración de hongos, bacterias y nematodos fitopatógenos, *E. Coli* y Coliformes totales.

2.3.3 Análisis de datos

Los materiales se agruparon según su origen mineral (MM) y orgánico (MO) y se realizó una descripción de las propiedades de cada material incluido en la BMR. Se realizó una matriz de correlación de Pearson entre las variables evaluadas con el software R-Project 3.2.3.

2.3.4 Priorización de materiales a partir de la BMR

Una vez se caracterizó cada material incluido en la BMR, se viabilizaron aquellos que presentaron las mejores propiedades, teniendo en cuenta los rangos de mínimo, máximo y óptimo expuestos en la Tabla 3, pero que además tuvieran viabilidad económica y de suministro, la cual se determinó contrastando los costos y disponibilidad de cada material con los de la cascarilla de arroz (CA).

⁷ El arsénico (As) no aparece reportado en la tabla periódica de los elementos como metal. No obstante, tradicionalmente se ha incluido en el grupo de los metales pesados.

Tabla 3. Niveles óptimos recomendados para las características químicas de sustratos para cultivo.

| VARIABLE | UNIDAD | MINERAL | ORGÁNICO | |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------|--------|
| pH ** (b) | | 5,5 a 7,0 | 5,5 a 7,0 | |
| CE (b) | dS m ⁻¹ | < 2,0 | < 2,0 | |
| N- NH₄ (a) | mg L ⁻¹ | < 20 | < 20 | |
| N-NO₃ (a) | | 100 a 199 | 100 a 199 | |
| P (a) | | 6 a 10 | 6 a 10 | |
| K (a) | | 150 a 249 | 150 a 249 | |
| Ca (a) | | 200 a 3000 | 200 a 3000 | |
| Mg (a) | | 70 a 3000 | 70 a 3000 | |
| Cenizas (a) | | % | < 20 | < 20 |
| MO (a) | NA | | > 80 | |
| CO (a) | NA | | 40 a 50 | |
| C/N (a) | | NA | > 40 | |
| CIC (a) | Cmol _c Kg ⁻¹ | > 20 | > 20 | |
| Fe (b) | mg Kg ⁻¹ | < 3 | < 3 | |
| Mn (b) | | <3 | <3 | |
| Cu (b) | | < 0,5 | < 0,5 | |
| Zn (b) | | < 3 | < 3 | |
| B (b) | | < 0,5 | < 0,5 | |
| METALES PESADOS | | | | |
| Cd (c) | | mg Kg ⁻¹ | < 3,6 | < 0,72 |
| Cr (c) | < 250 | | < 50 | |
| Cu (c) | < 120 | | < 24 | |
| Zn (c) | < 365 | | < 73 | |
| As (c) | < 105 | | < 5000 | |
| Co (d) | < 50 | | < 50 | |
| Hg (c) | µg Kg ⁻¹ | < 1150 | < 230 | |
| Ni (c) | | < 200 | < 10 | |
| Pb (c) | | < 325 | < 65 | |
| PROPIEDADES FÍSICAS | | | | |
| D. Aparente (b) | g cm ⁻³ | <0,4 | <0,4 | |
| RH - 0,1 bar (b) | % | 25 a31 | 25 a31 | |
| Tamaño partícula (b) | Mm | 0,25 a 2,5 | 0,25 a 2,5 | |

** Determinado en extracto de saturación; NA = No aplica, RH = Retención de humedad. Fuente, adaptado de: a) Gallegos (2008); b) Ansorena (1994); c) RHP (2007); d) Vendock *et al* (1987) en Ansorena (1994).

Con el fin de establecer un método para la elección de los materiales más promisorios, se tuvo en cuenta lo reportado por Abad *et al.* (2005), quien sugiere que para obtener buenos resultados para la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del sustrato:

- **Propiedades físicas:** los sustratos deben reunir las siguientes propiedades físicas: a) elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible (20-30% en volumen); b) suficiente suministro de aire (10-30 % en volumen); c) distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones antes mencionadas; d) baja densidad aparente ($<0,4 \text{ g cc}^{-1}$); e) elevada porosidad total ($> 85\%$ en volumen) y f) estructura estable, que impida la contracción o expansión del sustrato
- **Propiedades químicas:** a) Baja CIC cuando la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, o alta CIC cuando la fertirrigación se realice esporádicamente; b) suficiente nivel de nutrientes asimilables; c) baja salinidad; d) pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón y e) mínima velocidad de descomposición.
- **Otras propiedades:** a) libre de semillas, arvenses, fitopatógenos y sustancias fitotóxicas; b) disponibilidad; c) bajo costo, d) facilidad de preparación y de manejo; e) facilidad de desinfección y estabilidad frente a la desinfección; f) resistencia a cambios extremos físicos, químicos y ambientales.

Con base en la anterior descripción, y de acuerdo con información suministrada por Ceniflores⁸, se definieron los ponderadores presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Ponderación de las variables evaluadas en la selección de materiales promisorios para uso en CSS en Colombia⁹.

| VARIABLE | PONDERADOR | |
|--|-------------|-------------|
| | ORGÁNICO | MINERAL |
| Costo del material | 0,25 | 0,25 |
| Disponibilidad del material | 0,15 | 0,20 |
| Manejo del material ⁹ | 0,10 | 0,15 |
| Propiedades físicas | 0,15 | 0,16 |
| Propiedades químicas | 0,10 | 0,12 |
| Concentración de metales pesados | 0,10 | 0,12 |
| Propiedades de estabilidad | 0,10 | 0,00 |
| Contenido de microorganismos fitopatógenos | 0,05 | 0,00 |
| TOTAL | 1,00 | 1,00 |

El resultado de cada una de las propiedades químicas estudiadas, se contrastó con los niveles expuestos en la Tabla 3, dándole un valor de 1 cuando se encontraba dentro del rango óptimo y de 0 cuando estaba fuera de este rango. Se promedió el valor asignado

⁸ Se realizaron reuniones con técnicos del Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana - Ceniflores y algunos productores en CSS.

⁹ El manejo hace referencia a la facilidad del uso del material en campo, si se deben hacer adecuaciones del material, o se utiliza directamente como lo suministra el proveedor. Además, incluye la facilidad o dificultad de disposición del material en las camas de siembra, esto es, que tanto esfuerzo debe hacer el operario para colocar el material en las camas.

(1 o 0) de todas las propiedades químicas y este resultado se multiplicó por su ponderador (0,1 orgánico, 0,12 mineral - Tabla 4). Este mismo procedimiento se llevó a cabo para la concentración de metales pesados.

En cuanto al contenido de microorganismos fitopatógenos, se asignó un valor de 1, cuando el microorganismo se encontraba dentro de los niveles permitidos y de 0, cuando se determinó que el contenido del microorganismo supera estos niveles¹⁰. Se promedió el valor asignado (1 o 0) de todos los microorganismos estudiados y este resultado se multiplicó por su ponderador (0,05 - Tabla 4).

El costo de cada material se contrastó con el costo de la CA, y se definió su valor ponderado (VP), así:

$$VP = \frac{\$CA}{\$M} * 0,25$$

Dónde: \$CA es el costo de la cascarilla de arroz puesto en la sabana de Bogotá, \$M es el costo del material evaluado y 0,25, es el valor del ponderador definido para la variable costo (Tabla 4).

Para las variables manejo y disponibilidad del material se asignó una calificación subjetiva, donde 1 es de fácil manejo o muy disponible y 0 es de muy difícil manejo o muy poco disponible. Este valor se multiplicó por su ponderador (0,10 orgánico, 0,15 mineral para manejo y 0,10 orgánico, 0,15 mineral para disponibilidad - Tabla 4).

Al final, se sumaron todos los resultados de los valores ponderados para cada variable. Los materiales cuyos valores ponderados se acercaron más a 1 se definieron como los más promisorios.

¹⁰ Los niveles óptimos o rangos permitidos se suministraron por el laboratorio donde se llevaron a cabo los análisis microbiológicos.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Ubicación y adquisición de materiales



Figura 1. Materiales de origen orgánico. Donde a) coco astillas; b) coco fibra; c) coco sustrato; d) palma cascarilla; e) palma fibra; f) palma tusa prensada; g) madera viruta; h) madera aserrín e i) café cisco.

Los materiales y residuos que se incluyeron en la BMR debido a su viabilidad potencial para ser usados en CSS, se seleccionaron inicialmente con base en la disponibilidad y precio del material. Algunos materiales con potencial de uso en CSS, sin embargo, no se encontraron disponibles, debido a que eran utilizados para otros procesos (abonos, concentrados, etc.). Esto hizo que los materiales que presentaran estas restricciones, tales como residuos de la industria azucarera, algodonera y cacaoera, fueran descartados para la fase de caracterización.

Se obtuvieron 21 materiales, 11 de origen orgánico (Figura 1 y Tabla 5) y nueve materiales de origen mineral (Figura 2 y Tabla 5). Se puede apreciar que de una misma actividad pueden desprenderse dos o más residuos que podrían servir como sustrato, tal es el caso del cultivo de la palma de aceite (astillas, fibra y cascarilla), el cultivo del coco (astillas, fibra y sustrato) y procesos de obtención de madera (viruta y aserrín). A pesar de esto, se dividieron en diferentes materiales debido a que, aunque varios materiales

provengan del mismo proceso de producción, sus características visuales hacían prever que sus propiedades variarían substancialmente.

Tabla 5. Inventario de materiales recolectados para la selección de materiales.

| Material | Sigla | Origen | Actividad | Residuo | |
|--------------------------|-------|----------|---|--------------------------------|---|
| Arena | AR | Mineral | Yacimiento natural y explotación minera | Minerales | |
| Carbón escoria fina | ECf | | | Combustión de carbón | |
| Carbón escoria mixta | ECm | | | | |
| Cobre escoria | CuE | | | Altos hornos | |
| Ladrillo molido | LM | | | Obras civiles | |
| Perlita | PE | | | | |
| Piedra Pómez | PP | | | Minerales | |
| Vermiculita | VE | | | | |
| Zeolita | ZE | | | | |
| Arroz cascarilla quemada | CA | Orgánico | Agroindustria | Quemado de cascarilla de arroz | |
| Café cisco | CC | | | | |
| Coco astillas | AC | | | | |
| Coco fibra | FC | | | Mesocarpio del fruto de coco | |
| Coco sustrato fino | SCf | | | | |
| Coco sustrato grueso | SCg | | | | |
| Madera aserrín | AM | | | Explotación forestal | Industria maderera |
| Madera viruta | AV | | | | |
| Palma cascarilla | CP | | | | |
| Palma fibra | FP | | | Agroindustria | Mesocarpio del fruto de palma de aceite |
| Palma tuza prensada | TP | | | | |

2.4.2 Concentración total de nutrientes

Aunque en promedio los materiales tienen un pH que se encuentra dentro del rango adecuado (5,5 a 7) (Tabla 3), 7 de los 9 materiales de origen mineral (Tabla 6) y 5 de los 11 materiales de origen orgánico (Tabla 7) caracterizados presentan un pH por fuera de este rango. Llama la atención la tendencia alcalina de los sustratos cascarilla de arroz (CA) (10,15); piedra pómez (PP) (9,57), escoria de cobre (CuE) (9,15) y perlita (PE) (8,32), pues podrían generar limitantes en el proceso de absorción de elementos menores por parte de la planta (Marschner, 2012). En cuanto a la CA, los resultados concuerdan con lo reportado por Schmitz *et al.* (2002), quien afirma que el pH de este sustrato se encuentra por fuera del rango óptimo, no obstante, Quintero *et al.* (2012) encontraron que el pH de la CA mostraba una tendencia a la neutralidad. Esto puede deberse a que la CA tiene diferentes orígenes, lo que implica que sus características varíen de una fuente a otra.

De acuerdo con los valores de CE, solo dos materiales superan el rango óptimo (2 dS m^{-1}), el ladrillo molido (LM) (Tabla 7) y la tuza prensada de palma (TP) (Tabla 6) ($3,16$ y $2,63 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente), lo que indica que la mayoría de los materiales no posee una concentración de sales solubles que limite el crecimiento de las plantas. Como ya se

ha manejado con otros materiales, tales como el sustrato de coco, esta limitante puede corregirse haciendo abundantes lavados.



Figura 2. Materiales de origen mineral. Donde a) arena; b) cobre escoria; c) carbón escoria; d) perlita; e) piedra pómez; f) ladrillo molido; g) vermiculita y h) zeolita.

A excepción de la CA, todos los materiales orgánicos presentan un porcentaje de C adecuado, que concuerda con su alto contenido de materia orgánica (Tabla 6). Estos resultados coinciden con lo reportado por Schmitz *et al.* (2002) quien afirma que la CA tiene un bajo contenido de C orgánico (17%). Esta situación contrasta con la concentración de N de la CA, la cual se encuentra dentro del rango promedio de los materiales caracterizados. Los materiales cisco de café (CC), fibra de palma (FP) y TP, presentaron niveles relativamente altos de N total (0,6, 0,6 y 0,3%, respectivamente). La CA presentó la más alta concentración de P (0,45%). Al ser este N y P, totales, no están disponibles para las plantas, esta disponibilidad está asociada a las tasas de mineralización de N y P del sustrato.

Tabla 6. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen orgánico seleccionados.

| Material | pH | CE | C | N | P | K | Ca | Mg | Na |
|----------|-------|--------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | | dS m ⁻¹ | % | | | | | | |
| CA | 10,15 | 1,50 | 7,72 | 0,29 | 0,45 | 0,51 | 0,23 | 0,08 | |
| CC | 4,66 | 0,53 | 45,00 | 0,64 | 0,01 | 0,26 | 0,08 | 0,18 | 0,68 |
| AC | 6,66 | 0,94 | 45,61 | 0,30 | 0,02 | 0,72 | 0,12 | 0,11 | 7,54 |
| FC | 6,61 | 0,92 | 45,95 | 0,18 | 0,02 | 0,59 | 0,13 | 0,06 | 8,75 |
| SCf | 6,31 | 0,72 | 39,14 | 0,34 | 0,02 | 0,58 | 0,22 | 0,18 | 9,00 |
| SCg | 6,30 | 0,81 | 39,14 | 0,34 | 0,04 | 0,79 | 0,31 | 0,25 | 9,44 |
| AM | 5,43 | 0,77 | 44,85 | 0,30 | 0,01 | 0,22 | 0,21 | 0,05 | 0,70 |
| AV | 5,39 | 1,27 | 44,85 | 0,30 | 0,02 | 0,22 | 0,16 | 0,04 | 0,48 |
| CP | 4,77 | 1,50 | 45,41 | 0,39 | 0,01 | 0,20 | 0,05 | 0,04 | 0,17 |
| FP | 5,61 | 1,63 | 46,12 | 0,61 | 0,09 | 0,60 | 0,27 | 0,15 | 0,39 |
| TP | 6,92 | 2,63 | 45,01 | 0,53 | 0,09 | 1,42 | 0,18 | 0,10 | 0,75 |

Con respecto a la concentración total de K, Ca, Mg y Na, sobresale la alta concentración de Na de los materiales escoria de cobre (CuE) y piedra pómez (PP) (Tabla 7), no obstante, los materiales de origen mineral, sobre todo si son silicatos, tienen una muy baja solubilidad, por lo que no se espera que liberen fácilmente estos elementos a la solución del suelo, por el contrario, niveles altos de estos elementos en materiales de origen orgánico pueden llegar a ser más problemáticos, debido a su mayor solubilidad.

Tabla 7. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen mineral seleccionados

| Material | pH | CE | P | K | Ca | Mg | Na |
|----------|------|--------------------|------|-------|------|------|-------|
| | | dS m ⁻¹ | % | | | | |
| AR | 7,61 | 0,79 | 0,05 | 0,09 | 0,74 | 0,15 | 0,60 |
| ECf | 6,68 | 0,86 | 0,18 | 0,05 | 0,36 | 0,02 | 1,51 |
| ECm | 7,26 | 0,44 | 0,18 | 0,06 | 0,33 | 0,02 | 1,22 |
| CuE | 9,15 | 0,23 | 0,13 | 0,13 | 0,52 | 0,16 | 23,23 |
| LM | 7,29 | 3,16 | 0,01 | 0,20 | 0,12 | 0,02 | 4,42 |
| PE | 8,32 | 0,02 | 0,01 | 13,17 | 0,14 | 4,09 | 1,00 |
| PP | 9,57 | 0,71 | 0,01 | 0,12 | 0,11 | 0,09 | 11,54 |
| VE | 6,70 | 0,05 | 0,05 | 0,09 | 0,16 | 2,27 | |
| ZE | 8,11 | 0,09 | 0,01 | 0,15 | 1,32 | 0,30 | 19,21 |

Aunque tradicionalmente no se busca que un sustrato sirva de suministro de nutrientes para las plantas, al realizar programas de fertirriego es conveniente saber como afecta la concentración de estos nutrientes, tanto en fase soluble como intercambiable, el desarrollo de las plantas, además de que la concentración total de elementos podría alertar sobre posibles toxicidades. A ese respecto, sobresale la concentración de Zn de la CuE (27.994,7 mg Kg⁻¹) y de Fe de la vermiculita (VE) (23.968,8 mg Kg⁻¹) (Tabla 10). Como se muestra en la Tabla 3, el Zn puede considerarse como metal pesado, y llegar a ser tóxico cuando sobrepasa los 365 mg Kg⁻¹ para sustratos minerales. Es evidente que

la CuE supera con creces este rango, por lo que es necesario tener en cuenta su alta concentración.

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre los cationes totales e intercambiables presentes en los materiales seleccionados.

| | | TOTAL | | | | INTERCAMBIABLE | | | |
|----------------|----|-------|-------|----------|---------|----------------|----------|----------|----------|
| | | K | Ca | Mg | Na | K | Ca | Mg | Na |
| TOTAL | K | 1,00 | -0,17 | 0,99 *** | -0,18 | -0,13 | -0,15 | -0,16 | -0,14 |
| | Ca | | 1,00 | -0,09 | 0,51 ** | -0,32 * | 0,77 *** | -0,03 | 0,58 ** |
| | Mg | | | 1,00 | -0,12 | -0,18 | -0,08 | -0,19 | -0,10 |
| | Na | | | | 1,00 | 0,00 | 0,48 * | 0,08 | 0,62 ** |
| INTERCAMBIABLE | K | | | | | 1,00 | -0,05 | 0,85 *** | 0,29 |
| | Ca | | | | | | 1,00 | 0,25 | 0,87 *** |
| | Mg | | | | | | | 1,00 | 0,46 * |
| | Na | | | | | | | | 1,00 |

*** (P<0,01); ** (P<0,05); * (P<0,1).

Tabla 9. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen orgánico seleccionados.

| Material | Fe | Mn | Cu | Zn | B |
|----------|---------------------|-------|------|------|------|
| | mg kg ⁻¹ | | | | |
| CA | 486,5 | 331,4 | 6,9 | 28,9 | 6,3 |
| CC | 8674,3 | 163,2 | 4,1 | 66,3 | 8,0 |
| AC | 188,2 | 9,3 | 3,1 | 77,2 | 23,9 |
| FC | 236,9 | 10,6 | 6,4 | 17,9 | 1,6 |
| SCf | 2052,1 | 20,7 | 3,3 | 18,8 | 3,5 |
| SCg | 3726,3 | 23,1 | 3,4 | 14,7 | 18,6 |
| AM | 127,1 | 25,6 | 0,2 | 70,2 | 5,1 |
| AV | 60,3 | 18,9 | 3,4 | 39,4 | 3,5 |
| CP | 143,9 | 23,4 | 1,4 | 6,8 | 1,2 |
| FP | 513,4 | 129,0 | 7,9 | 24,4 | 1,9 |
| TP | 279,3 | 161,8 | 23,1 | 26,0 | 2,5 |

2.4.3 Caracterización de las propiedades de intercambio

A pesar de que los materiales CuE y PP presentan una alta concentración de Na total (23,2 y 11,5%, respectivamente) (Tabla 7), esta no corresponde con los niveles de Na⁺ intercambiabile (Tabla 12), pues se encuentran dentro del rango adecuado. La concentración total de un determinado elemento no refleja necesariamente su concentración en fase intercambiabile y/o soluble, es decir, su disponibilidad para ser

absorbida por las raíces de la planta. Sin embargo, para el caso del Na y el Ca, se observó una correlación altamente significativa entre su concentración total y en fase soluble (Tabla 8). Esto sugiere que la tasa de meteorización de estos cationes debe tenerse en cuenta, pues puede generar problemas de antagonismo con K y Mg.

Tabla 10. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen mineral seleccionados.

| Material | Fe | Mn | Cu | Zn | B |
|----------|---------------------|--------|--------|---------|------|
| | mg kg ⁻¹ | | | | |
| AR | 1803,7 | 182,0 | 5,6 | 48,0 | 9,8 |
| ECf | 2324,9 | 47,1 | 10,9 | 14,0 | 23,0 |
| ECm | 1426,0 | 32,7 | 8,9 | 12,0 | 12,6 |
| CuE | 2569,9 | 1871,1 | 2717,1 | 27994,7 | 58,3 |
| LM | 1408,5 | 223,6 | 2,0 | 9,5 | 5,2 |
| PE | 7284,9 | 137,4 | 5,3 | 41,2 | 6,3 |
| PP | 537,9 | 38,1 | 5,0 | 17,4 | 3,3 |
| VE | 23968,8 | 390,2 | 20,7 | 37,8 | 79,5 |
| ZE | 890,0 | 224,5 | 10,7 | 37,8 | 3,8 |

La capacidad de intercambio catiónico obtenida con acetato de amonio a pH 7 (CIC) osciló entre 1,7 (CuE) y 120,7 cmol_c Kg⁻¹ (SCg) (Tabla 11 y Tabla 12). Los valores son los esperados, con una CIC alta en los sustratos orgánicos, y una CIC baja en los sustratos minerales más inertes como la arena (AR) y las escorias de carbón (EC) y cobre (CuE). La CIC de la vermiculita (VE) y zeolita (ZE), silicatos cristalinos que presentan sustitución isomórfica, es la más alta de los sustratos minerales. De acuerdo con los niveles óptimos de CIC (Tabla 3), se puede afirmar que los materiales de origen mineral VE y ZE, y todos los materiales de origen orgánico, a excepción de la CA (7,05 cmol_c Kg⁻¹), presentan una buena capacidad para retener cationes. Al igual que en este estudio, Kroeff *et al.* (2004), reporta baja CIC en la cascarilla de arroz quemada (8,5 cmol_c Kg⁻¹), en contraste con Quintero *et al.* (2011), quienes hallaron valores entre 25,5 y 32,5 cmol_c Kg⁻¹. La baja CIC de la CA coincide con su baja concentración de carbono total (Tabla 6), la cual es una medida de la presencia de moléculas orgánicas, que a su vez son las que aportan la CIC.

Si se compara la CIC obtenida con acetato de amonio 1M, que es una solución tampón que modifica el pH al cual se hace la determinación, con la CIC efectiva (CICE) estimada por suma de cationes intercambiables, se observa que los valores son mucho más altos. En los sustratos orgánicos la CICE es mucho menor, con excepción de CA y CP. En estos materiales orgánicos, la CIC se genera a partir de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas, como la celulosa, hemicelulosa y lignina (Quintero *et al.*, 2011). La CICE se considera la CIC determinada al pH real del material, y las diferencias entre ambas medidas debe estar 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. La ZE, al contrario, muestra una CICE mucho más alta que la CIC obtenida con acetato de amonio, que podría indicar que se está solubilizando el Ca estructural del mineral, lo cual se refleja en el alto valor de Ca total y principalmente del intercambiable medidos, que indica que la CICE de la ZE esta siendo sobreestimada (Jaramillo, 2014). Cabe aclarar, que las

superficies de las partículas de los sustratos pueden llevar cargas permanentes y/o variables (Silber, 2008).

Tabla 11. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales orgánicos seleccionados.

| Material | CIC | CICE | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ |
|----------|------------------------------------|------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | |
| CA | 7,1 | 10,6 | 1,4 | 7,3 | 1,9 | 0,2 |
| CC | 25,0 | 14,6 | 4,5 | 6,9 | 3,0 | 0,1 |
| AC | 77,3 | 44,0 | 21,6 | 5,9 | 10,0 | 6,5 |
| FC | 42,4 | 31,2 | 14,3 | 6,2 | 4,5 | 6,3 |
| SCf | 74,7 | 40,4 | 13,0 | 9,7 | 11,2 | 6,5 |
| SCg | 120,7 | 48,1 | 14,3 | 12,4 | 13,8 | 7,5 |
| AM | 23,4 | 13,5 | 3,3 | 6,7 | 3,3 | 0,3 |
| AV | 36,8 | 14,1 | 4,0 | 6,7 | 3,2 | 0,2 |
| CP | 10,5 | 10,0 | 5,0 | 1,8 | 3,2 | 0,1 |
| FP | 57,8 | 35,5 | 17,5 | 4,6 | 13,3 | 0,2 |
| TP | 23,5 | 11,7 | 3,5 | 2,9 | 5,0 | 0,3 |

Tabla 12. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales minerales seleccionados.

| Material | CIC | CICE | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ |
|----------|------------------------------------|------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | |
| AR | 2,8 | 2,0 | 0,1 | 1,3 | 0,6 | 0,1 |
| ECf | 4,2 | 5,3 | 0,1 | 4,5 | 0,5 | 0,3 |
| ECm | 3,1 | 6,9 | 0,1 | 5,9 | 0,5 | 0,3 |
| CuE | 1,7 | 1,1 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| PE | 8,4 | 3,1 | 0,6 | 1,8 | 0,5 | 0,2 |
| PP | 6,2 | 8,4 | 0,5 | 4,4 | 0,6 | 3,0 |
| VE | 27,3 | 19,6 | 0,2 | 1,3 | 18,1 | 0,1 |
| ZE | 23,0 | 75,8 | 1,0 | 52,0 | 6,2 | 16,6 |

Los materiales provenientes del cultivo de coco presentaron la mayor concentración de K⁺ (Tabla 11). En cuanto al Ca²⁺, la ZE contenía la mayor concentración (Tabla 12), seguido del sustrato de coco grueso (SCg) (Tabla 11). La VE contiene la mayor concentración de Mg²⁺, seguido de SCg, fibra de palma (FP) y sustrato de coco fino (SCf). La ZE y los materiales provenientes del cultivo de coco tienen la mayor concentración de sodio (Na⁺), que se corrobora con lo expuesto por Jenagathan (1992). Los resultados presentados en la Tabla 11 y Tabla 12 sugieren que un número importante de materiales, tanto de origen mineral, como de origen orgánico, presentan una concentración de cationes intercambiables que debe tenerse en cuenta en programas de fertirriego. De igual forma, los materiales que cuentan con una CIC elevada (> 20 cmol_c Kg⁻¹) podrían generar condiciones adecuadas de adsorción de cationes en el mediano y largo plazo, lo cual es conveniente en el manejo integrado del riego y la fertilización (MIRFE), ya que nutrientes como K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y NH₄⁺ pueden permanecer en el complejo de cambio, para luego ser liberados a la solución del sustrato y así ser absorbidos por las plantas (Silber, 2008).

2.4.4 Concentración de metales pesados

El material escoria de cobre (CuE) tiene una concentración de Co y Pb que está por encima del rango permitido (Tabla 3), de igual forma, la vermiculita (VE) presenta una concentración de Cr por encima de este rango (Tabla 14). Moral *et al.* (1994) enuncia que metales como Cd puede generar antagonismos con el P, K⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ y Zn²⁺ cuando se encuentran en el complejo de cambio y/o en la solución del sustrato, lo que limita la absorción de estos nutrientes. De igual forma, altas concentraciones de metales pesados en la solución del sustrato pueden provocar la disminución del crecimiento de las plantas que se desarrollan en él (Sánchez *et al.*, 1999), debido a que algunos de estos metales tienen alta movilidad dentro de la planta, lo que limita la translocación de elementos esenciales (Marschner, 2012), ya que según Hall (2009), la toxicidad por metales pesados puede resultar de la unión de los metales a los grupos sulfidrilos de las proteínas, conduciendo a la inhibición de su actividad o la disrupción de su estructura, o del antagonismo de un elemento esencial, provocando su deficiencia.

Tabla 13. Concentración de metales pesados de cada material de origen orgánico recolectado.

| Material | Co | Pb | Cd | Cr | Hg | As | Se |
|----------|---------------------|------|-----|------|---------------------|------|------|
| | mg kg ⁻¹ | | | | µg kg ⁻¹ | | |
| CC | 0,0 | 2,1 | 0,0 | 4,2 | 0,5 | 3,1 | 0,01 |
| AC | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 2,1 | 11,0 | 5,2 | 0,01 |
| SCf | 0,5 | 12,6 | 0,4 | 5,9 | 34,9 | 46,8 | 0,02 |
| AM | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 2,1 | 11,0 | 5,2 | 0,01 |
| AV | 0,0 | 1,9 | 0,0 | 13,3 | 10,5 | 3,8 | 0,01 |
| CP | 0,4 | 1,2 | 0,1 | 48,3 | 9,3 | 10,0 | 0,01 |
| TP | 0,5 | 1,8 | 0,3 | 66,8 | 7,5 | 6,5 | 0,01 |

Tabla 14. Concentración de metales pesados de cada material de origen mineral recolectado.

| Material | Co | Pb | Cd | Cr | Hg | As | Se |
|----------|---------------------|--------|-----|-------|---------------------|-------|------|
| | mg kg ⁻¹ | | | | µg kg ⁻¹ | | |
| AR | 2,4 | 2,5 | 0,3 | 25,5 | 12,0 | 138,0 | 0,02 |
| ECf | 0,4 | 1,4 | 0,2 | 1,8 | 23,4 | 6,4 | 0,01 |
| ECm | 0,4 | 1,4 | 0,2 | 1,8 | 23,4 | 6,4 | 0,01 |
| CuE | 461,0 | 3870,0 | 2,0 | 163,0 | 24,5 | 1,8 | 0,01 |
| LM | 2,2 | 3,6 | 0,0 | 22,0 | 14,3 | 3,4 | 0,01 |
| PE | 0,8 | 10,1 | 0,0 | 2,4 | 28,0 | 4,2 | 0,01 |
| PP | 0,6 | 1,7 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 13,8 | 0,02 |
| VE | 36,5 | 1,9 | 0,0 | 728,0 | 7,6 | 2,2 | 0,02 |
| ZE | 1,2 | 3,0 | 0,0 | 3,1 | 45,2 | 45,9 | 0,01 |

La concentración de metales pesados que se muestran en la Tabla 13 y Tabla 14 es total, y no necesariamente se puede asociar con altos niveles de estos metales en el complejo de cambio o en la solución del sustrato. Sin embargo, se presume que aquellos materiales que tienen altas concentraciones de uno o varios metales pesados, presentarían un riesgo de liberar estos elementos al complejo de cambio, una vez entren en contacto con agua y con los exudados presentes en la rizósfera. Castaldi y Melis (2004) no encontraron diferencias significativas en cuanto a la concentración de Pb, Cd, Zn, Cr y Cu en los sustratos y el tejido vegetal, aun cuando los sustratos evaluados

contenían concentraciones iniciales variables (altas y bajas) de estos metales; aunque ninguno superaba los rangos reportados en la Tabla 3.

De acuerdo con los límites reportados en la Tabla 3, todos los materiales de origen orgánico presentan una concentración de metales pesados dentro del rango permitido, lo que los hace viables para ser usados en CSS (Tabla 13).

2.4.5 Propiedades físicas

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 15 y Tabla 16, los materiales que superarían el rango óptimo de densidad aparente (D_p) ($0,6 \text{ g cm}^{-3}$) son: CuE, ladrillo molido (LM), ZE y AR, con 1,22, 0,98, 0,79 y $0,65 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Como lo menciona Quintero *et al.* (2012), las diferencias en D_p son muy importantes para el diseño del contenedor, pues esta propiedad determinará las condiciones de resistencia mecánica en las estructuras de las camas de cultivo. Con base en esto, se podría afirmar que las camas de cultivo requerirán de soportes más resistentes si se desea utilizar estos materiales, sobre todo para el caso de la CuE y el LM (Tabla 16). De igual forma, el manejo de estos dos materiales requeriría un mayor esfuerzo por parte de los operarios de cultivo.

Tabla 15. Análisis físico de los materiales de origen orgánico recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.

| Material | D_p | D.Re | P.T | CRH (%) | | | Granulometría | | |
|----------|--------------------|------|------|----------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | g cm^{-3} | | % | 0,33 bar | 5 bar | 15 bar | > 8 mm | 2-8 mm | < 2 mm |
| CA | 0,12 | 2,02 | 94,1 | 33,81 | 30,84 | 27,80 | 0,60 | 75,50 | 23,90 |
| CC | 0,11 | 1,91 | 94,2 | 39,90 | 33,67 | 29,99 | 0,00 | 74,80 | 25,20 |
| AC | 0,10 | | | 216,36 | 189,74 | 127,11 | 78,20 | 19,30 | 2,50 |
| FC | 0,13 | | | 216,36 | 189,74 | 127,11 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| SCf | 0,11 | 1,23 | 91,1 | 372,31 | 332,78 | 314,08 | 2,20 | 11,00 | 86,80 |
| SCg | 0,10 | | | 283,46 | 282,69 | 244,15 | 8,20 | 18,10 | 73,70 |
| AM | 0,16 | 1,86 | 91,4 | 87,93 | 76,96 | 59,32 | 0,40 | 2,90 | 96,70 |
| AV | 0,15 | 1,55 | 90,3 | 119,85 | 102,84 | 105,56 | 74,10 | 23,40 | 2,50 |
| CP | 0,14 | 1,34 | 89,6 | 32,77 | 34,12 | 34,30 | 32,80 | 62,70 | 4,50 |
| FP | 0,21 | | | 150,64 | 117,14 | 70,33 | 69,30 | 14,00 | 16,70 |
| TP | 0,25 | 1,36 | 81,6 | 190,58 | 145,07 | 109,08 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |

Todos los materiales caracterizados presentan una alta porosidad total (P.T), > 60%, lo cual sugiere que las raíces de las plantas podrían crecer sin dificultad y tendrían las condiciones adecuadas para el suministro de agua y oxígeno. Sería necesario determinar la distribución del tamaño de los poros para corroborar esta hipótesis completamente, pues si estos son demasiado grandes, la porosidad estará principalmente ocupada por aire, pudiendo llegar a ser insuficiente la cantidad de agua retenida (Ansorena, 1994).

A excepción de CA, cisco de café (CC), cascarilla de palma (CP) y aserrín de madera (AM), la mayoría de los materiales de origen orgánico presenta una capacidad de retención de agua (CRH) mayor a 100% a 0,33 bar de presión (Tabla 15), lo cual indica una muy buena CRH. De los materiales de origen mineral, tan solo la VE presenta una

CRH mayor al 100% a 0,33 bares de presión (Tabla 16), que al igual que con los materiales orgánicos, concuerda con la relación PV utilizada para obtener su extracto de saturación (1:5). Las vermiculitas son arcillas expansivas (Velde y Meunier, 2008) que tienen la capacidad de hidratarse, lo cual les confiere una alta capacidad de retención de humedad (Jaramillo, 2014). En el otro extremo, los materiales de origen mineral, CuE, AR y ZE mostraron los valores más bajos de CRH, con 0,02, 2,5 y 7,5 % a 0,33 bares de presión (Tabla 16).

En cuanto a la granulometría, a excepción de fibra de palma (FP), viruta de madera (AV), astillas de coco (AC) y piedra pómez (PP), todos los materiales contenían tamaños de partícula menor a 8mm. De acuerdo con Ansorena (1994), los sustratos deben presentar una granulometría de 0,25 a 2,5 mm para ser utilizados en campo (Tabla 3). Cabe resaltar, que los materiales recolectados tienen la posibilidad de ajustar su granulometría por medio de procesos de molienda, y algunos como la PP, PE y ZE son suministrados por el proveedor con la granulometría deseada.

Tabla 16. Análisis físico de los materiales de origen mineral recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.

| Material | D_p | D.Re | P.T | CRH (ml 100g ⁻¹) | | | Granulometría | | |
|----------|--------------------|------|------|------------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | g cm ⁻³ | % | % | 0,33 bar | 5 bar | 15 bar | > 8 mm | 2-8 mm | < 2 mm |
| AR | 0,65 | 2,25 | 71,1 | 2,46 | 1,80 | 1,29 | 2,10 | 25,70 | 72,20 |
| ECf | 0,55 | 1,65 | 66,7 | 12,65 | 5,71 | 7,53 | 0,00 | 32,80 | 67,20 |
| ECm | 0,51 | | | 11,95 | 6,25 | 8,47 | 35,60 | 40,60 | 23,80 |
| CuE | 1,22 | 2,42 | 49,6 | 0,02 | 0,03 | 0,23 | 0,00 | 1,50 | 98,50 |
| LM | 0,98 | 2,68 | 63,4 | 19,22 | 16,78 | 11,59 | 33,80 | 48,30 | 17,90 |
| PE | 0,32 | 1,82 | 82,4 | 47,62 | 45,95 | 38,57 | 3,50 | 85,10 | 11,40 |
| PP | 0,31 | 1,91 | 83,8 | 75,18 | 60,45 | 50,42 | 52,10 | 38,70 | 9,20 |
| VE | 0,11 | 1,31 | 91,6 | 283,99 | 270,36 | 233,50 | 0,50 | 81,50 | 18,00 |
| ZE | 0,79 | 2,19 | 63,9 | 7,49 | 7,14 | 6,22 | 0,00 | 81,40 | 18,60 |

2.4.6 Propiedades de estabilidad

De acuerdo con el fin del sustrato, cultivo comercial o vivero, la estabilidad toma relevancia o es insignificante, puesto que por ejemplo, en procesos de plantulación los ciclos no tardan más de 30 días, mientras que cultivos como clavel tienen un ciclo de producción de dos años, tiempo en el cual se requiere que el sustrato no pierda sus propiedades. De acuerdo con esto, el productor en CSS definirá si las propiedades de estabilidad expuestas en este trabajo tienen relevancia para su sistema de producción.

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 CA (26,9) todos los materiales de origen orgánico presentan una relación C/N mayor a 40 (Tabla 17), que se definió como adecuada para sustratos de origen orgánico (Tabla 3), lo cual obedece principalmente a su alto contenido de C y bajo contenido de N (Tabla 6).

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 en el MIRFE (Noguera *et al.*, 2000). En todos los materiales orgánicos el C se encuentra en forma de celulosa y lignina¹¹ principalmente, y en menor porcentaje en forma de hemicelulosa (Tabla 17). Esta condición puede hacer que los materiales sean más resistentes a la degradación microbiana (Abad *et al.*, 2002).

Tabla 17. Propiedades de estabilidad de los materiales de origen orgánico recolectados.

| Material | C/N | Hemicelulosa | Celulosa | Lignina | SiO ₂ | Mat Seca |
|----------|-------|--------------|----------|---------|------------------|----------|
| | | % | | | | |
| CA | 26,9 | 32,1 | 38,4 | 23,2 | 26,9 | 85,2 |
| CC | 70,3 | 10,8 | 54,0 | 23,8 | 0,1 | 90,8 |
| AC | 152,0 | 3,7 | 61,1 | 26,2 | 14,1 | 36,4 |
| FC | 255,3 | 3,7 | 61,1 | 26,2 | 14,1 | 36,4 |
| SCf | 115,1 | 3,7 | 61,1 | 26,2 | 14,1 | 36,4 |
| SCg | 115,1 | 3,7 | 61,1 | 26,2 | 14,1 | 36,4 |
| AM | 149,5 | 1,2 | 56,8 | 28,6 | 5,1 | 78,3 |
| AV | 149,5 | 7,7 | 50,6 | 27,4 | 1,7 | 87,5 |
| CP | 116,4 | 11,7 | 33,1 | 51,0 | 2,0 | 86,6 |
| FP | 75,6 | 10,5 | 28,1 | 41,5 | 4,8 | 74,5 |
| TP | 84,9 | 6,1 | 47,1 | 23,0 | 2,3 | 64,1 |

La concentración de óxido de silicio (SiO₂) en la CA está por encima del 25% (Tabla 17), que concuerda con lo encontrado por Johar *et al* (2012) y Yalçin y Sevinç (2001). Este porcentaje de SiO₂ de la CA (26,9) supera en 48% al material más próximo, sustrato de coco fino (SCf) (14,1%). Cabe recordar, que es precisamente por el contenido de Si que se le atribuye a la cascarilla de arroz su gran resistencia a la degradación (Quintero *et al.*, 2006).

2.4.7 Propiedades microbiológicas

A excepción de la viruta de madera (AV) y el aserrín de madera (AM), todos los materiales de origen orgánico dieron negativo para hongos fitopatógenos. Estos dos materiales presentan 480 unidades formadoras de colonia (UFC) de *Fusarium Solani* por g del material (Tabla 18). En cuanto a la concentración de bacterias fitopatógenas, todos los materiales presentaron *Pseudomonas sp*, las cuales se encuentran comúnmente en materiales orgánicos. No hubo presencia de nematodos fitopatógenos, coliformes y *E Coli*.

Aunque la mayoría de los materiales de origen orgánico se encuentran libres de organismos fitopatógenos o contaminantes, es conveniente realizar su desinfección previa a su uso en campo, pues de acuerdo con su condición, es natural que pueda contaminarse.

¹¹ La lignina es un polisacárido altamente resistente a la degradación microbiana (Jaramillo, 2014)

Tabla 18. Análisis microbiológico de los materiales orgánicos.

| Material | Hongos | Bacterias | Nemátodos | Coliformes | E. Coli |
|----------|----------------------------|--|-----------------|---------------------|---------|
| | UFC g ⁻¹ | | géneros en 100g | NMP g ⁻¹ | |
| CC | (-) | 14 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| AC | (-) | 2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| FC | (-) | 2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| SCf | (-) | 2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| SCg | (-) | 2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| AM | 480 <i>Fusarium solani</i> | 49 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| AV | 480 <i>Fusarium solani</i> | 49 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| CP | (-) | 67 X 10 ³ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| FP | (-) | 4 X 10 ³ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |
| TP | (-) | 32 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i> | (-) | (-) | (-) |

(-) = Negativo

2.4.8 Costo, manejo y disponibilidad

De todos los materiales evaluados, el LM es el más económico, pues es fácil conseguirlo de obras civiles en construcción, simplemente se debe pagar el transporte. No obstante, hay que acondicionarlo a la granulometría adecuada, pues viene en diversos tamaños y es común que en el proceso de acondicionamiento se desintegre hasta convertirse en polvo, razón por la cual su manejo y disponibilidad son bajos (0,2 y 0,5/1,0) (Tabla 20).

Tabla 19. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen orgánico recolectados en la caracterización y selección de materiales.

| Material | Costo \$ * m ³ | Manejo | Disponibilidad |
|----------|------------------------------|--------|----------------|
| CA | 42.000 | 0,8 | 1,0 |
| CC | 90.000 | 0,9 | 0,2 |
| AC | 150.000 | 0,4 | 1,0 |
| FC | 150.000 | 0,3 | 1,0 |
| SCf | 150.000 | 0,9 | 1,0 |
| SCg | 150.000 | 0,9 | 1,0 |
| AM | 90.000 | 1,0 | 0,6 |
| AV | 90.000 | 1,0 | 0,6 |
| CP | 45.000 | 0,8 | 1,0 |
| FP | 70.000 | 0,4 | 1,0 |
| TP | 70.000 | 0,3 | 1,0 |

Fuente Costo: Proveedores de los materiales. Manejo y disponibilidad: Resultados del proceso de ponderación.

La ZE es el material más costoso (Tabla 20) y su manipulación en campo se complica debido a su alta D_p (Tabla 16). Los materiales AM y AV son los más fáciles de manejar (1,0/1,0) (Tabla 20), ya que: 1) son residuos a los que no se les debe realizar ningún proceso mecánico o físico para adecuarlos a su uso en campo y 2) su baja D_p permite manipularlos fácilmente (Tabla 15). Los materiales LM, CuE, FC y TP son los de más difícil manejo, debido a que son los que más adecuaciones requiere y/o su peso complica

su manipulación en campo. En cuanto a la disponibilidad, los materiales ECf, PE, PP, VE, ZE, CA, AC, FC, SCf, SCg, CP, FP y TP son los más disponibles (1,0/1,0), ya que se pueden obtener en grandes cantidades, desde sus lugares de origen. Por el contrario, los materiales CuE y CC (0,2/1,0) no cuentan con la disponibilidad suficiente para ser utilizados en grandes volúmenes (Tabla 19 y Tabla 20).

Tabla 20. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen mineral recolectados en la caracterización y selección de materiales.

| Material | Costo \$ * m ³ | Manejo | Disponibilidad |
|----------|------------------------------|--------|----------------|
| AR | 35.000 | 0,7 | 0,5 |
| ECf | 24.000 | 0,8 | 1,0 |
| ECm | 24.000 | 0,5 | 0,8 |
| CuE | 340.000 | 0,3 | 0,2 |
| LM | 20.000 | 0,2 | 0,5 |
| PE | 459.000 | 0,9 | 1,0 |
| PP | 449.000 | 0,9 | 1,0 |
| VE | 176.000 | 0,9 | 1,0 |
| ZE | 1.500.000 | 0,8 | 1,0 |

Fuente Costo: Proveedores de los materiales. Manejo y disponibilidad: Resultados del proceso de ponderación.

2.4.9 Priorización de materiales a partir de la BMR

2.4.9.1 Priorización de materiales de origen orgánico

Los materiales de origen orgánico sustrato de coco fino (SCf), sustrato de coco grueso (SCg), fibra de palma (FP), astillas de coco (AC) y fibra de coco (FC) obtuvieron la máxima puntuación (0,1/0,1) (Figura 3) de acuerdo con sus propiedades químicas (Tabla 6 y Tabla 11). Con respecto al mismo parámetro, los materiales que obtuvieron la menor puntuación fueron: cisco de café (CC) y cascarilla de palma (CP), con 0,03 y 0,05/0,1 puntos, respectivamente. Con respecto a la concentración de metales pesados (Tabla 13), todos los materiales de origen orgánico tuvieron una puntuación mayor o igual a 0,09/0,1. De acuerdo con las propiedades de estabilidad (Tabla 17), la CA obtuvo la mayor puntuación (0,08/0,1), debido a su alto contenido de lignina y SiO₂; CP obtuvo la segunda puntuación (0,07/0,1), debido a su alto contenido de lignina y materia seca; la tuza prensada de palma (TP) obtuvo la menor calificación (0,04/0,1) por su bajo contenido de SiO₂. A excepción de los materiales aserrín de madera (AM) y aserrín de viruta (AV) (0,04/0,05), todos obtuvieron una calificación de 0,05/0,05 en sus contenidos de microorganismos fitopatógenos, esto debido a que tanto AM como AV dieron positivo para presencia de *Fusarium solani* (Tabla 18). De acuerdo con su baja densidad aparente, alta capacidad de retención de humedad y adecuada granulometría, todos los materiales obtenidos a partir de la producción de coco mostraron las mejores propiedades físicas (Tabla 15), así: SCf (0,15/0,15); SCg (0,13/0,15); AC y FC (0,12/0,15); los materiales CC, CP y AC presentaron la menor calificación (0,08/0,15), debido a su baja capacidad de retención de humedad. Según el costo (Tabla 19), los materiales de origen orgánico con la mejor puntuación son CA (0,12/0,25) y CP

(0,11/0,25); los que presentaron la menor puntuación fueron los provenientes del cultivo de coco, AC, FC, SCf y SCg, con 0,03/0,25 puntos. Los materiales AM y AV presentaron la mejor puntuación para la variable manejo (Tabla 19), con 0,1/0,1 puntos; los materiales FC y TP presentaron el puntaje más bajo, con 0,03/0,1. Cabe recordar, que este manejo tiene que ver con la adecuación que se le debe dar al material previo a su ubicación en las camas de siembra y la facilidad de manipulación para esta ubicación. Los materiales AM y AV vienen listos para ser ubicados en las camas, y dadas sus características son de fácil manipulación. Con respecto a la disponibilidad (Tabla 19), los materiales AC, CP, SCf, AM y AV presentaron la mejor puntuación (0,15/0,15). El material CC es el menos disponible (0,2/0,15). Es conveniente aclarar, que esta disponibilidad hace referencia no solo a que el material exista, si no que se encuentre en las cantidades que requiere el mercado. De acuerdo con su puntuación total, los mejores materiales son: sustrato de coco, cascarilla de palma y cascarilla de arroz (Figura 3).

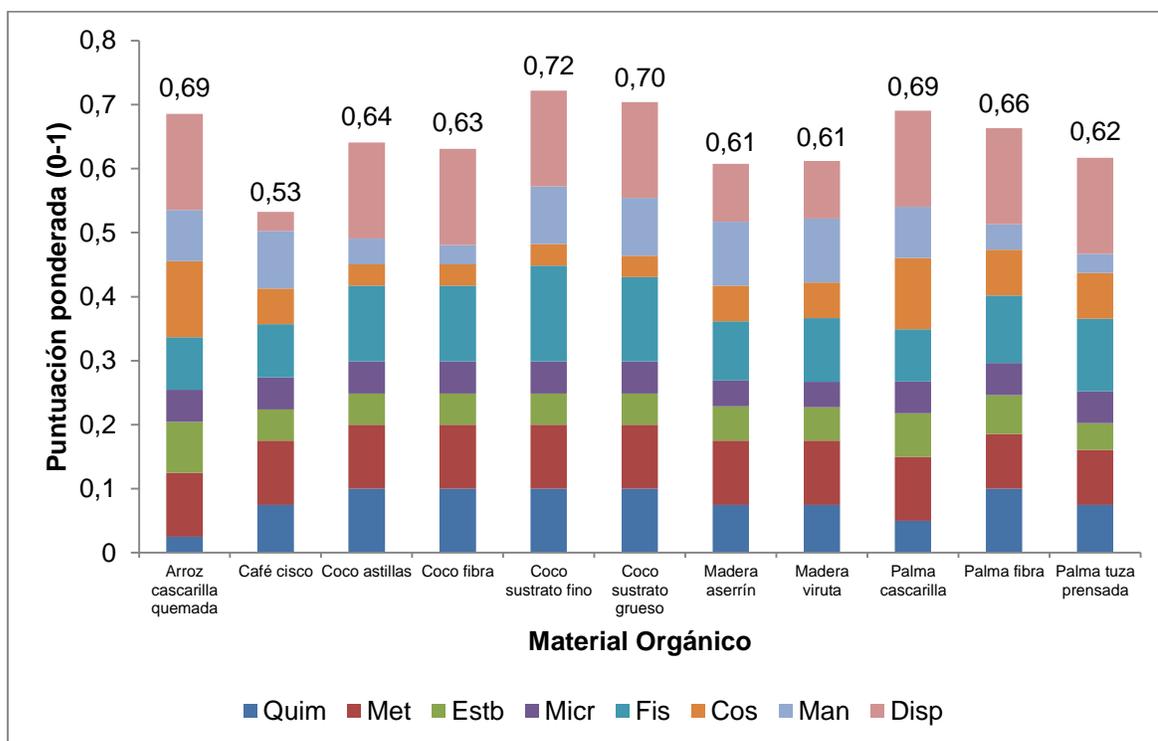


Figura 3. Resultados de la calificación de cada material de origen orgánico caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Estb = Propiedades de estabilidad; Micr = Propiedades microbiológicas; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.

2.4.9.1 Priorización de materiales de origen mineral

De acuerdo con sus propiedades químicas (Tabla 6 y Tabla 11), los materiales de origen mineral escoria de carbón fino (ECf) y zeolita (ZE) obtuvieron la mejor puntuación (0,08/0,12) (Figura 4). Con respecto al mismo parámetro, el material que obtuvo la menor puntuación fue el ladrillo molido (LM), con 0,001/0,12 puntos. Con respecto a la

concentración de metales pesados (Tabla 13), a excepción de vermiculita (VE) (0,10/0,12) y escoria de cobre (CuE) (0,09/0,12) quienes presentaron altas concentraciones de Cr, y Co y Pb, respectivamente, todos los demás materiales obtuvieron la máxima puntuación (0,12/0,12), lo que indica que su concentración de metales pesados se encontraba dentro del rango adecuado (Tabla 3 y Tabla 13).

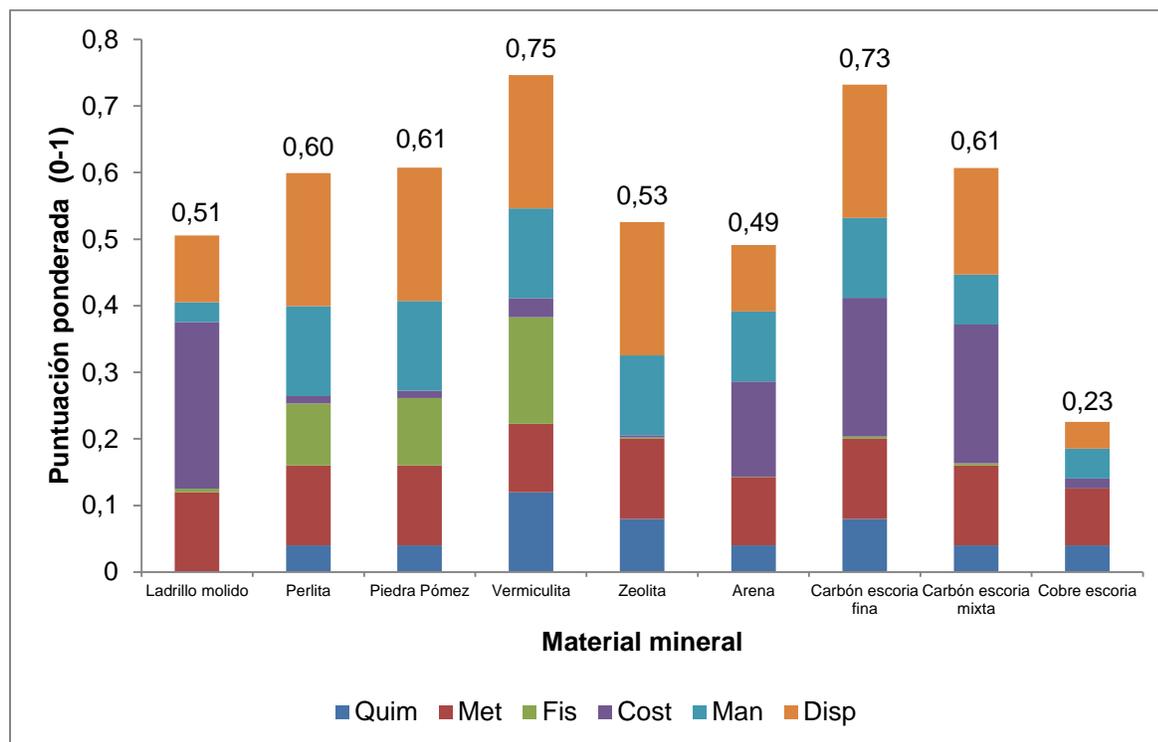


Figura 4. Resultados de la calificación de cada material de origen mineral caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.

De acuerdo con su baja densidad aparente, alta capacidad de retención de humedad y adecuada granulometría (Tabla 15), la VE obtuvo la mejor puntuación (0,16/0,16) para propiedades físicas; los materiales ZE, arena (AR) y CuE presentaron la menor calificación (0,00/0,16), debido a su alta densidad aparente y baja capacidad de retención de humedad. Según el costo (Tabla 19), los materiales con la mejor puntuación son ladrillo molido (LM) (0,25/0,25), ECf y escoria de carbón mixto (ECm) (0,21/0,25). Con respecto a esta variable, la ZE presentó la menor puntuación (0,00/0,25).

Los materiales VE, PP y PE presentaron la mejor puntuación para la variable manejo (Tabla 19), con 0,14/0,15 puntos; el material LM presentó el puntaje más bajo, con 0,03/0,15. Los materiales VE, PP y PE vienen listos para ubicar en las camas, y dadas sus características son de fácil manipulación. Con respecto a la disponibilidad (Tabla 19), los materiales ECf, PE, PP, VE y ZE presentaron la máxima puntuación (0,20/0,20). El material CuE es el menos disponible (0,04/0,20). De acuerdo con su puntuación total, los mejores materiales son: VE, EC, PP, PE y ZE (Figura 4).

2.1 Conclusiones

Existe un número considerable de materiales cuyas propiedades los harían promisorios para ser implementados en sistemas de cultivo sin suelo en Colombia, es así como se obtuvieron 21 materiales, 11 de origen orgánico y nueve de origen mineral. Y dadas sus características químicas, físicas, de estabilidad, microbiológicas, gran disponibilidad y bajo costo, se concluye que los materiales de origen orgánico, sustrato de coco y cascarilla de palma, y de origen mineral: escoria de carbón, piedra pómez, perlita, vermiculita y zeolita tienen un gran potencial para complementar o reemplazar el uso de cascarilla de arroz. Esto concuerda con la tendencia mundial, donde, a excepción de la cascarilla de palma y la escoria de carbón, todos los materiales son ampliamente utilizados como medio de cultivo.

3. Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales

3.1 Resumen

Se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75, sobre las propiedades químicas pH, CE y CIC, la concentración de iones en fase soluble: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y fase intercambiable: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y la concentración de micronutrientes disponibles: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} , tanto en estado natural, sin contacto con raíces, agua o nutrientes externos y en fase de cultivo (muestreos a los 7 y 24 ddt) mediante la propagación de esquejes de clavel, para lo cual se evaluó la ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz). Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3) + 8$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Los resultados muestran que la concentración de sales disminuye y la reacción del sustrato se hace más ácida cuando estos se comparan en estado natural con su estado en fase de cultivo. Así mismo, el SC y la VE mostraron la mayor CIC, que concuerda con el mayor Pf.Raíz. No se aprecian diferencias significativas entre los 7 y los 24 ddt, aunque sí se aprecian diferencias entre la fase cultivo y la fase en estado natural, concerniente principalmente a la reducción de la concentración de iones en estado soluble e intercambiable. Los sustratos presentan actividad química que debe tenerse en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización.

Palabras Clave: Actividad química, adsorción, desorción, acidez, salinidad.

3.2 Introducción

Los estudios sobre las propiedades químicas de los sustratos están orientados a conocer la concentración de elementos nutrientes, a verificar si el sustrato contiene altas concentraciones de elementos que puedan ser perjudiciales para la planta (por ejemplo Na) y a determinar la concentración de metales pesados (Block *et al.*, 2008). Generalmente estos estudios son establecidos previamente a su uso para crecimiento de plantas, por lo tanto se abordan fases sólidas, homogéneas, sin alterar (Tabla 3). No obstante, a través del periodo de crecimiento de las plantas, componentes orgánicos son secretados desde las plantas o como resultado de los procesos de descomposición acumulada (Tate y Theng, 1980; Huang y Violante, 1986; Tan, 1986; Silver y Raviv,

1996). Es así, como las superficies de los nuevos sólidos formados se vuelven heterogéneas y las propiedades químicas de la mezcla pueden ser significativamente diferentes de aquellas encontradas en la caracterización del material individual (Silver y Raviv, 1996).

Las propiedades químicas del sustrato ideal propuesto por Abad *et al.*, (2001) corresponden a: pH = 5,2 – 6,3; conductividad eléctrica: 0,75 – 3,49 dS m⁻¹=; materia orgánica: > 80%; nitrato: 100 – 199 mg L⁻¹; potasio: 150 – 249 mg L⁻¹; sodio: =< 115 mg L⁻¹; cloro: =< 180 mg L⁻¹ y sulfato: =< 960 mg L⁻¹.

El objetivo del presente capítulo es caracterizar la fase soluble e intercambiable de los materiales de origen orgánico: sustrato de coco (SC), cascarilla de palma (CP) y cascarilla de arroz (CA), y de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), priorizados a partir de los resultados del capítulo dos, mezclados en diferentes proporciones orgánico-mineral.

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Localización y material vegetal

La investigación se estableció en las instalaciones de la empresa Flores Aurora SAS, ubicada en el municipio de Suesca (Cundinamarca), en las coordenadas 05°03'740' latitud norte y 73°,50'201 longitud este, con una altura de 2.584 msnm y una temperatura promedio de 14°C. El experimento se estableció en un invernadero tipo capilla, que se adaptó para que permaneciera como cámara húmeda, manteniendo unas condiciones internas de humedad relativa (HR) mayores al 80 % y una temperatura promedio de 30°C.

Se utilizaron esquejes de clavel (*Dianthus caryophyllus*), variedad Pomodoro, evaluados durante un ciclo de enraizamiento (24 días). Se escogió esta especie y en esta etapa del proceso de producción, debido a su afinidad con la producción en CSS, a su rápido ciclo de producción y al hecho de que en esta etapa no se aplican fertilizantes. De este modo, se puede conocer la facilidad de enraizamiento de los esquejes, sembrados en un amplio rango de materiales y mezclas; y el comportamiento de las mezclas en un sistema sustrato planta.

3.1.2 Diseño experimental y de tratamientos

3.1.2.1 Caracterización de sustratos en crudo

La primera fase del experimento consistió en la evaluación química de los sustratos, previa a su implementación en campo (con plantas). En esta fase inicial se estableció un diseño experimental sin repeticiones, denominado *screening* o barrido, debido a que en esta fase los sustratos no tuvieron contacto con agua, con raíces de plantas, o con soluciones fertilizantes, que puedan alterar significativamente sus propiedades y composición química. Cada tratamiento fue definido como una mezcla entre un material

de origen orgánico (MO) y un material de origen mineral (MM) así: MO: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) o sustrato de coco (SC) mezclado con un MM: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) o zeolita (ZE). Cada combinación se evaluó en tres proporciones (MO:MM): 75:25; 50:50 y 25:75. También se estudió la proporción 100:0 y 0:100. Las mezclas resultantes en adelante se denominarán “sustratos”.

3.1.2.2 Caracterización de sustratos en cultivo



Figura 5. Evaluación de la propagación de esquejes de clavel var. Pomodoro en condiciones de invernadero, en los diferentes sustratos evaluados.

Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado (3X5X(3)+8), con tres factores: factor 1 – (MO), con 3 niveles (CA, CP y SC); factor 2 – (MM); con 5 niveles (EC, PE, PP, VE y ZE) y factor 3 – (proporción, anidado); con 3 niveles (75:25, 50:50, 25:75; %); y 8 materiales (grupo control aislado) sin mezcla (los 3 MO + los 5 MM al 100%) para un total de 53 tratamientos (sustratos) y 159 unidades experimentales (UE) (tres réplicas por tratamiento). Cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel (Figura 5).

3.1.3 Variables estudiadas

3.1.3.1 Variables asociadas a la respuesta del sustrato

En fase soluble: CE (Conductividad Eléctrica) por el método conductimétrico – lectura a 25 °C; pH por el método potenciométrico; PO₄³⁻ (fosfatos) con el método de cloruro

estañoso y valoración colorimétrica; SO_4^{2-} (sulfatos) con el método de cloruro de bario y valoración colorimétrica; Cl^- (cloruros) con titulación con AgNO_3 ; y K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ con espectrofotometría de absorción atómica.

En fase intercambiable: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ intercambiables, por el método del Acetato de NH_4 1M pH 7, realizando la valoración por espectrofotometría de absorción atómica; la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) se determinó en el residuo del sustrato haciendo desplazamiento del NH_4^+ intercambiado con NaCl , con valoración volumétrica.

Micronutrientes disponibles (fase soluble e intercambiable): La extracción de Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} con DTPA y valoración por espectrofotometría de absorción atómica, se efectuó para evaluar además de las formas solubles e intercambiables de Fe^{2+} , aquellas presentes en complejos orgánicos e inorgánicos.

3.1.3.1 Variables asociadas a la respuesta de la planta

Porcentaje de prendimiento, retirando mecánicamente 10 esquejes de cada UE y determinando cuantos generaron raíces y se anclaron satisfactoriamente al sustrato. Cada esqueje anclado representaba el 10%. Al final se sumó el porcentaje de los esquejes anclados.

Peso fresco de raíz (Pf. Raíz), pesando las raíces inmediatamente después de extraídos los esquejes de los bancos de enraizamiento. Se debe tener en cuenta, que según los productores de este material vegetal, el principal indicador de un buen esqueje es su generación de raíces.

3.1.4 Análisis de datos

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

3.2 Resultados y Discusión

3.2.1 Mezclas de sustratos en su estado natural

Las mezclas de sustratos en su estado natural, es decir sin contacto con raíces de plantas, agua, y/o nutrientes fertilizantes presentan una CE dentro del rango óptimo, según los referentes presentados en la Tabla 3, no obstante, el pH de todas las mezclas cuyo componente orgánico es la cascarilla de arroz (CA) supera este rango (7), lo que podría generar una reacción alcalina en la solución del sustrato.

Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables en fase soluble e intercambiable evaluadas (n = 318).

| | | FASE SOLUBLE | | | | | FASE INTERCAMBIABLE | | | | | DISPONIBLES | | | | |
|----------------|-----------------|--------------|---------|--------|----------|-----------------|---------------------|----------|-------|----------|----------|-------------|---------|----------|---------|--------|
| | | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ | CIC | Ca | K | Mg | Na | Cu | Fe | Mn | Zn |
| SOLUBLE | Pf. Raíz | -0,09 | -0,10 | 0,36 * | 0,26 | 0,28 | -0,19 | 0,35 * | 0,04 | 0,01 | 0,25 | 0,03 | 0,19 | 0,04 | 0,11 | 0,05 |
| | CE | 0,64 *** | 0,54 ** | 0,49 * | 0,54 ** | 0,10 | 0,44 * | 0,31 * | -0,35 | 0,20 | 0,31 * | -0,35 * | 0,17 | 0,11 | 0,48 * | 0,34 * |
| | pH | 0,36 * | 0,14 | 0,15 | 0,32 * | -0,08 | 0,45 * | 0,20 | 0,05 | -0,41 * | 0,20 | -0,07 | 0,09 | -0,20 | 0,45 * | 0,29 |
| | Ca | 0,02 | 0,27 | -0,11 | -0,06 | -0,05 | 0,17 | -0,43 * | -0,13 | -0,07 | -0,18 | -0,08 | 0,16 | 0,06 | -0,04 | 0,13 |
| | K | 1,00 | 0,54 ** | 0,35 * | 0,42 * | 0,04 | 0,82 *** | 0,15 | -0,28 | 0,34 * | 0,21 | -0,30 * | 0,05 | 0,00 | 0,59 ** | 0,43 * |
| | Mg | | 1,00 | 0,45 * | 0,56 ** | 0,01 | 0,43 * | 0,17 | -0,23 | 0,07 | 0,53 ** | -0,23 | 0,09 | 0,09 | 0,56 ** | 0,18 |
| | Na | | | 1,00 | 0,88 *** | 0,45 | 0,06 | 0,76 *** | -0,22 | 0,11 | 0,72 *** | -0,19 | -0,31 * | 0,45 * | 0,65 ** | 0,34 * |
| | Cl | | | | 1,00 | 0,34 | 0,13 | 0,72 *** | -0,23 | 0,14 | 0,75 *** | -0,22 | 0,26 | 0,32 * | 0,69 ** | 0,31 * |
| | SO ₄ | | | | | 1,00 | -0,15 | 0,32 * | -0,13 | -0,06 | 0,21 | -0,13 | -0,33 * | 0,43 * | 0,18 | 0,30 * |
| | PO ₄ | | | | | | 1,00 | -0,10 | -0,08 | 0,38 * | 0,05 | -0,13 | -0,04 | -0,16 | 0,47 | 0,37 * |
| INTERCAMBIABLE | CIC | | | | | | 1,00 | 0,00 | 0,23 | 0,73 *** | -0,01 | 0,12 | 0,37 * | 0,52 ** | 0,24 | |
| | Ca | | | | | | | 1,00 | 0,16 | -0,01 | 0,93 *** | -0,23 | -0,20 | -0,09 | -0,27 | |
| | K | | | | | | | | 1,00 | 0,09 | 0,18 | -0,15 | -0,13 | 0,30 | 0,22 | |
| | Mg | | | | | | | | | 1,00 | -0,03 | 0,11 | 0,35 * | 0,71 *** | 0,07 | |
| | Na | | | | | | | | | | 1,00 | -0,24 | -0,20 | -0,13 | -0,29 | |
| DISPONIBLE | Cu | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,32 * | 0,24 | 0,68 ** | |
| | Fe | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,21 | 0,31 * | |
| | Mn | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,49 * | |
| | Zn | | | | | | | | | | | | | | 1,00 | |

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 " ".

La concentración de nutrientes en fase soluble mostró alta variabilidad, dependiendo de los constituyentes de la mezcla. Las mezclas cuyo componente mineral es la escoria de carbón (EC) presentan las concentraciones más altas de Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ y SO₄²⁻ solubles, mientras que aquellas con perlita (PE) contienen las mayores concentraciones de Na⁺, los sustratos con piedra pómez (PP) tienen las mayores concentraciones de Cl⁻ y los sustratos con CA las mayores concentraciones de PO₄³⁻ (Tabla 35).

En cuanto a la fase intercambiable, las mezclas cuyo componente mineral es la vermiculita (VE) presentaron la mayor CIC, así como aquellas cuyo componente orgánico es el sustrato de coco (SC). Las mezclas con zeolita (ZE) presentaron la mayor concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , pero no se aprecia una tendencia clara en cuanto a la concentración de K^+ .

Con respecto a los micronutrientes, las mezclas con EC presentaron la mayor concentración de Cu^{2+} , de igual forma, las mezclas con EC y VE presentaron la mayor concentración de Fe^{2+} , mientras que las mezclas con CA contienen la mayor concentración de Mn^{2+} y para el Zn^{2+} no se evidencia una tendencia clara (Tabla 35).

3.2.2 Respuesta de la planta

Cuando se estudia el comportamiento de los sustratos en contacto con agua y las raíces de las plantas se aprecia que entre la mayoría de las variables evaluadas las correlaciones son débiles (Tabla 21). El peso fresco de raíz (Pf.Raíz) no es explicado de manera satisfactoria por ninguna de las variables medidas en el sustrato (Tabla 21 y Figura 6). De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP), no se define un componente principal (CPn) que agrupe la mayor cantidad de variables, solo hasta el CP4 se obtuvo el 70% de la variabilidad de los datos (Tabla 22) y la única agrupación clara esta entre las variables Na^+ y Ca^{2+} en fase intercambiable.

Aunque la variable Pf.Raíz no se asocia claramente con una o un grupo de variables específicamente (Figura 6), de acuerdo con el análisis de varianza multivariado (Manova), se pudo evidenciar que existe un efecto multivariante sobre los sustratos evaluados, este efecto se presentó tanto para los factores, como para sus interacciones. (Tabla 23). Es así, como se procedió a determinar cuál de las variables presentaban diferencias significativas mediante pruebas univariantes (Anexo 1).

Tabla 22. Componentes (CP), escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 19 se alcanzó el 71% de la variabilidad de los datos.

| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Desviación estándar | 2,4870 | 1,7574 | 1,6268 | 1,2497 |
| Proporción de varianza | 0,3255 | 0,1626 | 0,1393 | 0,0822 |
| Proporción acumulada | 0,3255 | 0,4881 | 0,6274 | 0,7096 |

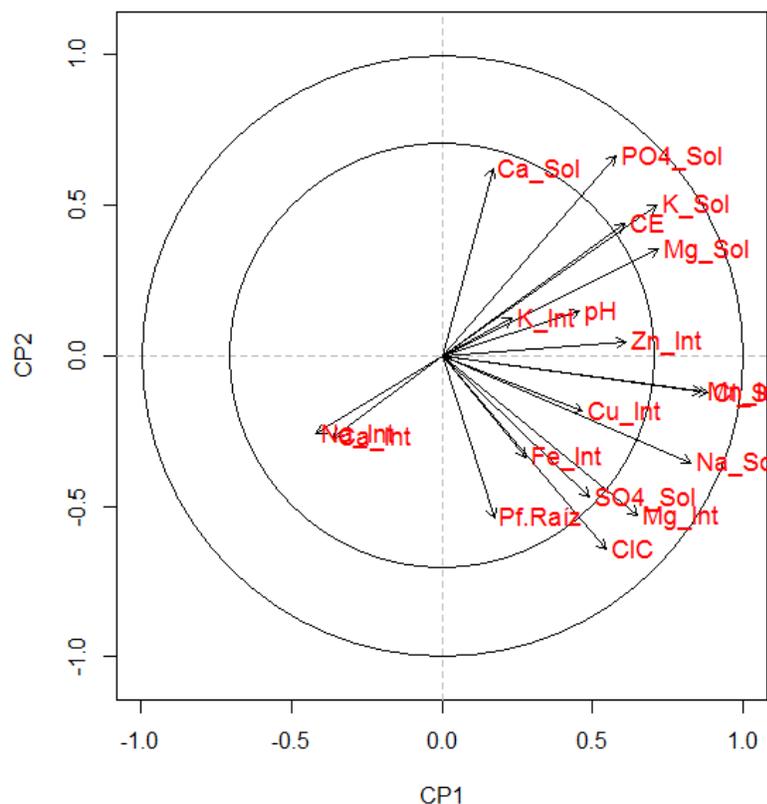


Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).

Tabla 23. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (*****) <math><0,0001</math>).

| Factor | ddt | Df | Wilks | approx F | num Df | den Df | Pr(>F) | |
|---------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|------------|---------------|-----------------|------------|
| Orgánico | 7 | 2 | 0,00022 | 249,764 | 38 | 144,0 | 2,20E-16 | *** |
| Mineral | 7 | 4 | 0,00000 | 83,969 | 76 | 286,0 | 2,20E-16 | *** |
| Proporción | 7 | 2 | 0,04901 | 13,329 | 38 | 144 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min | 7 | 8 | 0,00000 | 42,533 | 152 | 547,96 | 2,20E-16 | *** |
| Org(Prop) | 7 | 4 | 0,00332 | 12,259 | 76 | 286 | 2,20E-16 | *** |
| Min(Prop) | 7 | 8 | 0,00005 | 10,306 | 152 | 547,96 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min:Prop | 7 | 16 | 0,00000 | 7,672 | 304 | 930,36 | 2,20E-16 | *** |
| Residuales | 7 | 90 | | | | | | |
| Orgánico | 24 | 2 | 0,00024 | 239,393 | 38 | 144,0 | 2,20E-16 | *** |
| Mineral | 24 | 4 | 0,00000 | 185,126 | 76 | 286,0 | 2,20E-16 | *** |
| Proporción | 24 | 2 | 0,02000 | 23,004 | 38 | 144 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min | 24 | 8 | 0,00000 | 36,944 | 152 | 547,96 | 2,20E-16 | *** |
| Org(Prop) | 24 | 4 | 0,00346 | 12,101 | 76 | 286 | 2,20E-16 | *** |
| Min(Prop) | 24 | 8 | 0,00005 | 10,023 | 152 | 547,96 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min:Prop | 24 | 16 | 0,00001 | 4,714 | 304 | 930,36 | 2,20E-16 | *** |
| Residuales | 24 | 90 | | | | | | |

3.2.3 Conductividad eléctrica

La CE no mostró diferencias significativas para el factor “material de origen orgánico” (CA, CP y SC) a los siete días del ciclo de enraizamiento (Figura 7), pues estuvo dentro del rango óptimo (Tabla 3), similar a lo ocurrido en su estado natural (sin contacto con raíces, agua y/o soluciones nutritivas) (Tabla 35). A los 24 ddt la CE mantiene la tendencia mostrada a los 7 ddt (Figura 7), en donde los tres sustratos orgánicos tienen una CE dentro del rango óptimo (Tabla 3), no obstante, la CA presentó diferencias significativas, pues se incrementó su CE con respecto a la CP y al SC, aunque no en un nivel que suponga un efecto nocivo para el desarrollo de las plantas (Figura 7).

En cuanto al factor “material de origen mineral” (EC, PE, PP, VE y ZE), a los 7 ddt (Figura 7) todos los sustratos tienen una CE dentro del rango adecuado (Tabla 3). Cuando se comparan los resultados a los 7 ddt con los obtenidos a los 24 ddt (Figura 7), se puede evidenciar que la CE se mantiene dentro del rango óptimo (Tabla 3), aunque, a excepción de la VE y la ZE, todos tienden a incrementarse, pero no de forma significativa (Figura 7).

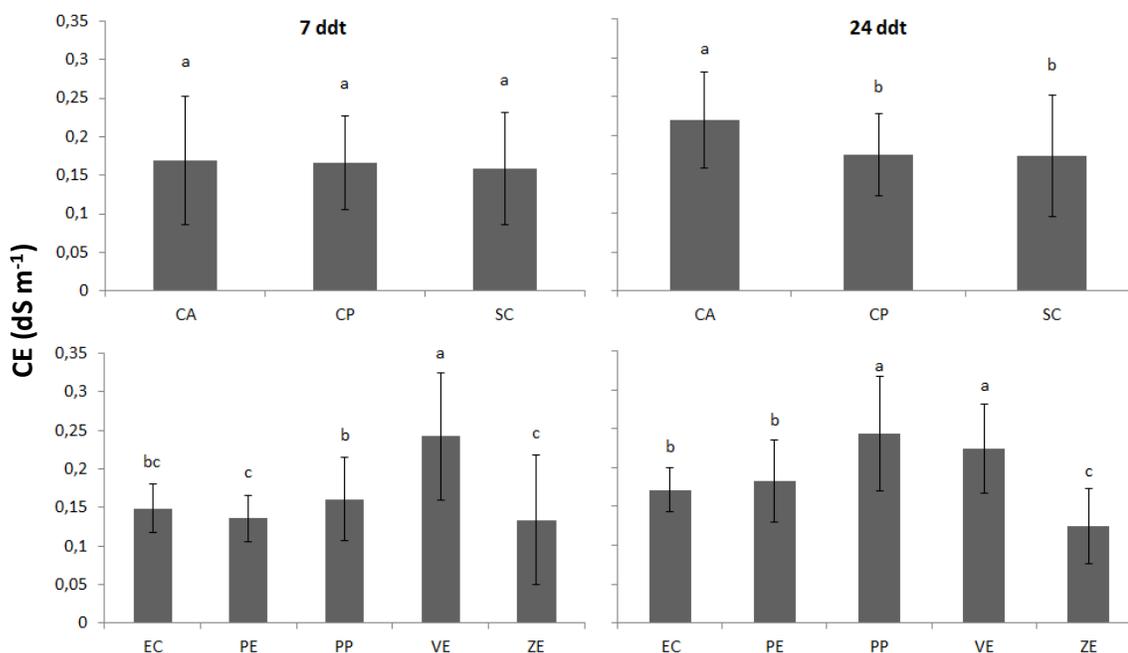


Figura 7. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$; $n=15$ ¹²).

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que estas tienen una CE dentro del rango adecuado (Tabla 3). A los 24 ddt la CE

¹² Cada barra muestra el promedio de 15 observaciones, debido a que cada sustrato de origen orgánico se mezcló con cinco materiales de origen mineral con tres repeticiones por mezcla.

de todas las mezclas se sigue manteniendo dentro de este rango (Tabla 3), no obstante, si se comparan estos resultados con lo mostrado por las mezclas al natural (Tabla 35), se evidencian cambios, pues en este estado, en promedio la CE se encontraba en $0,34 \text{ dS m}^{-1}$, mientras que a los 24 ddt fue de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, lo que indica una disminución en el contenido de sales como respuesta a procesos de lixiviación y de absorción por parte de las raíces de la planta. En cuanto a las mezclas sin tener en cuenta el factor “proporción”, a los 24 ddt (Tabla 41) no se aprecian cambios substanciales con respecto a lo ocurrido a los 7 ddt (Tabla 40), pues los sustratos que tuvieron la mayor o menor CE se mantuvieron a lo largo del tiempo.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de CA genera un aumento en la CE, a medida que su contenido se incrementa dentro de la mezcla, tanto a los 7 (Figura 8-a) como a los 24 ddt (Figura 8-d), lo mismo ocurre con las mezclas que contienen SC (Figura 8-b, e). La CE de los sustratos que contienen CP no muestra una tendencia tan clara a aumentar (Figura 8-c, f), como aquellos mezclados con CA o SC, lo cual concuerda con la baja CE de la CP.

Las sales de cloruro y fosfato de potasio, magnesio y sodio, cuando se disocian, incrementan la CE, por lo que de acuerdo con los coeficientes de correlación de Pearson, se puede inferir que la CE de los sustratos evaluados está determinada principalmente por la concentración de los aniones Cl^- y PO_4^{3-} ($R^2 = 0,54$ y $0,44$, respectivamente (Tabla 21) y los cationes solubles K^+ , Mg^{2+} y Na^+ ($R^2 = 0,64$, $0,53$ y $0,49$, respectivamente (Tabla 21), que a su vez son los que se muestran en mayor concentración en la mayoría de los sustratos (Tabla 35). Se presentó una correlación negativa entre la CE y el Na^+ en fase intercambiable ($R^2 = -0,35$), que sugiere que cuando este catión está adsorbido en el complejo de cambio, se reduce su concentración en la fase soluble, por consiguiente disminuye la CE (Tabla 21).

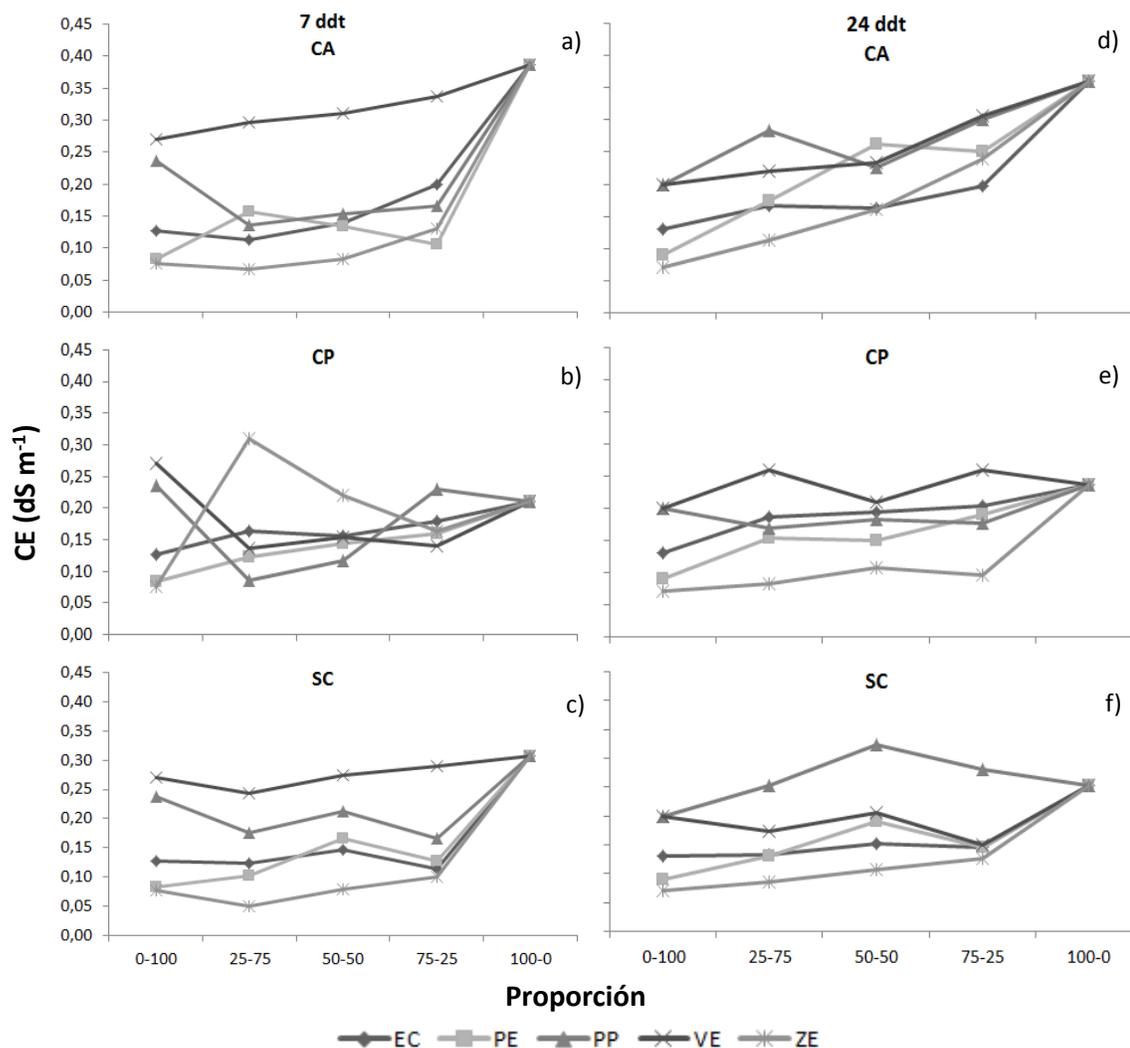


Figura 8. CE de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

3.2.4 pH

Para el factor “material de origen orgánico” el pH no mostró diferencias importantes entre los 7 y 24 ddt (Figura 9). No obstante, la CP es el único sustrato que tiene el pH dentro del rango adecuado (Tabla 3), aunque la CA y el SC, que superan este rango, no lo hacen de forma que suponga un efecto nocivo para la planta (Figura 9). En condiciones naturales, la CA tiene mayor tendencia a la alcalinidad que el SC (Tabla 35), lo cual se mantiene en condiciones de cultivo (Figura 9).

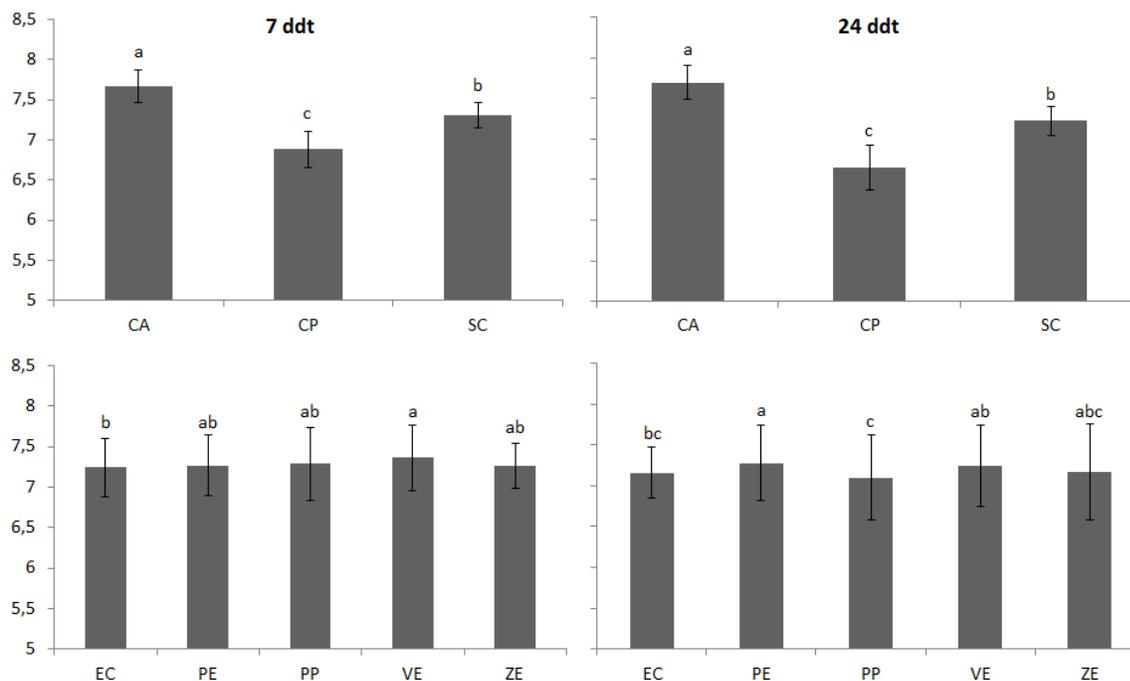


Figura 9. Comparación del pH de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los 7 ddt todas las mezclas tienen un pH que sobrepasa el rango adecuado (Tabla 3), aunque no en un nivel que pueda ser nocivo para el crecimiento de las plantas (Figura 9). A pesar de que el pH tiende a permanecer invariable a lo largo del tiempo, las diferencias entre los sustratos no se mantienen, pues a los 7 ddt la VE tuvo el mayor pH, mientras que la PE lo consiguió a los 24 ddt (Figura 9).

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que el pH de las mezclas que contienen CA y SC superan el rango de pH adecuado a los 7 ddt, destacándose la CA100 (8,2), y la CA75-VE25 (8,0) (Tabla 38). Estos sustratos se encontraban dentro de los que menos ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz) generaron (Tabla 54), y además, la CA100 pertenecía al grupo de los sustratos con menor concentración de N y microelementos, lo que sugiere que este pH alcalino está limitando la absorción de estos nutrientes (Neumann y Römheld, 2012).

A los 24 ddt el pH de los sustratos que contienen CA y SC siguen superando el rango óptimo, destacándose igualmente la CA100 (8,03), aunque el pH de la CA75-VE25 se redujo de 8 a los 7 ddt a 7,77 a los 24 ddt. Los cambios no fueron substanciales, probablemente porque la ventana de observación es muy corta: 7 días (de 0 a 7) y luego 17 días (de 7 a 24), no obstante, si se comparan estos resultados con lo mostrado por las mezclas al natural (Tabla 35), se evidencia un mayor cambio, pues en este estado, en promedio el pH se encontraba en 7,7; mientras que a los 24 ddt fue de 7,21, lo que indica una disminución del pH, que obedece al proceso de intercambio de iones entre las raíces de las plantas y la solución del sustrato, reacción que genera acidez (Neumann y

Römheld, 2012). En cuanto a las mezclas sin tener en cuenta el factor “proporción”, a los 24 ddt (Tabla 41) no se aprecian cambios substanciales con respecto a lo ocurrido a los 7 ddt (Tabla 40), pues los sustratos que tuvieron el mayor o menor pH se mantuvieron a lo largo del tiempo.

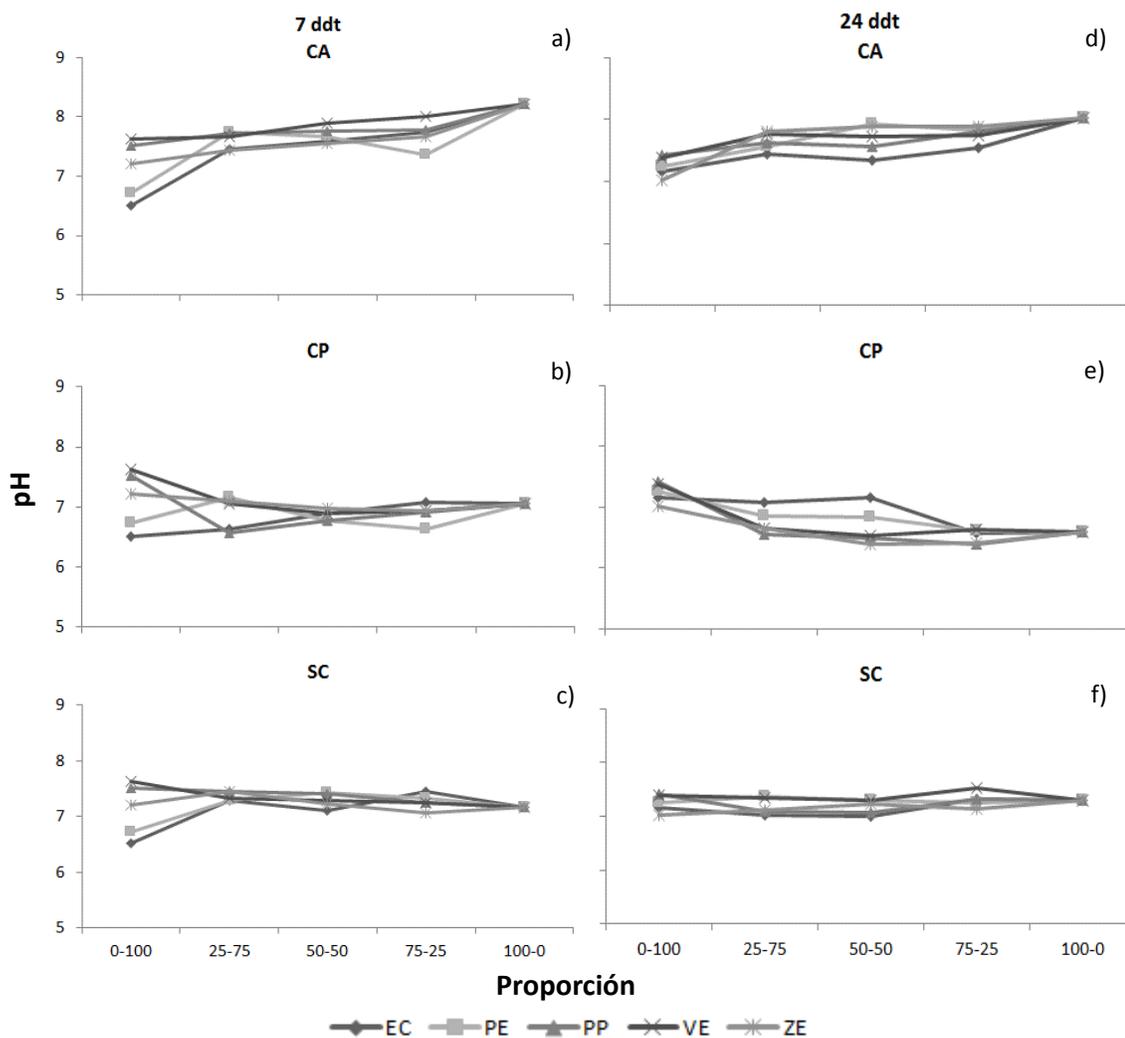


Figura 10. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su constituyente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de CA genera un leve aumento en el pH, a medida que su contenido se incrementa dentro de la mezcla, tanto a los 7 (Figura 10-a) como a los 24 ddt (Figura 10-d). El pH de los sustratos que contienen CP (Figura 10-b y e), no muestra una tendencia tan clara a aumentar, como aquellos mezclados con CA (Figura 10-a y d), lo cual concuerda con el pH neutro de la CP. El pH de los sustratos que contienen SC permanece casi inalterado con las diferentes proporciones (Figura 10-c y f).

3.2.5 Concentración de iones en fase soluble

Analizando la concentración de iones en la fase soluble de los materiales de origen orgánico, se aprecia que la CA contiene la mayor concentración de PO_4^{3-} tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 12), lo cual genera que a medida que el contenido de CA disminuye, lo mismo ocurre con la concentración de PO_4^{3-} en la mezcla (Figura 13 y Figura 14). La más alta concentración de Na^+ soluble se presenta en las mezclas con SC (Figura 11). Esta concentración se incrementa notablemente cuando los sustratos entran en contacto con agua y raíces, pues en estado natural su concentración es de $112,3 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que a los 7 ddt es de $204,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 11) y a los 24 ddt es de $215,57 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 11). Teniendo en cuenta que el agua de riego no presentaba una concentración importante de Na^+ (Tabla 24), se podría atribuir este incremento a los altos contenidos de Na total del SC (Tabla 6), que al entrar en contacto con agua comenzó un proceso de disolución.

En general, a excepción del K^+ para la CP y el SC, todos los cationes solubles aumentaron de los 7 a los 24 ddt (Figura 11), lo cual es más notorio en la CA y la CP que en el SC. Esto se debe a la mayor CIC del SC, que le permite disponer de un mayor número de sitios de adsorción de cationes en el complejo de cambio, disminuyendo de esta forma su desorción a la fase soluble. Los aniones en fase soluble no muestran una tendencia tan clara como los cationes en esta misma fase (Figura 12), lo cual se debe a que estos aniones no están influenciados de una forma tan notoria por el efecto de las cargas superficiales como los cationes.

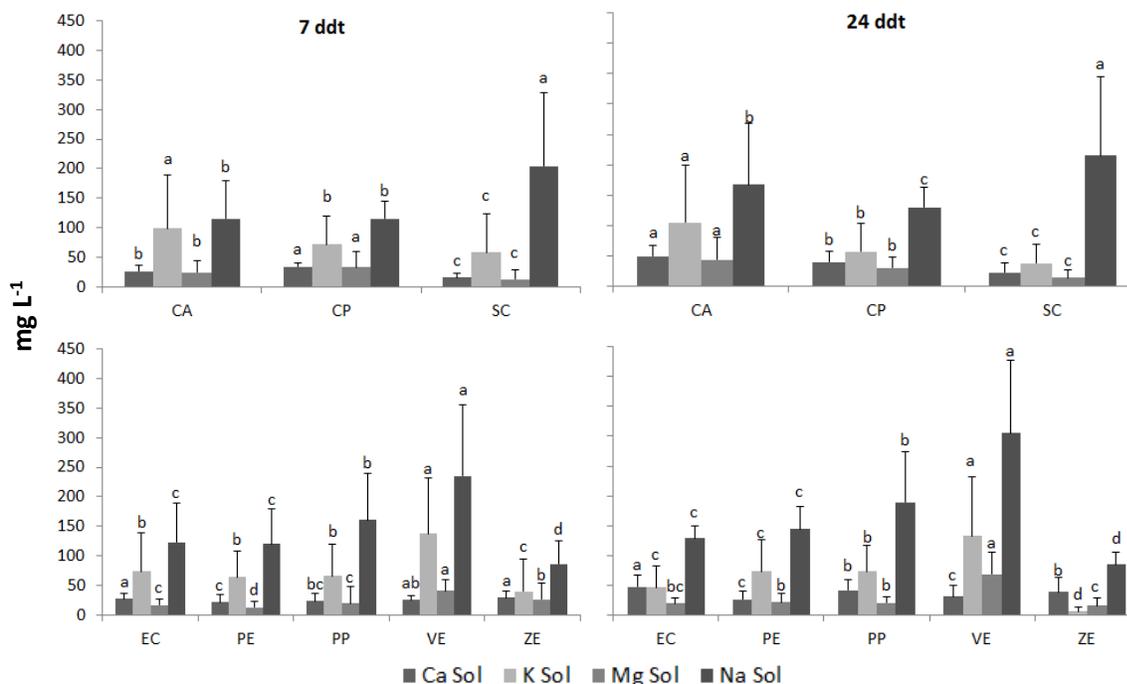


Figura 11. Comparación de la concentración de cationes en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, se aprecia que la concentración de Na^+ en solución es alta con respecto al Ca^{2+} , el K^+ y el Mg^{2+} , sobre todo para la VE (Figura 11). Esto sugiere obstáculos de tipo antagónico en el proceso de absorción de nutrientes por parte de las raíces. Esta tendencia se mantiene para la concentración de aniones en fase soluble, donde la VE contiene la mayor concentración de Cl^- y PO_4^{3-} y la segunda mayor concentración de SO_4^{2-} (Figura 12). Para todos los materiales de origen mineral, el Ca^{2+} soluble aumentó de los 7 a los 24 ddt, lo contrario ocurrió para la concentración de Mg^{2+} y Na^+ solubles (Figura 11). El Cl^- y SO_4^{2-} de la VE incrementaron su concentración de los 7 a los 24 ddt, a diferencia de la ZE y de la PP (Figura 12).

Tabla 24. Propiedades y composición química del agua de riego utilizada en la investigación.

| Agua riego | CE ds m ⁻¹ | pH | Ca | K | Mg | Na | NO ₃ | SO ₄ | PO ₄ | Cl |
|------------|--------------------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| | 0,4 | 7,0 | 13,6 | 2,5 | 3,4 | 6,0 | 0,04 | 2,2 | 0,1 | 94,0 |

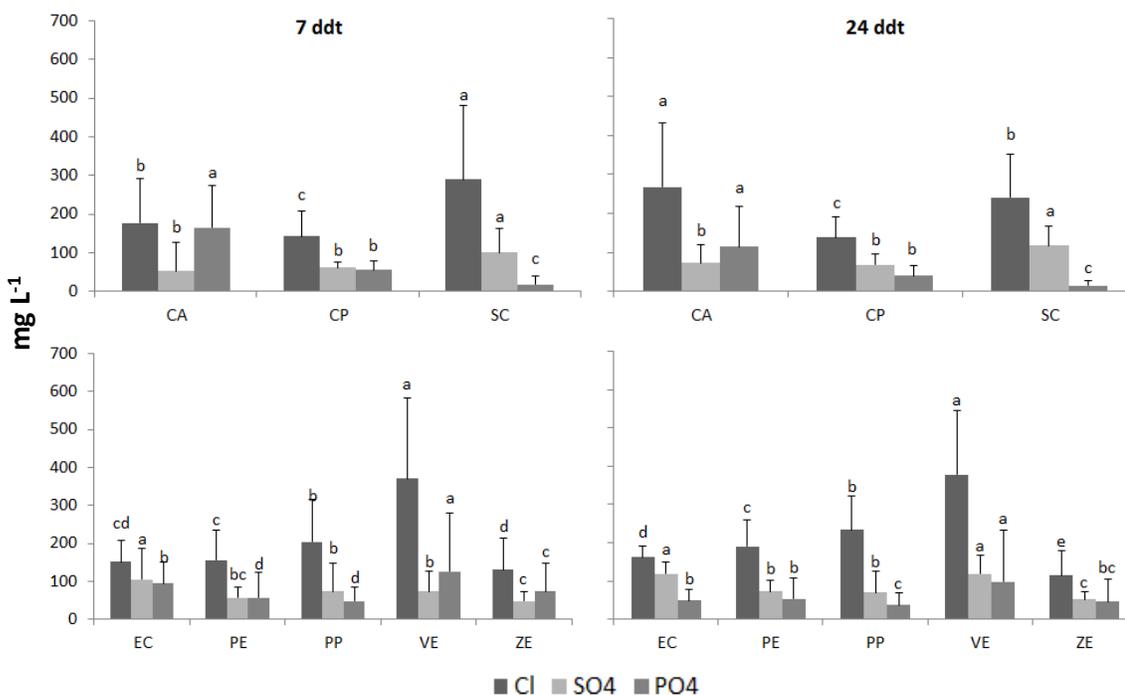


Figura 12. Comparación de la concentración de aniones en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de trasplante. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Al comparar todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas (Anexo 1), de los 7 a los 24 ddt se pueden apreciar cambios variables, ya que unos sustratos disminuyeron su concentración (EC = 67,1 mg L⁻¹ Ca soluble a los 7 ddt y 57,43 mg L⁻¹ a los 24 ddt), mientras que otros la aumentaron (CA75-ZE25 = 49,6 mg L⁻¹ Ca soluble a los 7 ddt y 95,9 mg L⁻¹ a los 24 ddt) (Tabla 40), esto refleja procesos de adsorción o desorción más marcados para unos sustratos que para otros. Es así, como por ejemplo la EC100 tiene la mayor concentración de Ca^{2+} soluble, mientras que la CA100 tiene la mayor concentración de K^+ y PO_4^{3-} , el CP75-PP25 la de Mg^{2+} , SC75-VE-25 la de Na^+ y Cl^- y CA50-EC50 la de SO_4^{2-} (Tabla 38). Cuando se comparan las mezclas sin tener en

cuenta la proporción (Tabla 39) los sustratos VE100, CA-VE y CP-ZE contienen la mayor concentración de Mg^{2+} soluble y el SC100 la mayor concentración de SO_4^{2-} .

En promedio, el Na^+ soluble presentó una concentración más alta ($154,5 \text{ mg L}^{-1}$), comparada con los cationes Ca^{2+} ($31,8 \text{ mg L}^{-1}$), K^{2+} (75 mg L^{-1}) y Mg^{2+} ($26,5 \text{ mg L}^{-1}$), y debido a que estas son formas disponibles para la absorción por parte de las raíces, el Na^+ podría estar presentando un fuerte antagonismo con el Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} por su entrada a la planta, y por eso este catión muestra relación con el peso fresco de raíz. El Na^+ es considerado un nutriente benéfico, que puede reemplazar en cierto grado las funciones del K^+ , por ejemplo, como osmoregulador (Broadley *et al.*, 2012).

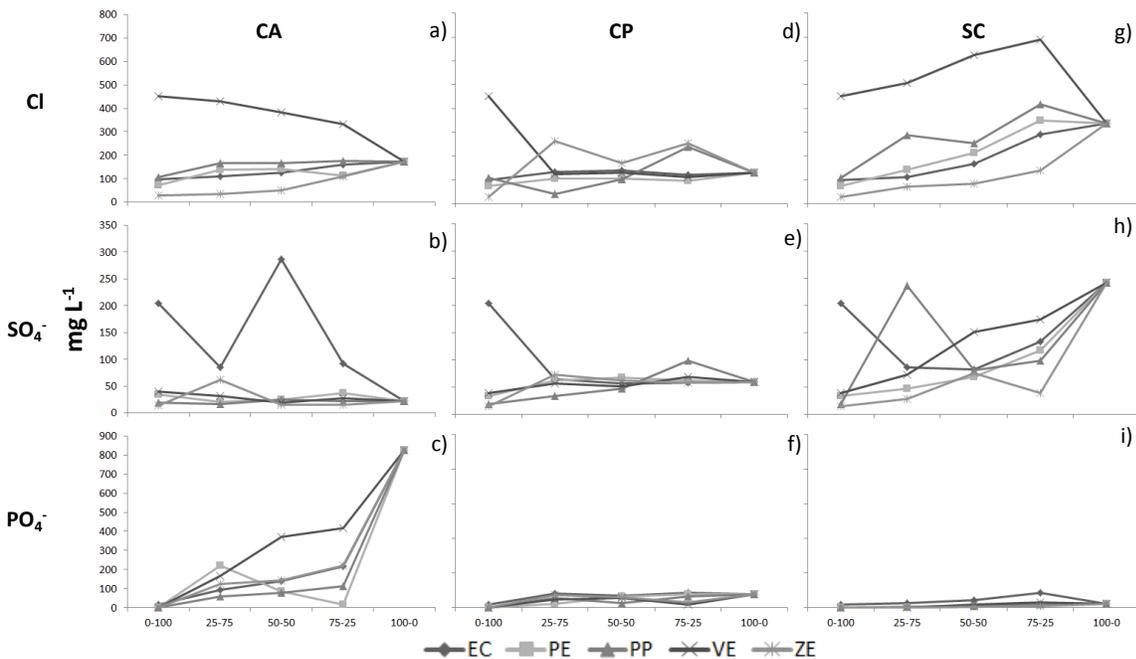


Figura 13. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

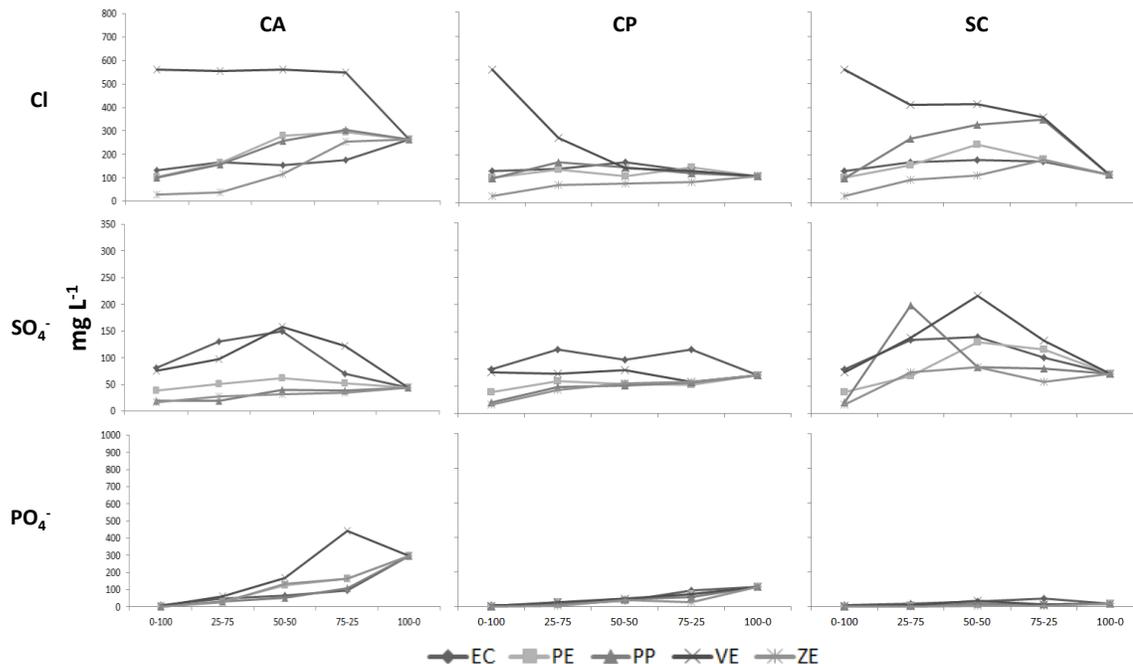


Figura 14. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su constituyente orgánico, a medida que se incrementa el contenido de CA, aumenta la concentración de K^+ soluble, tanto a los 7 (Figura 15) como a los 24 ddt (Figura 16). A medida que disminuye el contenido de VE también disminuye la concentración de Mg^{2+} y Na^+ solubles (Figura 15 y Figura 16), la concentración de Cl^- disminuye a medida que la VE se combina con dosis crecientes de CA, CP y SC (Figura 13 y Figura 14). Cabe resaltar, que la concentración de Cl^- disminuye drásticamente con el 25% de CP en la mezcla CP_VE (Figura 13), en contraste con la disminución paulatina que se aprecia con las mezclas CA_VE (Figura 13) y SC_VE (Figura 13). Los sustratos con CP no muestran una tendencia clara para ningún ión (Figura 13 y Figura 14).

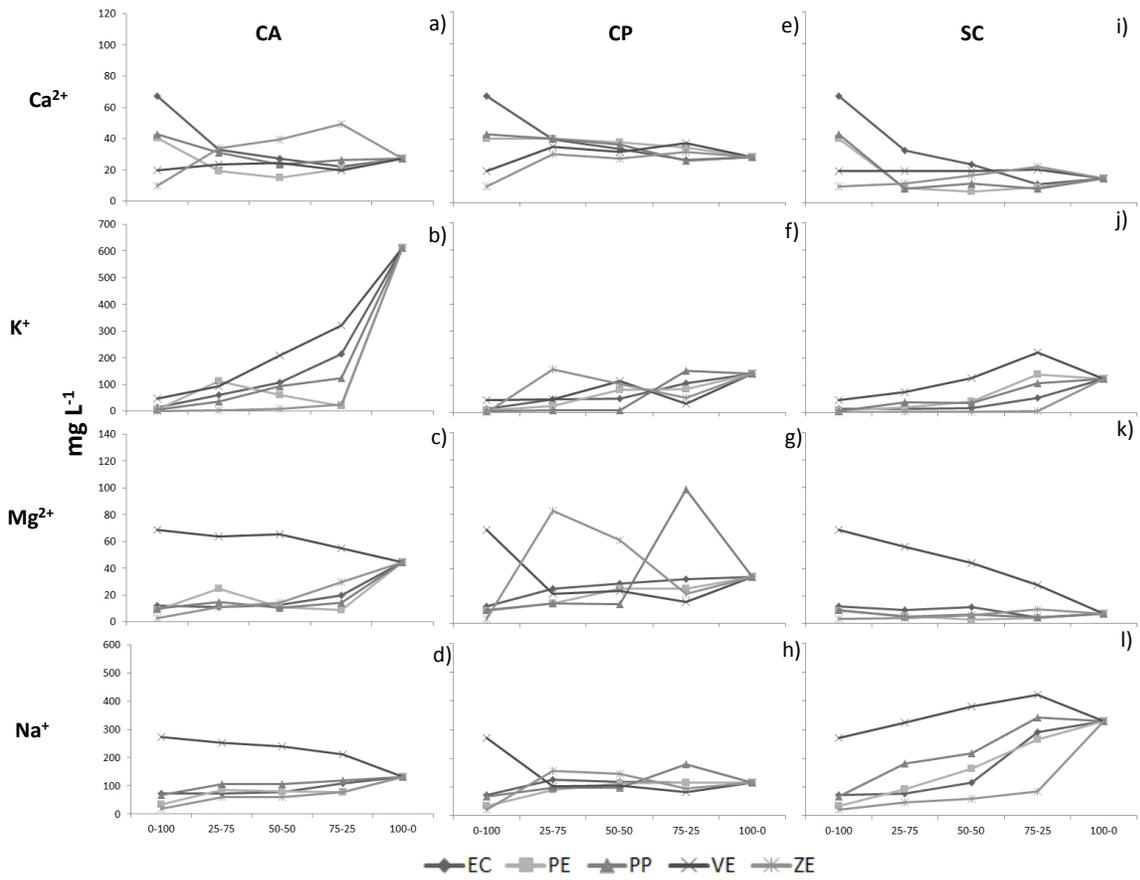


Figura 15. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

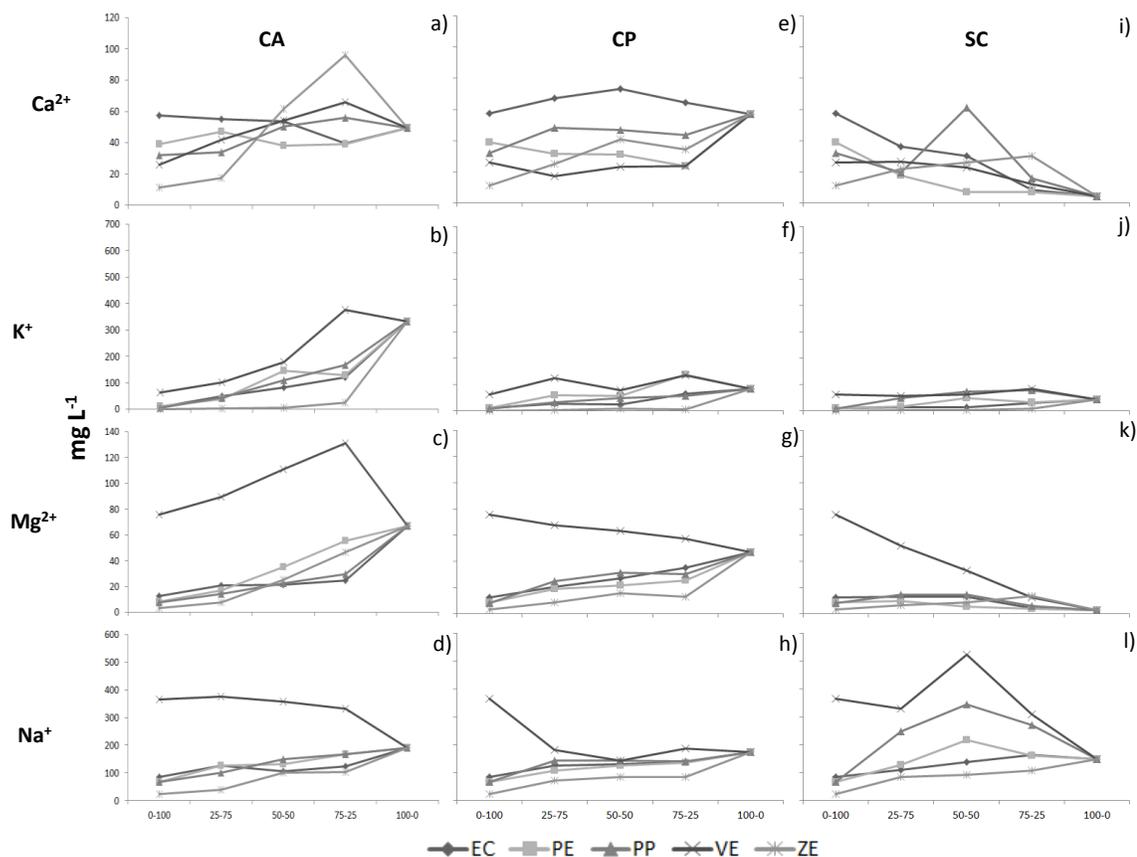


Figura 16. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.2.6 Propiedades de intercambio

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt el SC presentó la mayor CIC (Figura 17), tal como se observó con el material de partida (Tabla 36). La CIC de este sustrato es 100% mayor con respecto al siguiente material, la CA. Esto se corresponde con la mayor concentración de cationes intercambiables (a excepción del K^+) (Figura 17) del SC (Tabla 55). Por otro lado, los cationes en fase intercambiable permanecieron casi invariables, pues las diferencias que se presentaron a los 7 ddt, se mantuvieron a los 24 ddt (Figura 17). Cabe recordar que las mezclas con SC generaron la mayor ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz).

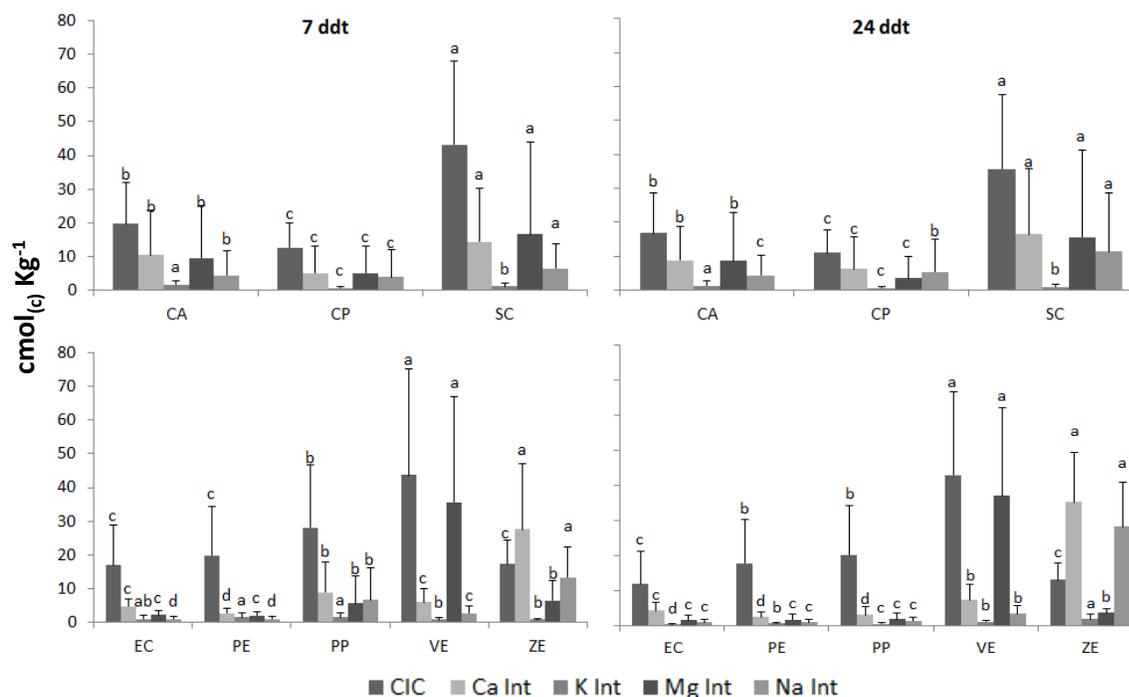


Figura 17. Propiedades de intercambio de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt, la VE mostró la mayor CIC (Figura 17), que concuerda con lo evidenciado en estado natural (Tabla 36) con el complejo de cambio dominado por Mg^{2+} . La mayor concentración de Ca^{2+} y Na^+ la tiene la ZE y la de K^+ la PE y la PP (Figura 17). Es de esperarse que la alta CIC de la VE influya substancialmente sobre su concentración de cationes en estado intercambiable. La CIC, al igual que la concentración de la mayoría de los cationes en fase intercambiable permanecieron casi invariables de los 7 (Figura 17) a los 24 ddt (Figura 17). No obstante, se presentó un claro aumento de K^+ en fase intercambiable en la ZE de los 7 a los 24 ddt, paralelo a la disminución de su concentración en fase soluble, lo cual puede sugerir un incremento en el proceso de adsorción de este catión a las superficies cargadas negativamente de la ZE.

El sustrato que generó el mayor Pf.Raíz es el SC50-VE50 (Tabla 54), que concuerda con los resultados de CIC. De igual forma, sin tener en cuenta el factor “proporción” se presenta la misma tendencia mostrada con los sustratos con la combinación de los tres factores (material orgánico – material mineral - proporción), en donde los materiales que contienen SC y VE mostraron la mayor CIC (Tabla 43), que sigue concordando con los resultados de Pf.Raíz (Tabla 55). A los 24 ddt no existe variación en la tendencia que muestra que las mezclas que contienen SC y VE son los que poseen mayor CIC (Figura 18), aunque en general se aprecia una disminución de la CIC de los 7 a los 24 ddt (Tabla 44), lo mismo ocurre cuando se comparan los sustratos sin tener en cuenta la proporción en la mezcla (Tabla 45).

A medida que aumenta el contenido de SC en la mezcla se incrementa la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Esta situación se incrementa cuando se incluye VE en la mezcla, pues la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables aumenta notablemente, tanto para SC_VE, como para CA_VE (Figura 19 y Figura 20). Esta tendencia no es tan clara para la mezcla CP_VE (Figura 19 y Figura 20). La concentración de K^+ intercambiable es más alta en el SC y la CA, por ende, los sustratos que contienen estos dos materiales orgánicos muestran mayor concentración de K^+ a medida que aumenta el contenido del material en la mezcla (Figura 19 y Figura 20).

En cuanto a la concentración de Na^+ intercambiable, se aprecia que la ZE genera un aumento de este catión a medida que el contenido de ZE se incrementa en la mezcla, esto es más evidente para las mezclas CA_ZE y SC_ZE, que para CP_ZE (Figura 19 y Figura 20). Esto concuerda con la alta concentración de Na^+ que tiene la ZE (Tabla 42 y Tabla 44).

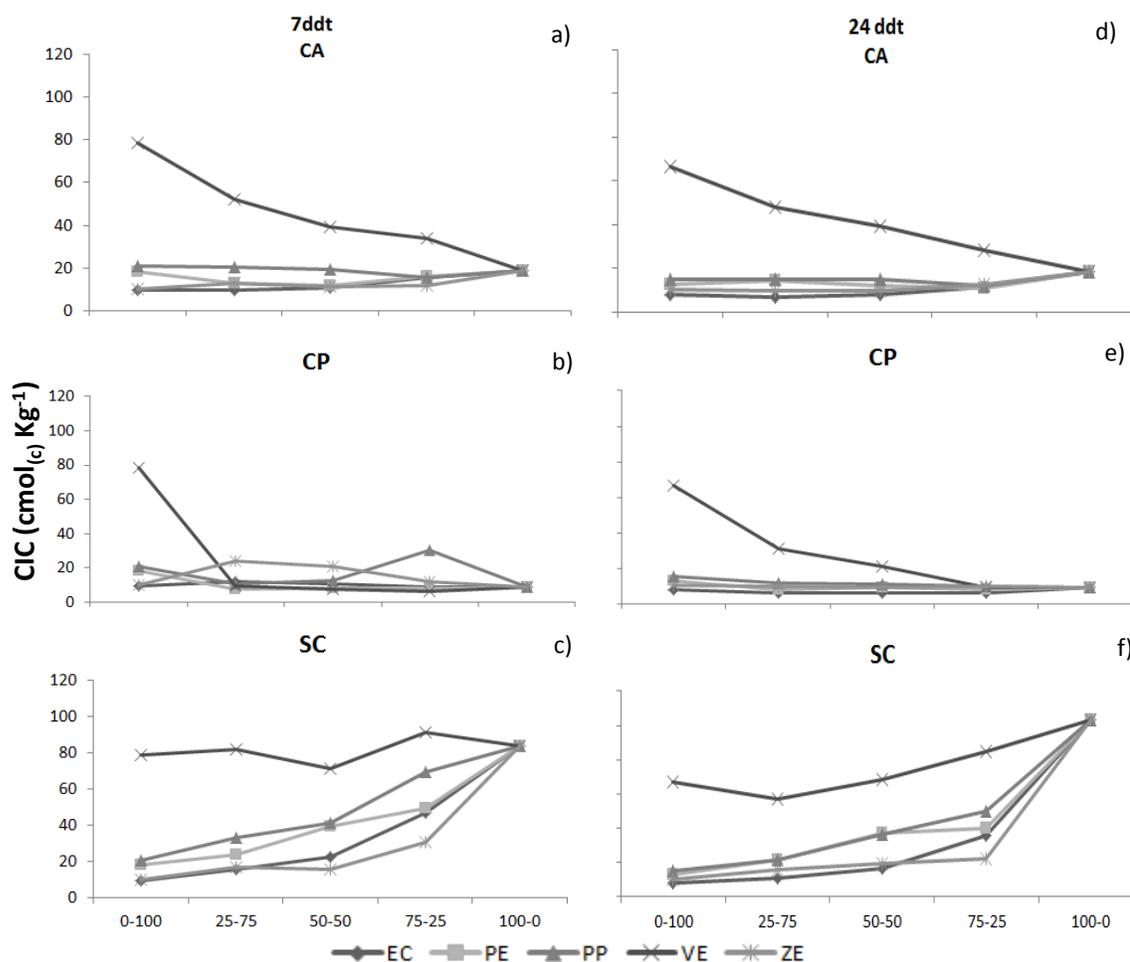


Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$.

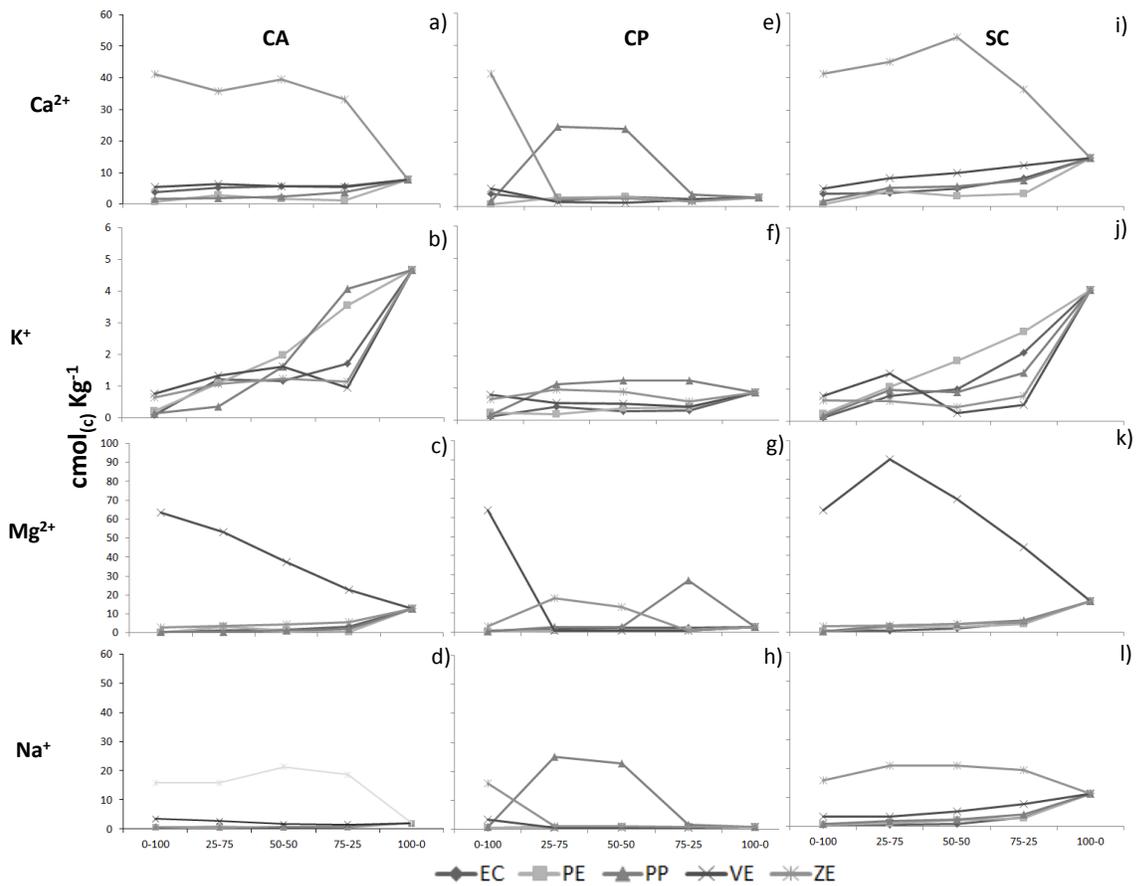


Figura 19. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

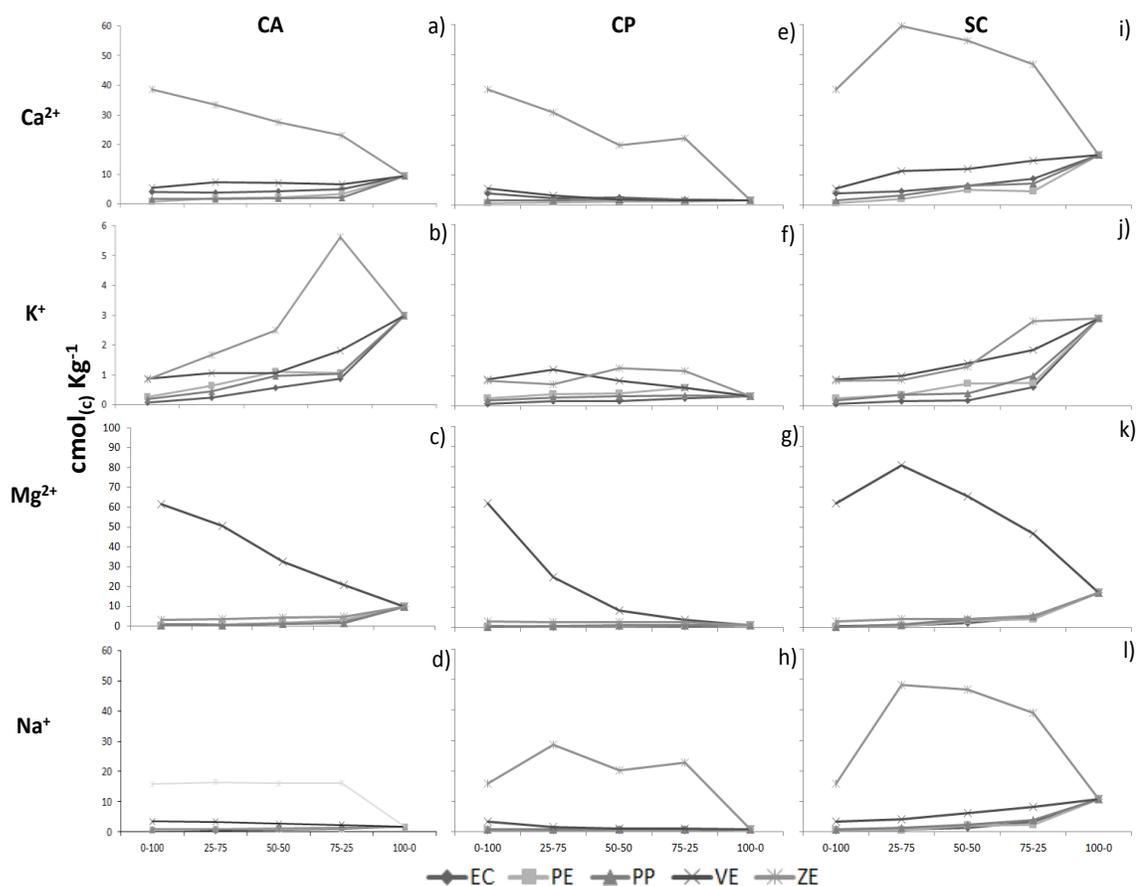


Figura 20. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.2.7 Concentración de micronutrientes

Para el factor “material de origen orgánico”, el SC contiene la mayor concentración de Fe²⁺ y Cu²⁺, mientras que la CA tiene la mayor concentración de Mn²⁺ y Zn²⁺ (Figura 21), no obstante, a los 24 ddt (Figura 21), a excepción del Fe²⁺ del SC y el Mn²⁺ y Zn²⁺ de la CP, la concentración de todos los micronutrientes aumentó de los 7 a los 24 ddt para los tres sustratos (Figura 21).

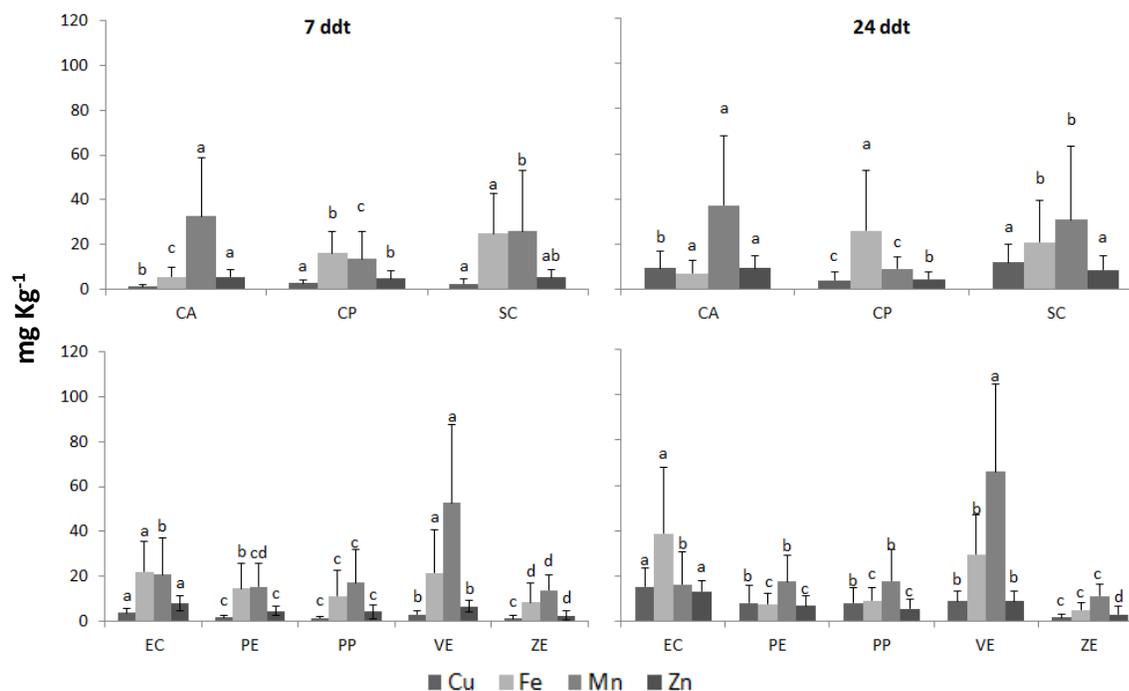


Figura 21. Concentración de micronutrientes de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Debido a que la CA contiene la mayor concentración de Mn^{2+} y Zn^{2+} (Tabla 42 y Tabla 44), es evidente que las mezclas que contienen CA presentaran mayores concentraciones de estos micronutrientes a medida que el contenido de CA aumentó en la mezcla (Figura 22 y Figura 23).

Al igual que con los cationes y aniones en fase intercambiable y soluble, la CP no muestra una tendencia clara para los micronutrientes, ya que no se evidencia que su mayor o menor contenido en el sustrato, genere claramente un aumento o disminución de la concentración de iones (Figura 22 y Figura 23). Esta situación se debe a la baja CIC que tiene este sustrato (8,6 y 9,17 $cm_{(c)} Kg^{-1}$ a los 7 y 24 ddt, respectivamente), comparado con los otros dos materiales de origen orgánico (Tabla 42 y Tabla 44).

Para el factor “material de origen mineral”, los cinco sustratos incrementaron su concentración de Cu^{2+} y Zn^{2+} de los 7 a los 24 ddt (Figura 21), no obstante, el Fe^{2+} y el Mn^{2+} no presentaron una tendencia clara, aunque las diferencias estadísticas se mantuvieron de los 7 a los 24 ddt entre los sustratos, donde la EC contiene la mayor concentración de Cu^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , mientras que la VE tiene la mayor concentración de Mn^{2+} (Figura 21).

Los materiales que tienen la mayor concentración de Fe^{2+} son: SC, VE y EC (Tabla 42 y Tabla 44), lo cual explica la razón por la cual las mezclas SC_VE y SC_EC en sus diferentes proporciones, contienen la mayor concentración de este micronutriente (Figura 22 y Figura 23). De igual forma, a medida que aumenta el contenido de SC en las

mezclas, la concentración de Zn^{2+} también aumenta (Figura 22 y Figura 23). Lo mismo ocurre con las mezclas que contienen CA (Figura 22 y Figura 23).

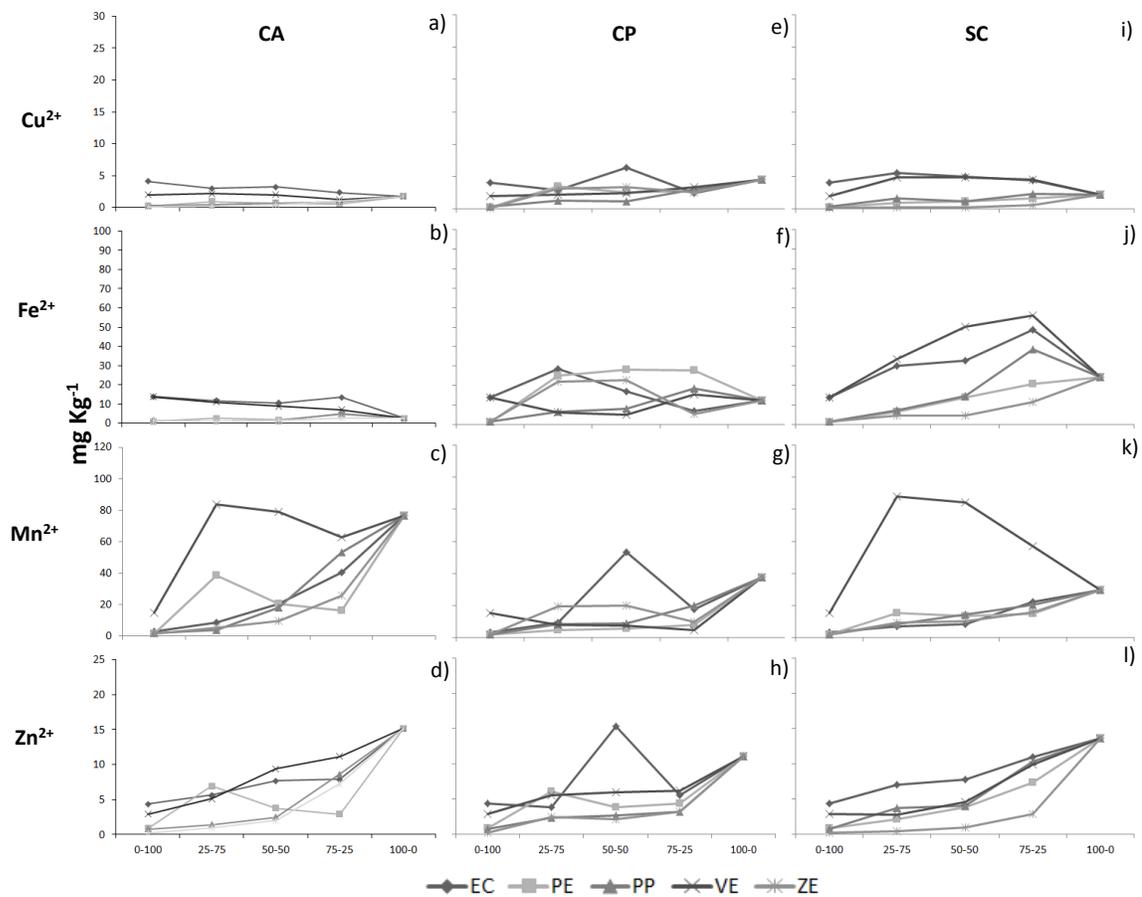


Figura 22. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

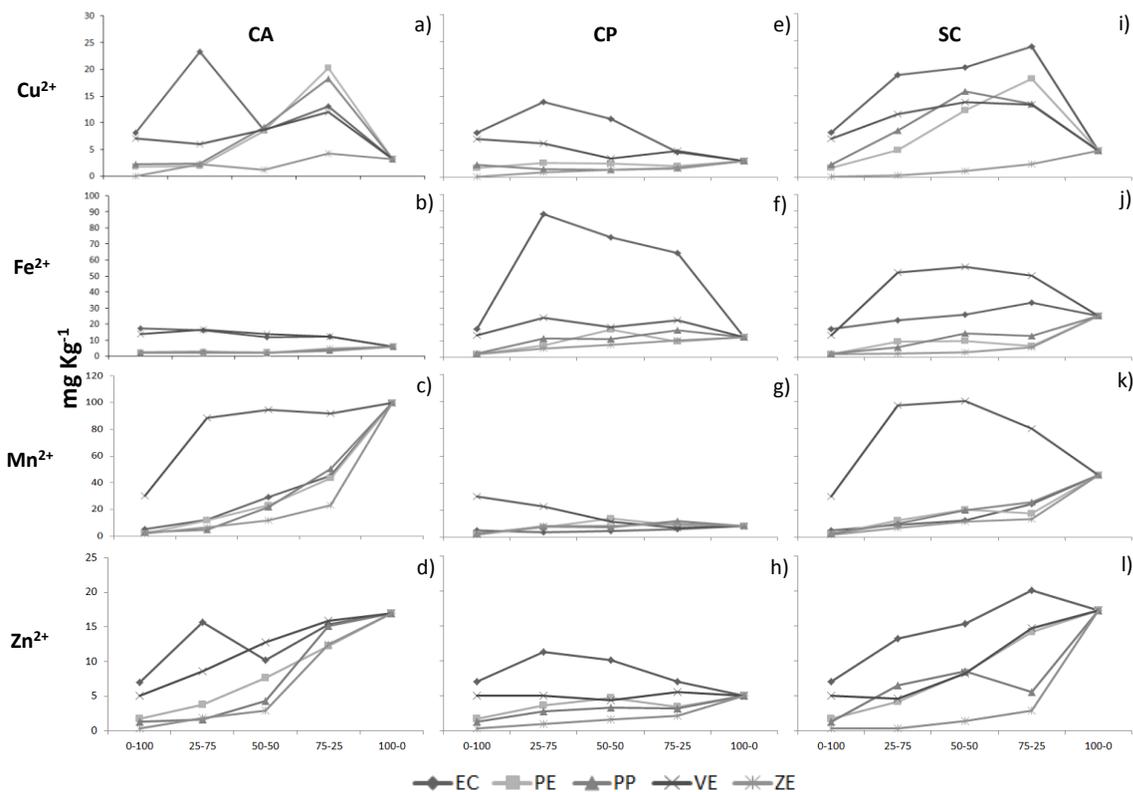


Figura 23. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.3 Conclusiones

El sustrato de coco y la vermiculita presentaron una mayor capacidad de intercambio catiónico, tanto en estado natural (crudo) como en fase de propagación, lo cual concuerda con la mayor ganancia de peso fresco de raíces para las plantas que se propagaron en estos sustratos, aunque estas variables no mostraron correlación positiva significativa.

La concentración de sales y el pH de las mezclas disminuyeron al entrar en contacto con el agua y las raíces de los esquejes de clavel, no obstante, de los 7 a los 24 ddt no se aprecian cambios notables entre los sustratos evaluados, aunque si hay una tendencia a la disminución de la concentración de iones en fase soluble e intercambiable, que obedece a procesos de absorción desde la fase soluble a las raíces de las plantas y desorción desde las superficies cargadas, a la solución del sustrato.

Independiente de la composición total de elementos de los materiales de origen mineral caracterizados, unos tienen mayor tendencia a solubilizar iones, que pueden ser posteriormente absorbidos por las plantas. Este es el caso de la escoria de carbón, cuya

cantidad total de calcio, potasio y magnesio no es la mayor comparada con los otros materiales, sin embargo, su concentración en fase soluble sobresale de los demás.

En el proceso de producción de material de siembra, las plantas pueden desarrollar raíces sin el aporte externo de nutrientes, solamente con el suministro de los iones que están presentes en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, los cuales deben ser tenidos en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización.

4. Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos

4.1 Resumen

La evaluación química de los lixiviados puede servir como indicador, tanto de acumulación de sales en los sustratos, así como de contaminación a las fuentes de agua, por ejemplo por aporte de nitratos. Es así, como se realizó un estudio con el fin de evaluar las propiedades químicas: pH, CE, concentración de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y Cl^- de los lixiviados de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3) + 8$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Se presentó una correlación altamente significativa entre CE, pH, K^+ y PO_4^{3-} ; y la CA mostró los mayores valores. No se presentaron concentraciones de NO_3^- en los lixiviados que sobrepasaran los rangos adecuados. Se sugiere tener en cuenta la tendencia salina y alcalina de la CA para establecer programas de riego y fertirriego.

Palabras Clave: cationes, aniones, salinidad, acidez, alcalinidad.

4.2 Introducción

En producción hortícola bajo invernadero, el manejo adecuado del agua y suministro de nutrientes es vital. Por un lado, se deben mantener óptimas condiciones de la solución del sustrato con el fin de generar una adecuada absorción de nutrientes y mantener el equilibrio osmótico, y por otro lado, es necesario prevenir la lixiviación de nutrientes con el fin de reducir la contaminación ambiental (Sonnevel y Voogt, 2009).

En Colombia, inicialmente los sustratos eran utilizados en cultivos de hortalizas, posteriormente comenzó a implementarse su uso para disminuir la presencia del patógeno *Fusarium oxysporum* f.sp. dianthi, causante de la marchitez vascular en el cultivo del clavel (Petitt, 2011). Otra de las razones para el uso de sustratos, es que permite manejar, en cierto grado, las entradas (fertirriego) y salidas (lixiviados), e identificar los nutrientes que se están acumulando, asegurando de esta manera un mayor control del sistema (Petitt, 2011), ya que los cambios químicos que ocurren en el sustrato pueden estar influenciados por su CIC, por el manejo del fertirriego durante el periodo de crecimiento y particularmente por el control de la fracción lixiviada (Charlo *et al.*, 2012). El manejo del riego tiene una influencia notable sobre la generación de lixiviados, ya que

tradicionalmente se han utilizado riegos abundantes para evitar el exceso de sales en la rizósfera, con la posterior generación de lixiviados (Lieth y Oki, 2008), debido a que uno de los errores comunes de la producción en sustrato es la acumulación de sales cuando la zona radicular no tiene suficiente lixiviación mediante irrigación (Kafkafi, 2008). Una consideración de manejo fundamental en CSS es la necesidad de mantener la salinidad de la rizósfera en niveles que no sean nocivos para la óptima producción del cultivo (Sonneveld, 2000).

El Na^+ y Cl^- son iones que se encuentran presentes en el agua, sin embargo, la mayoría de especies vegetales los absorben en pequeñas cantidades, por lo que su exceso en la solución del sustrato no es conveniente. La alta concentración de estos iones constantemente determina los requerimientos de lixiviación, aunque otros iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} o SO_4^{2-} también pueden generar esta necesidad (Sonnevel y Voogt, 2009). Además de la acumulación de sales en el medio de cultivo, otro aspecto que se debe tener en cuenta cuando se estudian los lixiviados de los sustratos es la posible contaminación que estos pueden generar; por ejemplo lixiviación de NO_3^- (Chavez *et al.*, 2008), ya que como lo mencionan Ku y Hershey (1997), la lixiviación excesiva es indeseable, debido a que puede causar contaminación ambiental. Esto sumado a que la producción sin suelo requiere riego frecuente y altas cantidades de fertilizantes, que pueden resultar en contaminación del agua superficial y subterránea (Lang y Pannuk, 1998).

El porcentaje de lixiviado en relación con la cantidad total de agua aplicada se denomina "fracción lixiviada" (Lieth y Oki, 2008). Normalmente esta fracción puede variar entre 0 y 20%, bajo condiciones bien controladas (Lieth y Oki, 2008). La fracción lixiviada es típicamente una función del grado por el cual la acumulación de sales puede convertirse en un problema. Si la fuente de agua es salina y las sales fertilizantes son aplicadas a esta agua, entonces la salinidad puede llegar a un nivel tóxico para las plantas. Si este es el caso, la cantidad de lixiviación debería ser relativamente alta. La lixiviación puede ser deseable en casos donde el agua utilizada para irrigación es de baja calidad, ya que garantizará que las sales que pueden acumularse se mueven fuera de la zona radicular. Si el agua es de alta calidad y la fertirrigación resulta en baja acumulación de sales en la rizósfera, entonces el volumen de lixiviados puede ser minimizado (Lieth y Oki, 2008). La fracción lixiviada puede ser calculada dividiendo la conductividad eléctrica del agua de riego por la conductividad eléctrica máxima tolerada en los lixiviados (Marshall *et al.*, 1996). Así, si la CE del agua de riego es un quinto de la CE del máximo deseado del lixiviado, entonces la fracción lixiviada debería ser un quinto del volumen aplicado (Lieth y Oki, 2008).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente capítulo es evaluar la composición química del lixiviado de las mezclas (orgánico-mineral) de los materiales priorizados en el capítulo dos.

4.3 Materiales y métodos

La localización, material vegetal, diseño experimental y de tratamientos fueron los mismos del capítulo 2. Como complemento, cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un

volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel, recubierta con plástico perforado en la parte inferior, depositada sobre otra canastilla lisa, donde se descargaron los lixiviados (Figura 5).

A los 7 y 24 días se analizaron en los lixiviados: CE (Conductividad Eléctrica) con el método conductimétrico – lectura a 25 °C; pH con el método potenciométrico; concentración de NO₃⁻ (método de Kjeldahl); NH₄⁺ (método de Nessler y valoración colorimétrica); PO₄³⁻ (método de cloruro estañoso y valoración colorimétrica); SO₄²⁻ (método de cloruro de bario y valoración colorimétrica); Cl⁻ (titulación con AgNO₃); K⁺ Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ (espectrofotometría de absorción atómica).

Para calcular la fracción lixiviada (FL) se realizó un experimento, donde midió la cantidad total de agua aplicada a cada sustrato y la cantidad total de agua lixiviada. La FL se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$FL (\%) = \frac{\text{Agua lixiviada}}{\text{Agua aplicada}} \times 100$$

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Conductividad eléctrica y pH

Para el factor “material de origen orgánico” (CA, CP y SC), a los siete días del ciclo de enraizamiento los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA) mostraron los más altos pH (Figura 25) y CE (Figura 24) y el sustrato de coco (SC) presentó la menor CE en los lixiviados, lo cual concuerda con su baja CE en fase soluble (Tabla 35). Sin embargo, aunque hubo una leve disminución del pH y de la CE de los 7 a los 24 días del ciclo, a los 24 ddt se evidenció el mismo patrón de comportamiento (Figura 24 y Figura 25), donde la CA presenta el mayor pH y CE y el SC el menor valor para estas dos propiedades químicas.

Para el factor “material de origen mineral” (EC, PE, PP, VE y ZE), a los siete ddt la piedra pómez (PP) fue el material de origen mineral que mayor CE y pH presentó, mientras que

la escoria de carbón (EC) mostró la tendencia contraria (Figura 24 y Figura 25). A los 24 ddt, al igual que con los sustratos de origen orgánico, se aprecia una reducción generalizada de la CE y el pH (Figura 24 y Figura 25).

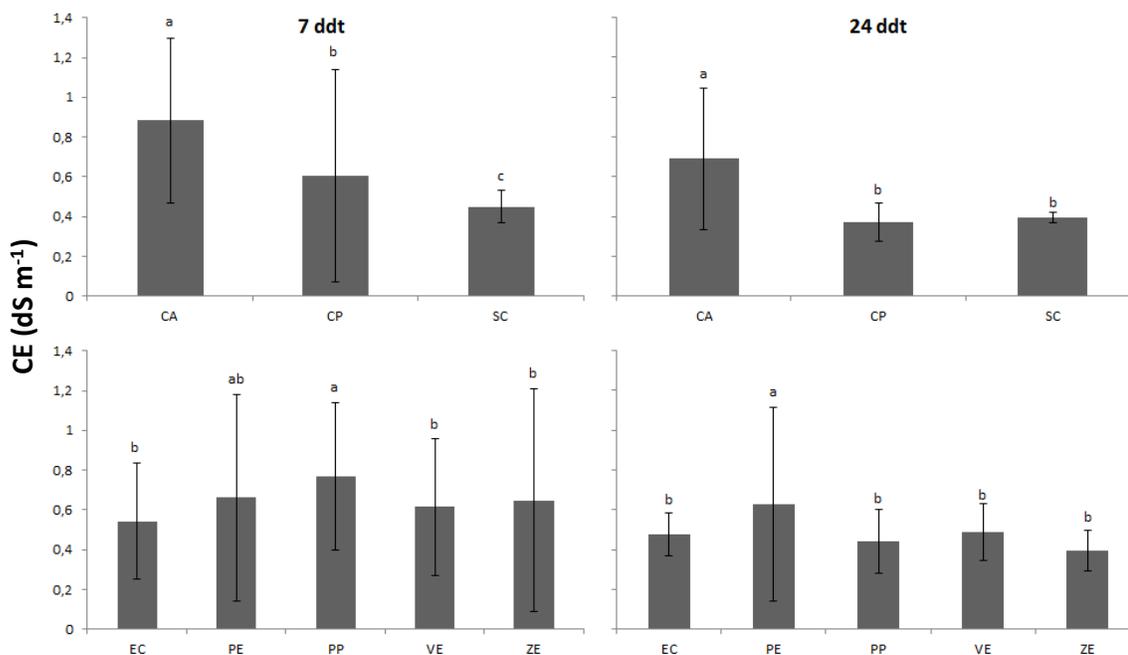


Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$ ¹³.

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que en promedio, la CE de los lixiviados mostró tendencia a disminuir de los 7 a los 24 ddt, aunque el pH permaneció casi invariable (Tabla 50, Figura 26 y Figura 27). La CA100, que es el tratamiento testigo, presentó la mayor CE ($2,4 \text{ dS m}^{-1}$), y en consecuencia, cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que cuanto más CA hubo en la mezcla, mayor fue la CE a los 7 ddt, aunque la tendencia disminuyó notablemente a los 24 ddt (Figura 26), como efecto de la absorción de iones por parte de la planta, lo cual disminuye la cantidad de sales solubles en la rizósfera y en los lixiviados. A pesar de que la CA100 pasó de $2,4 \text{ dS m}^{-1}$ a los 7 ddt, a $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ a los 24 ddt, se observó que los lixiviados de todas las mezclas con CA presentaron la mayor CE y pH (Tabla 52), que concuerda con la comparación de los tres sustratos de origen orgánico. A diferencia de la CA, las mezclas cuyo componente orgánico es la CP, no presentaron una tendencia en la variación de la CE y el pH a medida que se modificó la proporción de CP en la mezcla (Figura 26 y Figura 27). Esto se debe a la baja CE y pH

¹³ Cada barra muestra el promedio de 15 observaciones, debido a que cada sustrato de origen orgánico se mezcló con cinco materiales de origen mineral con tres repeticiones por mezcla.

circumneutra de la fase soluble de la CP, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Tabla 39 y Tabla 40). La CE de los lixiviados de las mezclas que contienen SC fue baja, menor a los 24 ddt ($< 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) que a los 7 ddt ($< 0,7 \text{ dS m}^{-1}$) (Figura 26), esto como respuesta al proceso de absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas, no obstante, el pH tiende a aumentar sutilmente de los 7 a los 24 ddt (Figura 27).

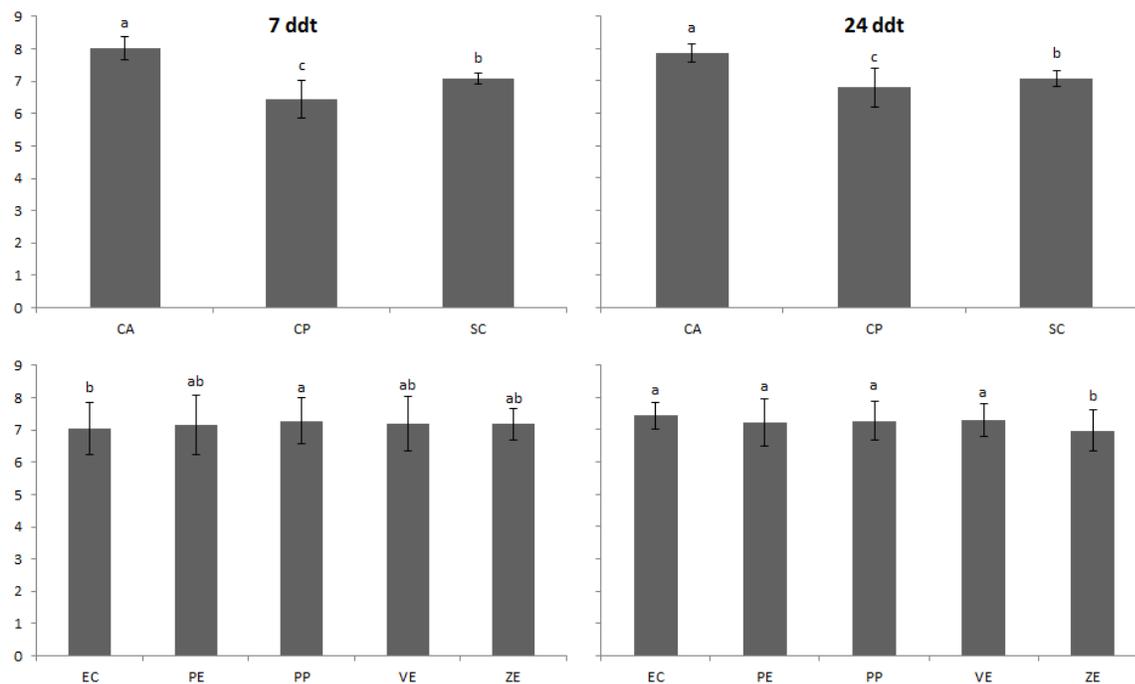


Figura 25. Comparación del pH de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Estos resultados se deben tener en cuenta en programas de fertirriego, pues aunque los valores de CE tanto del sustrato como de los lixiviados no son altos, que puedan suponer un efecto nocivo para el desarrollo de las plantas, se debe recordar que solo se aplicó agua, sin solución fertilizante, por lo que es evidente que los materiales evaluados, en su estado natural, aportan sales solubles.

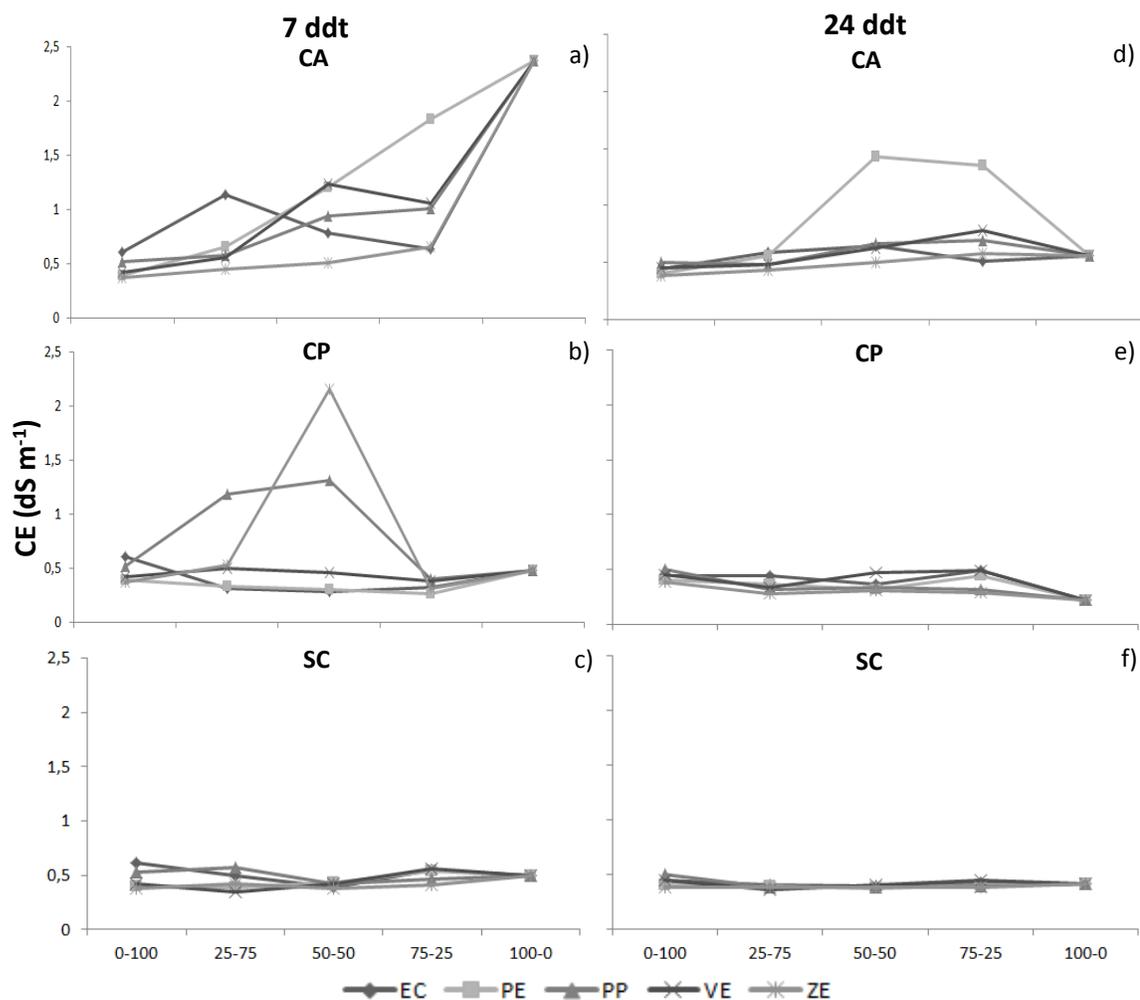


Figura 26. CE de los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

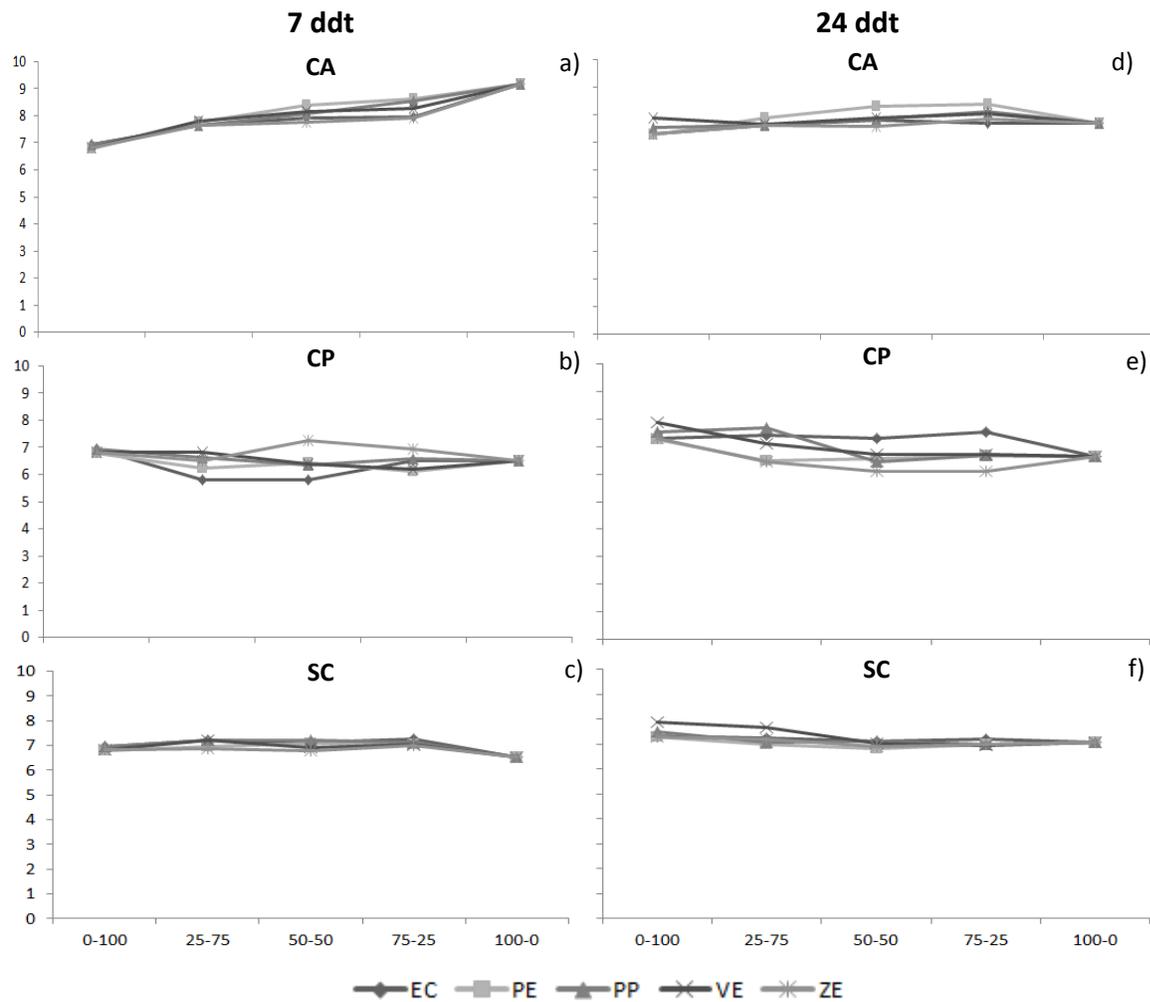


Figura 27. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

4.4.2 Concentración de cationes

La concentración de K^+ y PO_4^{3-} correlacionó significativamente con la CE, lo cual puede indicar que se están disociando sales, principalmente de fosfato de potasio, provocando un incremento en la concentración de electrolitos y de la CE (Tabla 25). Estos resultados concuerdan con la correlación de los mismos iones en la solución (fase soluble) del sustrato (Tabla 21).

Tabla 25. Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades y composición química de los lixiviados evaluados (n = 318).

| | pH | Ca | K | Mg | Na | NO ₃ | SO ₄ | PO ₄ | Cl | FL |
|-----------------|---------|-------|----------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|---------|
| CE | 0,54 ** | 0,00 | 0,94 *** | 0,40 * | 0,39 * | 0,00 | 0,55 ** | 0,87 *** | 0,44 * | -0,30 * |
| pH | 1,00 | -0,10 | 0,45 * | 0,30 * | -0,06 | -0,02 | -0,03 | 0,59 ** | -0,06 | -0,43 * |
| Ca | | 1,00 | -0,11 | 0,19 | 0,07 | -0,10 | 0,28 | -0,14 | -0,03 | -0,16 |
| K | | | 1,00 | 0,39 * | 0,33 * | -0,03 | 0,52 ** | 0,91 *** | 0,46 * | -0,16 |
| Mg | | | | 1,00 | 0,06 | -0,19 | 0,17 | 0,44 * | 0,28 | -0,03 |
| Na | | | | | 1,00 | 0,01 | 0,55 ** | 0,11 | 0,37 * | 0,04 |
| NO ₃ | | | | | | 1,00 | 0,02 | -0,07 | 0,11 | -0,18 |
| SO ₄ | | | | | | | 1,00 | 0,22 | 0,36 * | -0,04 |
| PO ₄ | | | | | | | | 1,00 | 0,31 * | -0,25 |
| Cl | | | | | | | | | 1,00 | 0,02 |

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 ".".

El análisis de componentes principales (ACP) muestra que tan solo las variables K⁺ y CE tienen una agrupación específica (Figura 28), y que tan solo hasta el componente principal (CP) cuatro se alcanza una variabilidad acumulada del 72% (Tabla 27). No obstante, se presentaron diferencias multivariantes altamente significativas entre todos los factores evaluados, así como sus interacciones (Tabla 26).

Tabla 26. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados en la caracterización de lixiviados. Nivel de significancia: ("****" < 0,0001).

| Factor | Ddt | Df | Wilks | approx F | num Df | den Df | Pr(>F) | |
|---------------------|-----------|-----------|---------|----------|--------|--------|----------|-----|
| Orgánico | 7 | 2 | 0,00261 | 122,299 | 24 | 158,0 | 2,20E-16 | *** |
| Mineral | 7 | 4 | 0,00118 | 30,371 | 48 | 306,4 | 2,20E-16 | *** |
| Proporción | 7 | 2 | 0,05205 | 22,272 | 24 | 158 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min | 7 | 8 | 0,00022 | 14,126 | 96 | 542,44 | 2,20E-16 | *** |
| Org(Prop) | 7 | 4 | 0,00860 | 15,557 | 48 | 306,35 | 2,20E-16 | *** |
| Min(Prop) | 7 | 8 | 0,00276 | 7,904 | 96 | 542,44 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min:Prop | 7 | 16 | 0,00010 | 6,562 | 192 | 788,89 | 2,20E-16 | *** |
| Residuales | 7 | 90 | | | | | | |
| Orgánico | 24 | 2 | 0,00420 | 94,957 | 24 | 158,0 | 2,20E-16 | *** |
| Mineral | 24 | 4 | 0,00011 | 62,351 | 48 | 306,4 | 2,20E-16 | *** |
| Proporción | 24 | 2 | 0,09500 | 14,775 | 24 | 158 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min | 24 | 8 | 0,00017 | 14,944 | 96 | 542,44 | 2,20E-16 | *** |
| Org(Prop) | 24 | 4 | 0,07897 | 5,954 | 48 | 306,35 | 2,20E-16 | *** |
| Min(Prop) | 24 | 8 | 0,00959 | 5,614 | 96 | 542,44 | 2,20E-16 | *** |
| Org:Min:Prop | 24 | 16 | 0,00149 | 3,954 | 192 | 788,89 | 2,20E-16 | *** |
| Residuales | 24 | | | | | | | |

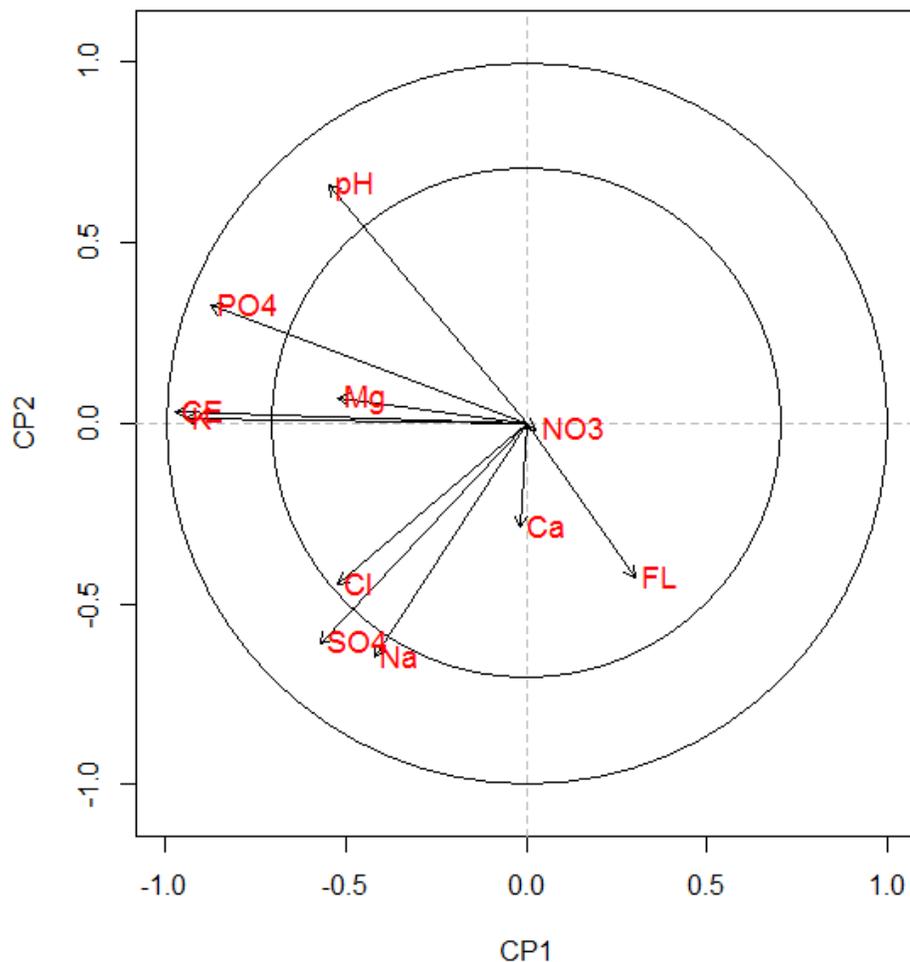


Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas en los lixiviados.

Tabla 27. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP) en la caracterización de los lixiviados. En el CP 4 de 13 se alcanzó el 72% de la variabilidad de los datos.

| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Desviación estándar | 2,0130 | 1,3604 | 1,2282 | 1,1103 |
| Proporción de varianza | 0,3377 | 0,1542 | 0,1257 | 0,1027 |
| Proporción acumulada | 0,3377 | 0,4919 | 0,6176 | 0,7203 |

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt el SC mostró la menor concentración de Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} en los lixiviados (Figura 29), lo cual concuerda con su concentración en fase soluble (Figura 7-B), mientras que la CA contenía la mayor concentración de Ca^{2+} tanto en lixiviado, como en fase soluble. No obstante, para el caso del Na^+ , aunque el SC también presenta la menor concentración en el lixiviado (Figura 29), ocurre lo contrario en la solución del sustrato, lo cual muestra cierta afinidad de este sustrato por retener Na^+ (Abad *et al.*, 2002). El SC supera notablemente a los demás materiales orgánicos en cuanto a su capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Figura 7-

D), lo que podría explicar su baja concentración de cationes en fase soluble (Figura 7-B) y en sus lixiviados (Figura 29), y la alta concentración de cationes en fase intercambiable (Figura 7-D). La cascarilla de palma (CP) presenta la tendencia contraria, menor CIC y mayor concentración de cationes en fase soluble y lixiviado (Figura 29).

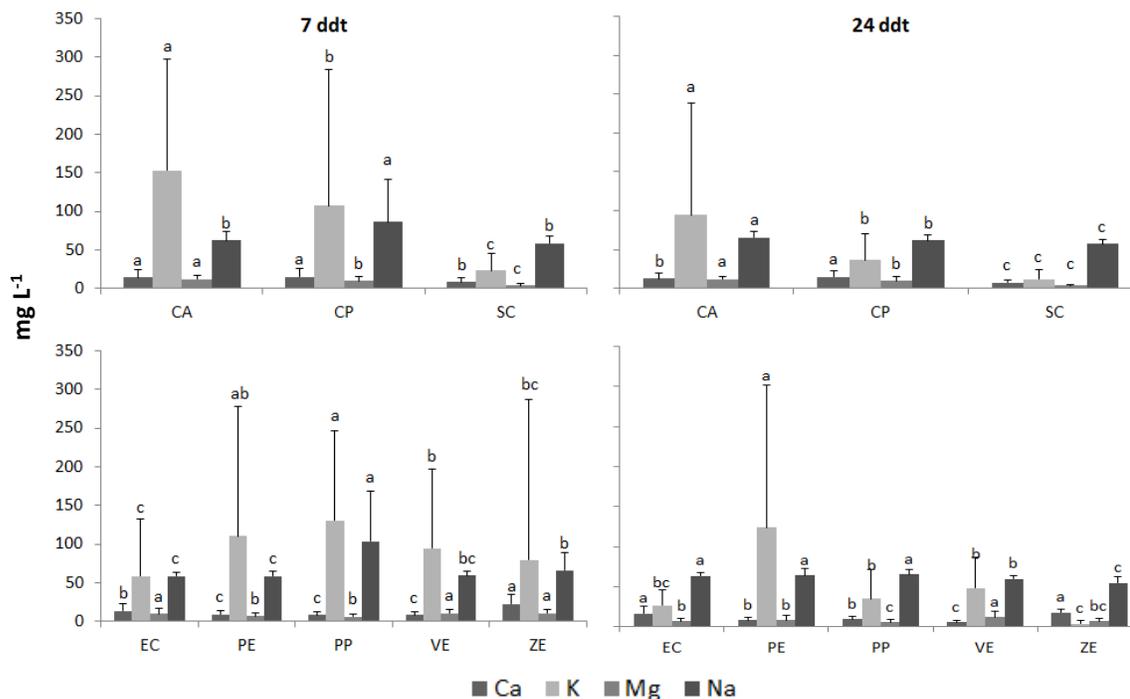


Figura 29. Concentración de cationes de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt no hay una tendencia clara, pues la ZE contenía la mayor concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que la PP contenía la mayor concentración de K^+ y Na^+ (Figura 29). No obstante, a excepción del Ca^{2+} de la ZE, esta tendencia no se presentó en la fase soluble de los sustratos de origen mineral, pues la VE presentó la mayor concentración de K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en esta fase (Figura 29). No hay una diferencia en la concentración de cationes de los 7 a los 24 ddt, como si la hubo entre los sustratos de origen orgánico. Los cambios más substanciales los presenta la ZE, debido a que a los 7 ddt generaba la mayor cantidad de Mg^{2+} en los lixiviados y a los 24 ddt ocurría lo contrario, lo cual concuerda con su concentración de Mg^{2+} en la fase soluble del sustrato, pues a los 7 ddt estaba entre los de mayor concentración (Figura 29), mientras que a los 24 ddt esta concentración disminuía (Figura 29). De igual forma, la EC mostraba a los 7 ddt la menor concentración de Na^+ , mientras que a los 24 ddt sus lixiviados contenían la mayor concentración de este catión (Figura 29).

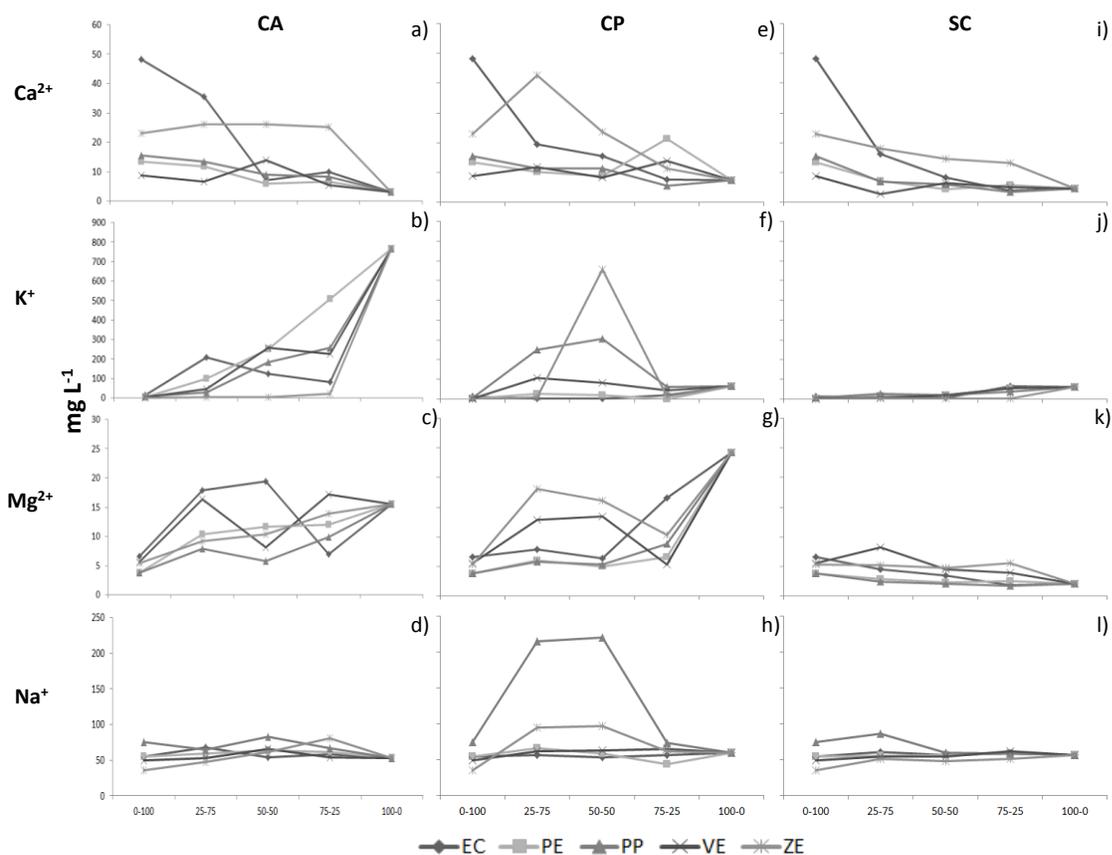


Figura 30. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la concentración de Ca²⁺ disminuye a medida que aumenta el contenido de CA en la mezcla, aunque esta situación es más marcada a los 7 que a los 24 ddt (Figura 30 y Figura 31), esto obedece a la baja concentración de Ca²⁺ de los lixiviados de la CA (Tabla 46), y en fase soluble (Tabla 36). La alta concentración de K⁺ (Tabla 46, Figura 30 y Figura 31) y SO₄ (Tabla 47) en los lixiviados de la CA podrían explicar su elevada CE. Sin embargo, esta situación se presentó a los 7 ddt (Figura 30), mientras que a los 24 ddt (Figura 31) la concentración de K⁺ disminuye notablemente, lo cual explica la disminución de la CE de la CA de los 7 a los 24 ddt. Se aprecia una leve tendencia de aumento en la concentración de Na⁺ en los lixiviados a medida que se incrementa el contenido de CA en la mezcla, que se explica por la mayor concentración de Na⁺ en fase soluble, comparado con la mayoría de los materiales de origen mineral (a excepción de la VE), lo cual ocurre tanto a los 7 (Tabla 38) como a los 24 ddt (Tabla 40). A medida que aumenta el contenido de CP en la mezcla, la concentración de Ca²⁺ en los lixiviados disminuye (Figura 30), esto se debe a que la CP tiene una menor concentración de Ca²⁺ en fase

soluble, comparado con la mayoría de materiales de origen mineral (a excepción de VE y ZE) (Tabla 38), en consecuencia, se presenta una menor concentración de Ca^{2+} en los lixiviados de aquellas mezclas que contienen un mayor contenido de CP (Tabla 46). Esta situación permanece a los 24 ddt (Figura 31), aunque de forma menos marcada. La concentración de K^+ y Na^+ permanece casi invariable a los 24 ddt a medida que aumenta el contenido de CP en los lixiviados (Figura 31), no obstante, a los 7 ddt no es tan claro el comportamiento para los cationes K^+ , Mg^{2+} y Na^+ (Figura 30). A medida que el contenido de SC aumenta en la mezcla, en los lixiviados la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} disminuye, la de K^+ se incrementa y la de Na^+ permanece casi invariable (Figura 30), lo cual obedece, a que cuando se compara la concentración de cationes en el lixiviado del SC con la de los materiales de origen mineral, se aprecia que la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} es menor, la de K^+ es mayor y la de Na^+ no presenta diferencias marcadas (Tabla 46).

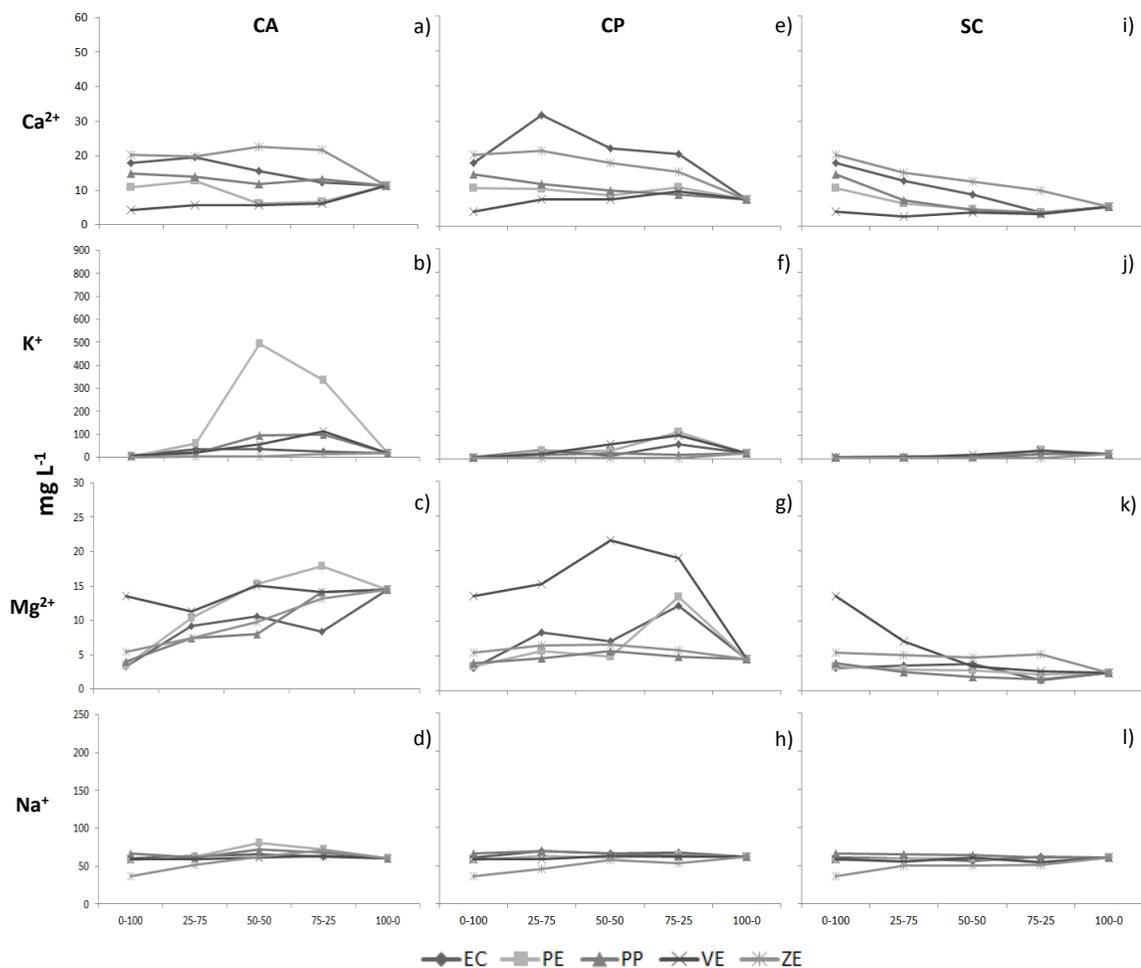


Figura 31. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

La concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos a los 24 ddt tiende a equilibrarse, independiente del contenido de material orgánico en el sustrato (Figura 31), ya que las pendientes de las curvas tienden a disminuir de los 7 a los 24 ddt (Figura 30 y Figura 31). Esta situación obedece al aumento de la generación de raíces, lo cual incrementa la cantidad de iones absorbidos por parte de las plantas, esto implica una disminución en la concentración de iones en fase soluble y en los lixiviados.

4.4.3 Concentración de aniones

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt de los tres sustratos evaluados, los lixiviados del SC tienen una mayor concentración de NO_3^- , mientras que contienen la menor concentración de SO_4^{3-} , PO_4^{2-} y Cl^- (Figura 32), contrario a lo que ocurre en fase soluble, donde el SC presenta la mayor concentración de Cl^- y SO_4^{3-} (Figura 7-B), que sugiere una mayor capacidad de intercambio aniónico, lo cual le permite retener estos aniones con mayor fuerza, comparado con la CA y la CP. Cabe aclarar, que la disminución de la concentración de todos los aniones y los cationes Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} de los 7 a los 24 ddt (Figura 32 y Figura 30, respectivamente) en los lixiviados, coincide con la disminución de su CE.

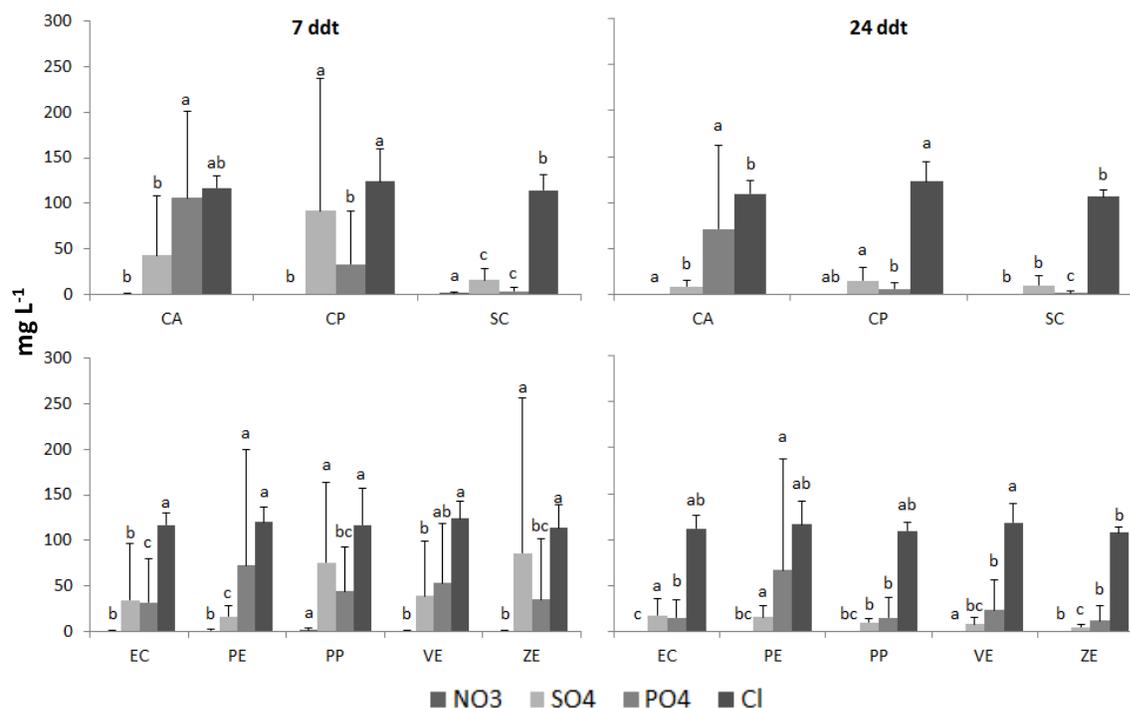


Figura 32. Concentración de aniones de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt el NO_3^- en los lixiviados estuvo por debajo de los 2 mg L^{-1} , que está dentro del rango adecuado reportado por Lu *et al.*

(2011), siendo la PP la que mayor concentración presentó (Figura 32). De igual forma, la PP mostró la mayor concentración de SO_4^{2-} y la PE la de PO_4^{3-} , en cuanto al Cl^- no se presentaron diferencias significativas (Figura 32). A los 24 ddt los aniones tampoco mostraron una tendencia clara, las principales diferencias se presentaron con la ZE, debido a que a los 7 ddt mostraba la mayor concentración de SO_4^{2-} , mientras que a los 24 ddt tenía la menor concentración, no obstante, la concentración de este anión en la fase soluble del sustrato siempre fue la menor de los cinco materiales evaluados (Figura 32).

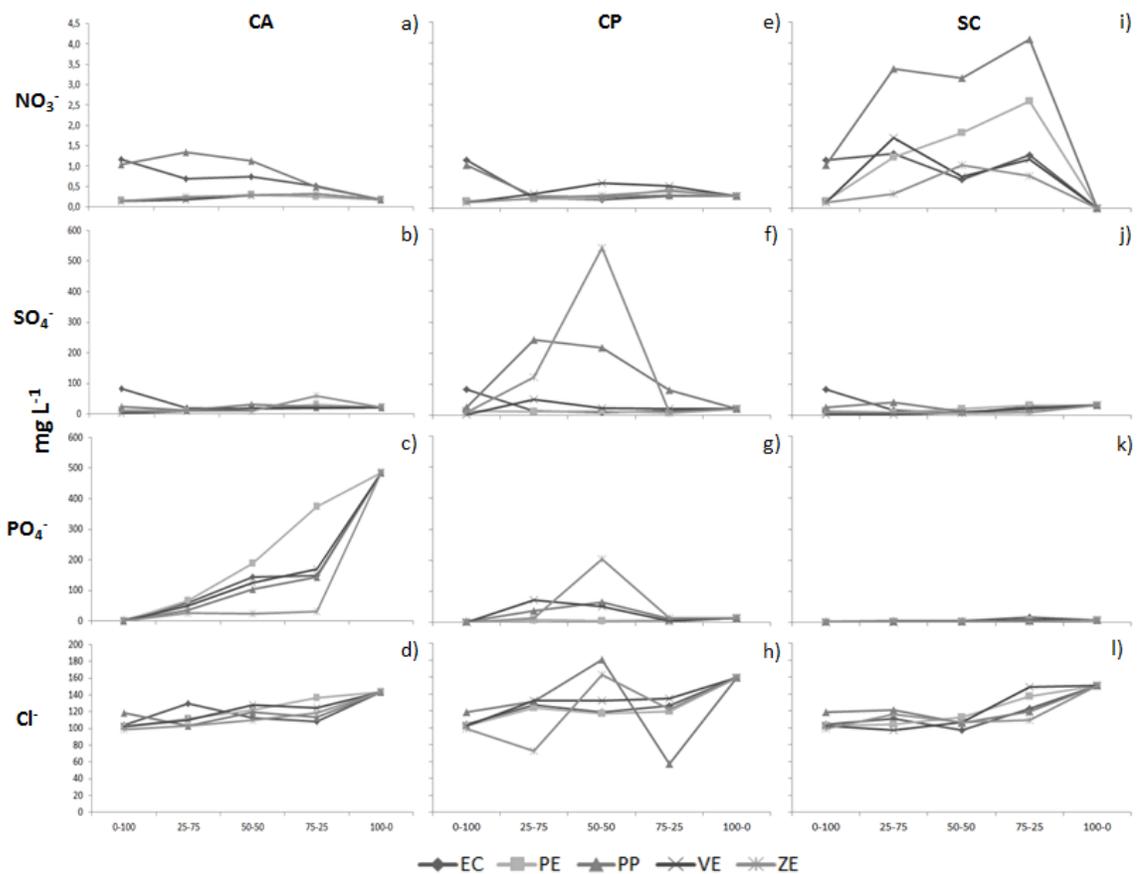


Figura 33. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que a excepción de la EC y la PP, los demás materiales de origen mineral sin mezclar mostraron la menor tendencia a perder NO_3^- mediante los lixiviados (Tabla 48), lo cual concuerda con lo mostrado en la Figura 33, donde se evidencia que a medida que se incrementa el contenido de CA en el sustrato, aumenta sutilmente la concentración de NO_3^- en el lixiviado, esto ocurre tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 33 y Figura 34, respectivamente). Todos los sustratos que tienen CA presentan la mayor concentración de PO_4^{3-} en los lixiviados (Tabla 53), que concuerda con su alta concentración en fase

soluble (Tabla 35 y Tabla 37), no obstante, esta concentración se reduce notablemente de los 7 (Figura 33) a los 24 ddt (Figura 34). Aunque a los 7 ddt la concentración de Cl^- aumenta levemente con el incremento en el contenido de CA de los sustratos (Figura 33), a los 24 ddt la concentración de este anión permanece casi invariable con las diferentes mezclas (Figura 34).

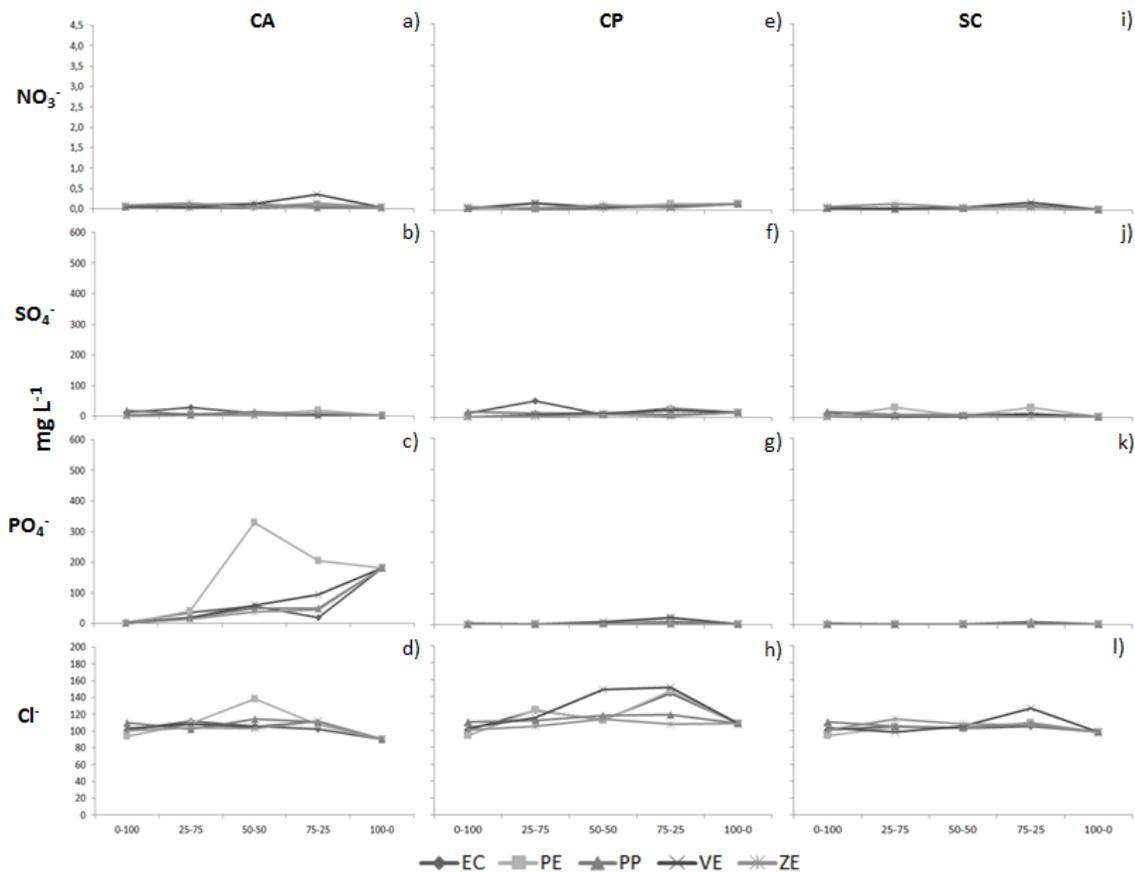


Figura 34. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

A los 7 ddt no se presentan tendencias claras que muestre una influencia notable del contenido de CP sobre la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (Figura 33), no obstante, a los 24 ddt la concentración de los aniones en los lixiviados comienza a estabilizarse hasta el punto de que no se presentan diferencias notables entre los sustratos que contienen CP (Figura 34).

Al igual que con la CP, a los 7 ddt no se evidencian tendencias claras que indiquen la influencia del contenido de SC sobre la concentración de aniones en los lixiviados de las mezclas que lo contienen (Figura 33), mientras que a los 24 ddt esta concentración tiende a estabilizarse, independientemente de la proporción de SC en la mezcla (Figura 34).

Al igual que con la concentración de cationes, la concentración de aniones de los lixiviados varía ampliamente de los 7 a los 24 ddt, como respuesta al incremento de la absorción de nutrientes que la planta genera en este lapso de tiempo, provocado por el aumento del área radicular.

4.4.4 Fracción lixiviada

Los materiales que presentaban una mayor fracción lixiviada (FL) a los 7 ddt, se mantuvieron a los 24 ddt, siendo la EC100 la de mayor y CP_PE la de menor FL (Tabla 53). La CA100, que es el tratamiento testigo, es uno de los que tiene menor FL (Tabla 47 y Tabla 48), lo que junto a la mayor CE ($2,4 \text{ dS m}^{-1}$) y pH (9,2), podría indicar una tendencia a acumular sales.

Para el factor “material orgánico”, a los 7 ddt la CA presentó el mayor porcentaje de FL (Figura 35), probablemente en respuesta a haber sido quemada al 80%, lo cual incrementó notablemente su capacidad para retener agua, por ende, disminuyó su FL. De igual forma, a los 24 ddt la FL mantiene su tendencia, donde la CA es la que menos lixiviados genera, seguida por el SC (Figura 35). No obstante, aunque esta baja FL indica una menor generación de lixiviados, también puede implicar una mayor tendencia a la salinización del sustrato (Kafkafi, 2008).

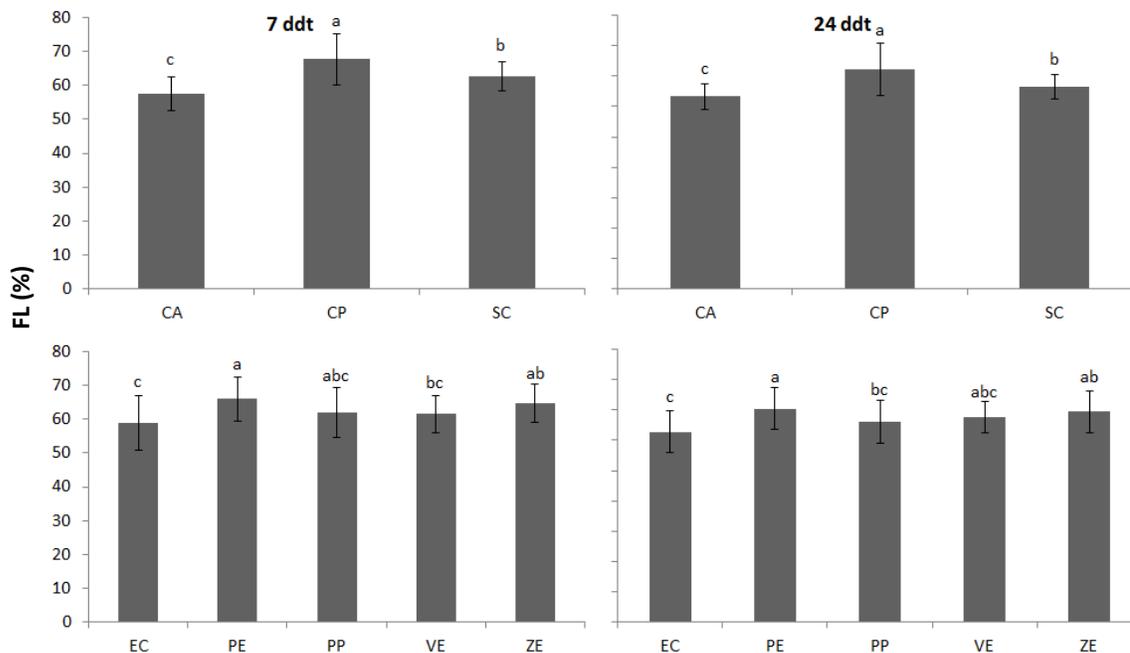


Figura 35. Comparación de la fracción lixiviada (FL) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

A los 7 ddt Todos los materiales de origen mineral presentan una FL menor al 70%, no obstante, la EC y la VE presentaron la menor FL, que indica que estos sustratos tienen una mayor capacidad de retención de humedad (Figura 35). Aunque la FL aumentó de

los 7 a los 24 ddt para todos los sustratos, la tendencia entre estos se mantuvo casi intacta, pues la EC presentaba la menor FL, mientras que la PE mostraba la mayor, lo cual se presentó a los 7 y a los 24 ddt (Figura 35).

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se aprecia que a los 7 ddt no hay efecto del contenido de CA sobre la FL del sustrato, no obstante, a los 24 ddt la FL tiende a reducirse a medida que aumenta la proporción de CA en la mezcla (Figura 36), como respuesta a un aumento en la capacidad de retención de humedad de los sustratos que contienen CA. A diferencia de la CA, los sustratos con CP aumentaban su fracción lixiviada a medida que se incrementaba la proporción de esta en la mezcla, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 36). Esto obedece a que la CP tiene una alta FL, por ende, una baja capacidad de retención de humedad (Tabla 49). La FL de las mezclas que contienen SC tiende a permanecer invariable a medida que aumenta la proporción de SC en la mezcla, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 36). Esto debido a que la FL del SC y de los materiales de origen mineral es similar (Tabla 47 y Tabla 51).

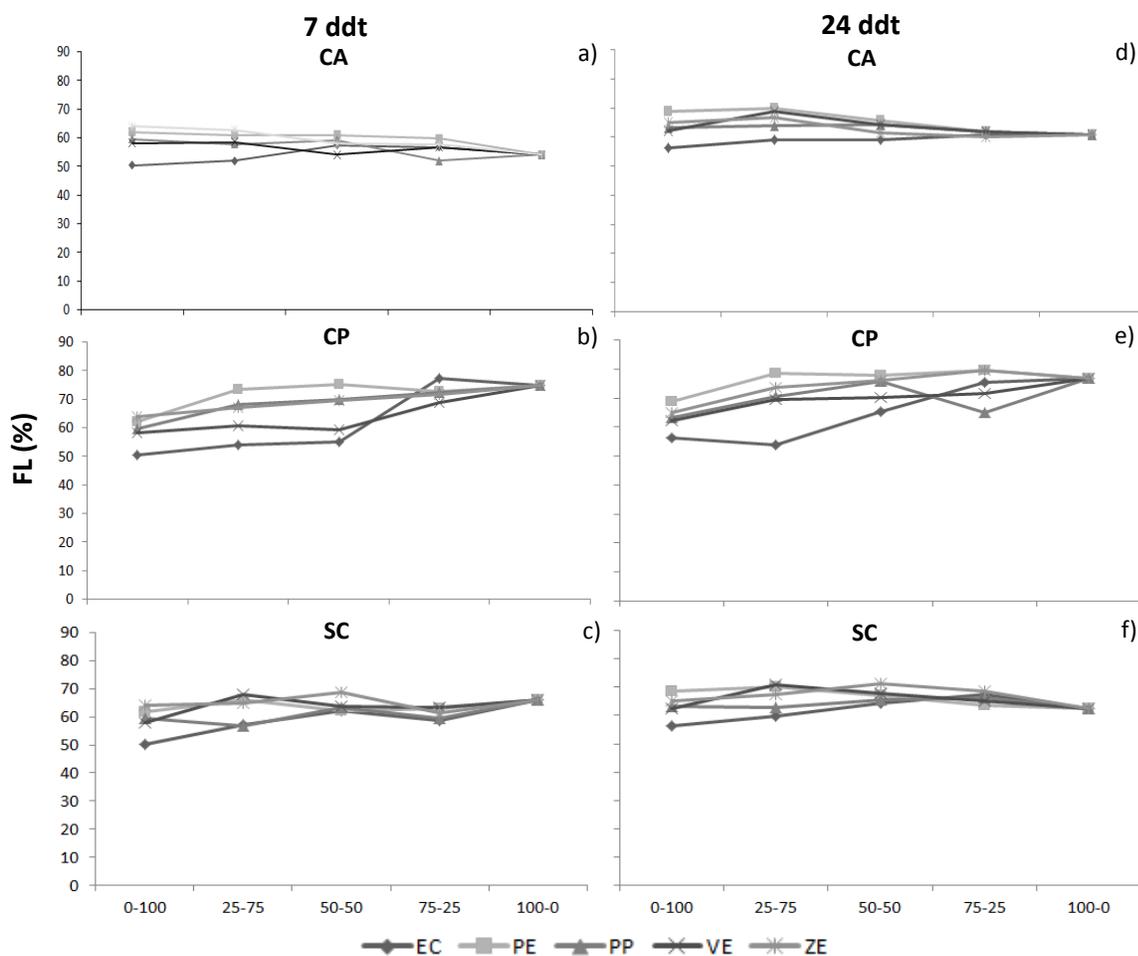


Figura 36. Fracción lixiviada (FL) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

4.5 Conclusiones

Los sustratos que contienen cascarilla de arroz quemada muestran una tendencia a acumular sales, indicada por su alta conductividad eléctrica y baja fracción lixiviada, pues tradicionalmente, el exceso de sales se disminuye por medio del proceso de lixiviación. Y aunque la conductividad eléctrica se encuentra en niveles aún adecuados, es necesario tener en cuenta que la caracterización de los lixiviados se realizó en sustratos a los cuales no se les había aplicado soluciones fertilizantes; al fertilizar está va aumentar significativamente, lo cual debe tenerse en cuenta en programas de riego y fertilización.

Se presenta una alta correlación entre la concentración de potasio y fosfato, y entre estos y la conductividad eléctrica y el pH, tanto en los lixiviados como en la fase soluble de los sustratos, lo que sugiere que estos iones están generando la acumulación de sales de fosfato de potasio.

No se presentaron concentraciones importantes de nitratos en los lixiviados, lo que sugiere que los materiales evaluados no liberan este anión en cantidades que puedan ser nocivas para el ambiente.

Se aprecian diferencias notables entre la concentración de iones de los lixiviados, de los 7 a los 24 ddt, tendiendo a disminuir y equilibrarse su concentración a los 24 ddt, independiente de los materiales que contienen la mezcla. Esto se puede explicar por el hecho de que a medida que la planta crece genera una mayor cantidad de raíces, lo que aumenta su absorción, por consiguiente, la concentración de iones disminuye en la fase soluble de los sustratos y esto genera una disminución de la cantidad de iones descargada en los lixiviados.

5. Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos.

5.1 Resumen

Se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75, sobre el porcentaje de prendimiento de raíces, la ganancia de peso fresco de raíces (Pf. Raíz) y brotes (Pf. Aérea) y la concentración de macro y micronutrientes de esquejes de clavel. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado (3X5X(3)+8), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). El porcentaje de prendimiento fue del 100% en todos los sustratos evaluados. Aunque se presentaron diferencias en cuanto a la concentración de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn y B) en tejido vegetal, no hubo una correlación significativa entre esta concentración y el Pf. Raíz. Los esquejes ganaron mayor Pf. Raíz en aquellas mezclas con SC, mientras que la CP no presentó diferencias significativas con la CA, por lo que la CP se muestra como un material promisorio para ser utilizado en sistemas de cultivo sin suelo. Los materiales de origen mineral no mostraron una tendencia que evidenciara una influencia clara de algún material en particular, sobre el Pf. Raíz. Los sustratos que generaron un mayor Pf. Raíz, mostraron adecuadas relaciones iónicas N/P, N/S, N/K, C/K y Ca/B y Mg/Mn.

Palabras Clave: cultivo sin suelo, escoria de carbón, perlita, piedra pómez, vermiculita y zeolita.

Abreviaciones:

| | |
|------------|---------------------|
| CSS | Cultivo sin suelo |
| CA | Cascarilla de arroz |
| CP | Cascarilla de palma |
| SC | Sustrato de coco |
| EC | Escoria de Carbón |
| PE | Perlita |
| PP | Piedra Pómez |
| VE | Vermiculita |
| ZE | Zeolita |

5.1 Introducción

La absorción de nutrientes por las plantas puede verse afectado por las propiedades químicas de los sustratos o los constituyentes de los mismos, ya que estos contienen nutrientes que pueden estar disponibles para las raíces y las fluctuaciones de pH puede condicionar su movilización o inmovilización (Sonnevel y Voogt, 2009). Según Benton (2005), el proceso de absorción de elementos por las plantas que crecen en sustratos orgánicos, tales como sustrato de coco y turba, ocurrirá de manera similar que en el suelo, donde los principios de flujo de masa, difusión y extensión de raíces afectarán significativamente su crecimiento. Así mismo, las plantas que crecen en sustratos inorgánicos como vermiculita, zeolita o arcillas expansivas, las cuales tienen capacidad de intercambiar cationes, también actuarán de forma similar a las plantas que crecen en suelo (Benton, 2005).

Tabla 28. Niveles de nutrientes (en base seca) reportados para clavel en la sabana de Bogotá. Fuente: Ortega (1997).

| Elemento | Deficiencia | Normal | Óptimo | Exceso |
|----------------------------------|-------------|------------|--------|--------|
| N (%) | < 3,0 | 3,2 - 5,2 | 4,2 | > 5,26 |
| P (%) | < 0,15 | 0,2 - 0,35 | 0,25 | > 0,36 |
| K (%) | < 2,0 | 2,5 - 6,3 | 4 | > 6,3 |
| Ca (%) | < 0,6 | 1,0 - 2,0 | 1,5 | > 2,1 |
| Mg (%) | < 0,15 | 0,25 - 0,5 | 0,38 | > 0,56 |
| Mn (mg Kg ⁻¹) | < 30 | 100 - 300 | 200 | > 800 |
| Fe (mg Kg ⁻¹) | < 30 | 50 - 150 | 100 | > 200 |
| B (mg Kg ⁻¹) | < 25 | 40 - 80 | 60 | > 100 |
| Mn (mg Kg ⁻¹) | < 5 | 8 - 30 | 20 | > 36 |
| Zn (mg Kg ⁻¹) | < 15 | 25 - 75 | 50 | > 80 |

En Colombia, el clavel (*Dianthus caryophyllus*) se siembra casi exclusivamente en CSS, debido a que los productores han enfrentado una compleja problemática de índole fitosanitaria, no solo por la alta incidencia del hongo *Fusarium oxysporum*, sino también por la presencia de nematodos, sinfílidos y colémbolos, así como los altos costos ocasionados por la adecuación de los terrenos afectados por estos patógenos (tratamientos de desinfección de suelo) (Cárdenas *et al.*, 2006). Como sustrato para el cultivo de clavel en CSS se ha utilizado casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA), debido a su amplia disponibilidad y bajo costo. No obstante, las áreas sembradas en este sistema y para este cultivo, están creciendo¹⁴ y la disponibilidad de CA está disminuyendo¹⁵. Debido a esto, en Colombia se han desarrollado investigaciones con diferentes materiales, tales como sustrato de coco, escoria de carbón y zeolita,

¹⁴ Existen aproximadamente 5000 ha sembradas en rosa, y aproximadamente 500 de esas 5000 en sustrato. Cada año más fincas de producción de rosa trasladan su producción de rosa en suelo a sustrato (Asocolflores, 2013).

¹⁵ Debido a los TLCs se está viendo amenazada la producción de arroz en Colombia (Quintero, 2013).

mezclados en diferentes proporciones entre ellos, o mezclados con CA, obteniendo resultados satisfactorios (Flórez *et al.*, 2006; Ulloa *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2006; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Monsalve *et al.*, 2009; Peña *et al.*, 2009; Petitt, 2011). En la Tabla 28 se pueden apreciar los niveles óptimos de nutrientes en el tejido vegetal de la planta de clavel, así como sus relaciones catiónicas óptimas en la Tabla 29.

Con base en lo anterior, se define como objetivo del presente capítulo, identificar los sustratos más promisorios, en función de la respuesta en establecimiento, crecimiento y concentración de nutrientes de esquejes de clavel.

5.1 Materiales y Métodos

La localización, material vegetal, diseño experimental y de tratamientos fue el mismo establecido en el capítulo 2. Como complemento, cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel, recubierta con plástico perforado en la parte inferior, depositada sobre otra canastilla lisa, donde se descargaron los lixiviados (Figura 5).

Tabla 29. Relaciones catiónicas óptimas en tejido vegetal de clavel, establecidas para los elementos expresados en mg Kg⁻¹. Fuente: Medina, 2006.

| Relación | Intervalo |
|----------|-------------|
| N/P | 7 - 13 |
| N/S | 7 - 15 |
| N/K | 0,7 - 1,4 |
| N/Cu | 3400 - 4600 |
| P/S | 0,7 - 1,8 |
| P/Zn | 18 - 52 |
| K/Mg | 6 - 12 |
| K/Na | 10 - 60 |
| Ca/K | 0,2 - 0,9 |
| Ca/Mg | 3,5 - 5,8 |
| Ca/Mn | 50 - 180 |
| Ca/B | 210 - 590 |
| Ca/Na | 4 - 30 |
| Mg/Mn | 10 - 45 |
| Fe/Mn | 0,5 - 1,5 |
| Fe/Cu | 0,5 - 2,6 |
| Fe/Zn | 9 - 25 |

Con el fin de determinar cuál o cuáles sustratos generaron un adecuado crecimiento de los esquejes de clavel, cuando se cumplió su ciclo de enraizamiento, se evaluó:

- Porcentaje de prendimiento, extrayendo de cada UE 10 esquejes, de esta forma se determinó cuantos de estos esquejes se enraizaron satisfactoriamente al

sustrato. Cada esqueje enraizado, de los 10 extraídos, representaba el 10%. Al final se sumó la cantidad de esquejes enraizados y se obtuvo el porcentaje de prendimiento.

- Peso fresco de raíz (Pf. Raíz) y peso fresco de parte aérea (Pf. Aérea), dividiendo los esquejes entre brotes y raíces y pesándolos inmediatamente después de extraídos de los bancos de enraizamiento.
- Se determinó en tejido foliar el contenido de N total, con el método micro-Kjeldahl y valoración volumétrica; P total por Calcinación a 475°C y valoración colorimétrica con molibdato y vanadato de amonio; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn totales con calcinación a 475°C y valoración por espectrofotometría de absorción atómica; S total por incineración con nitrato de magnesio y turbidimetría; y B total, con calcinación a 475°C y valoración colorimétrica con azometina-H.

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

5.2 Resultados y Discusión

5.2.1 Porcentaje de prendimiento y peso fresco de brotes y raíz

Tabla 30. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001); (“***” 0,001); (“**” 0,01); (“.” 0,05).

| FACTOR | Df | Wilks | approx F | num Df | den Df | Pr(>F) | |
|--------------|----|--------|----------|--------|--------|---------|-----|
| Orgánico | 2 | 0,0038 | 83,46500 | 28 | 154 | 0,0 | *** |
| Mineral | 4 | 0,0054 | 15,24100 | 56 | 301,69 | 0,0 | *** |
| Proporción | 2 | 0,1416 | 9,11700 | 28 | 154 | 2,2E-16 | *** |
| Org:Min | 8 | 0,0038 | 5,98100 | 112 | 551,59 | 2,2E-16 | *** |
| Org(Prop) | 4 | 0,0427 | 6,73400 | 56 | 301,69 | 2,2E-16 | *** |
| Min(Prop) | 8 | 0,0026 | 6,56900 | 112 | 551,59 | 2,2E-16 | *** |
| Org:Min:Prop | 16 | 0,0004 | 4,14600 | 224 | 847,79 | 2,2E-16 | *** |
| Residuales | 90 | | | | | | |

Todos los esquejes se anclaron a los sustratos evaluados, es decir, hubo un porcentaje de prendimiento del 100%. Además, una vez finalizó el ciclo de propagación, estos

mismos esquejes fueron trasplantados a su sitio de producción definitivo, lo cual indica que los materiales, mezclas y proporciones evaluados, fueron viables para ser utilizados como medio de propagación de esquejes de clavel.

Aunque las variables evaluadas tienen un efecto multivariante sobre la respuesta de los esquejes de clavel sembrados en diferentes mezclas de sustratos de origen orgánico y mineral, y sus interacciones (Tabla 30), la matriz de correlación (Tabla 32) no muestra tendencias claras, lo que se puede corroborar con el análisis de componentes principales (ACP), donde los dos primeros componentes principales (CP), tan solo representan el 39% de la variabilidad total de los datos, y solo hasta el cuarto CP se obtiene más del 60% de esta variabilidad (Tabla 33).

Tabla 31. Variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel al momento de la siembra en sustratos. Pf. Aérea = Peso fresco de parte aérea (brotes); Pf. Raíz = Peso fresco de raíz.

| Pf Aérea | Pf Raíz | N | P | K | Ca | Mg | S | Fe | Cu | Mn | Zn | B |
|----------|---------|------|------|------|------|------|------|-------|---------------------|-------|-------|-------|
| g | | % | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | |
| 5,50 | 0,00 | 4,41 | 0,68 | 5,23 | 1,02 | 0,42 | 0,15 | 134,0 | 9,0 | 269,0 | 375,0 | 232,0 |

El peso fresco de parte aérea (Pf. Aérea) y peso fresco de raíz (Pf. Raíz) no presentaron correlación (Tabla 32), debido a que en la etapa evaluada la planta prácticamente no tiene crecimiento de brotes, no hay una ganancia de peso importante en la parte aérea, con un promedio de 5,5 g antes de ser trasplantados (Tabla 31) y de 5.9 g al final del ciclo de enraizamiento, lo que indica que en los 24 días del ciclo tan solo ganaron 0,4 g de peso, mientras que el crecimiento de raíces es notable, pues las plantas se concentran en producir raíces, las cuales, ausentes al momento de la siembra, al finalizar el ciclo de enraizamiento alcanzaron un peso fresco promedio de 6,2 g.

Tabla 32. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel evaluados.

| | Pf Aérea | Pf Raíz | N | P | Ca | K | Mg | S | Na | Fe | Cu | Mn | Zn | B |
|----------|----------|---------|------|-------|---------|---------|-------|--------|-------|---------|---------|---------|-------|----------|
| Pf Aérea | 1,00 | 0,03 | 0,14 | 0,15 | 0,10 | 0,20 | -0,02 | 0,23 | 0,08 | -0,15 | 0,07 | 0,11 | 0,11 | 0,02 |
| Pf Raíz | | 1,00 | 0,09 | -0,09 | 0,08 | -0,06 | 0,06 | 0,07 | -0,15 | 0,08 | -0,20 | -0,19 | -0,20 | -0,23 |
| N | | | 1,00 | 0,24 | 0,48 * | 0,17 | 0,01 | 0,49 * | 0,15 | 0,09 | 0,14 | 0,32 * | -0,18 | -0,14 |
| P | | | | 1,00 | 0,62 ** | 0,53 ** | 0,21 | 0,48 * | -0,05 | -0,45 * | -0,19 | 0,07 | 0,16 | -0,01 |
| Ca | | | | | 1,00 | 0,45 * | 0,22 | 0,46 * | -0,14 | -0,41 * | -0,29 | 0,05 | 0,01 | -0,01 |
| K | | | | | | 1,00 | 0,06 | 0,30 | 0,00 | -0,31 | -0,13 | 0,17 | 0,21 | 0,09 |
| Mg | | | | | | | 1,00 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | -0,06 | 0,05 | 0,13 | 0,17 |
| S | | | | | | | | 1,00 | 0,07 | -0,03 | -0,02 | -0,01 | -0,01 | -0,06 |
| Na | | | | | | | | | 1,00 | 0,18 | 0,51 ** | 0,50 ** | -0,01 | 0,15 |
| Fe | | | | | | | | | | 1,00 | 0,37 | 0,17 | -0,11 | -0,01 |
| Cu | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,58 ** | -0,08 | 0,11 |
| Mn | | | | | | | | | | | | 1,00 | -0,05 | 0,14 |
| Zn | | | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,70 *** |
| B | | | | | | | | | | | | | | 1,00 |

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 ".".

Tabla 33. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 14 se alcanzó el 62% de la variabilidad de los datos.

| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Desviación estándar | 1,7516 | 1,5532 | 1,4120 | 1,0968 |
| Proporción de varianza | 0,2192 | 0,1723 | 0,1424 | 0,0859 |
| Proporción acumulada | 0,2192 | 0,3915 | 0,5339 | 0,6198 |

De los 53 sustratos evaluados, los diez que promovieron una mayor ganancia de masa fresca de raíces (Pf. Raíz), fueron: SC50-VE50 (9,63 g); CA50-PE50 (9,17g); SC50-PP50 (8,83g); VE100 (8,37g); SC25-PE75 (8,23g); CA25-ZE75 (8,20g); SC25-PP75 (8,00g); CP50-PE50 (7,77g); SC50-PE50 (7,63g); CP25-PP75 (7,60g). Por otro lado, los diez sustratos que mostraron el efecto contrario sobre la ganancia de masa fresca de raíces fueron: CA50-EC50 (2,93 g); PP100 (3,30g); CP75-EC-25 (3,30g); CA50-ZE50 (3,40g); CP25-ZE75 (4,07g); CA25-PP75 (4,23g); CA50-PP50 (4,37g); CP50-VE50 (4,47g); CA75-EC25 (4,50g) y CA100 (4,5g) (Tabla 54). Aunque los resultados presentados en la Tabla 54 no mostraron una tendencia clara, que indicara cual combinación de sustratos (orgánico y mineral) en sus diferentes proporciones ejercía una mayor influencia sobre la ganancia de peso fresco de las raíces, en la Tabla 55 se puede evidenciar, que sin tener en cuenta el factor proporción, los mejores sustratos fueron: VE100, SC-PP, SC-PE y SC-VE, seguidos por PE100, CA-PE, SC-EC, SC-ZE.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de SC influencia la ganancia de masa fresca de raíces, pues un número considerable de sus combinaciones con materiales de origen mineral mostraron los mejores resultados (Figura 39). Muchos autores han demostrado las ventajas del uso de SC sobre el crecimiento de plantas sembradas en él (Ansorena, 1994; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Pettit, 2011), lo cual corrobora lo hallado. De igual forma, el SC tiene una alta capacidad de retención de humedad (Tabla 15), que facilita la expansión de raíces y la absorción de nutrientes.

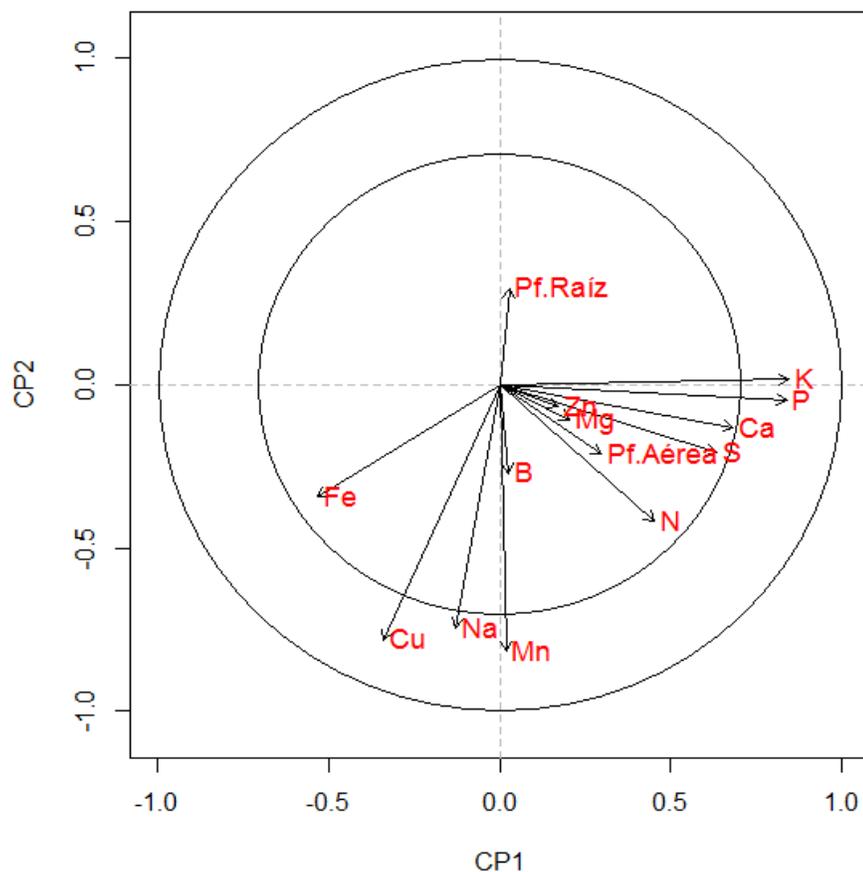


Figura 37. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).

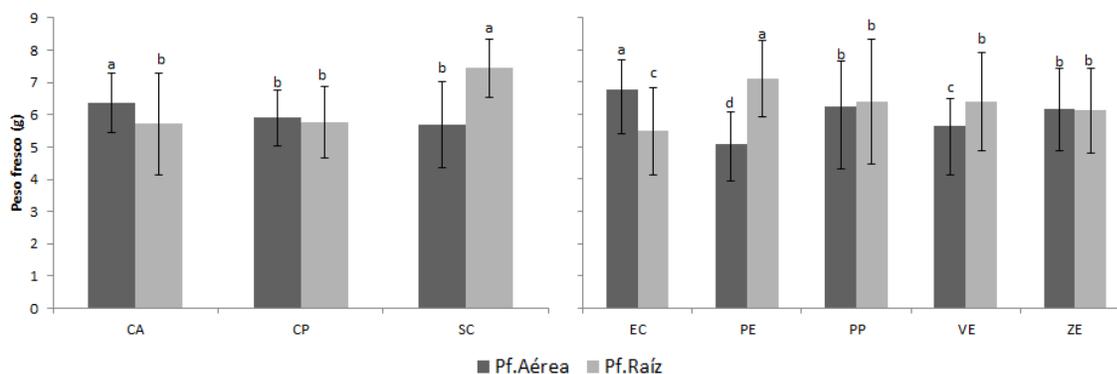


Figura 38. Peso fresco de parte aérea (Pf.Aérea) y de raíz (Pf.Raíz) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

En cuanto a los materiales de origen mineral, en promedio los esquejes sembrados en PE obtuvieron el mayor Pf.Raíz (Figura 38), aunque la tendencia no es tan clara como el SC, ya que materiales como VE y PP también influenciaron positivamente esta variable

(Figura 38). Esto se corrobora con la concentración de elementos mayores de la PE (Figura 40).

Es conveniente prestarle atención al hecho de que, en cuanto a generación y crecimiento de raíces, las plantas sembradas en cascarilla de palma (CP) no presentaron diferencias significativas con aquellas que crecieron en CA (Figura 38), lo que puede estar direccionando a la CP como un material muy promisorio.

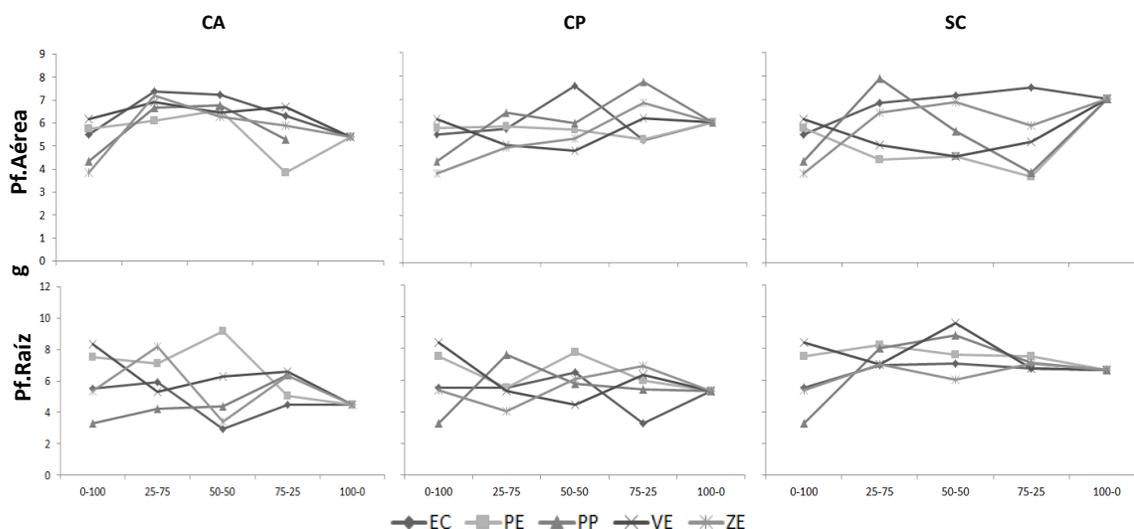


Figura 39. Peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y peso fresco de raíz (Pf. Raíz) de las pantas sembradas en CA, CP y SC mezclada en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

5.2.2 Concentración de elementos mayores en tejido vegetal

Las variables Pf. Aérea y Pf. Raíz presentan correlaciones muy débiles con la concentración de nutrientes en el tejido vegetal (Tabla 32). Con estos resultados no se podría afirmar que el crecimiento de los brotes de los esquejes de clavel se debe o está influenciado por la concentración de algún nutriente en particular. Sin embargo, el N presentó una correlación significativa de forma positiva con el S (0,49) y Ca (0,48). White (2012) afirma, que el S presenta sinergismo con el ion NH_4^+ , lo que facilita su movilización dentro de la planta. El N presenta sinergismo con el Ca, pues la absorción de uno de ellos potencializa la absorción del otro, ya que según White (2012), el Ca se moviliza dentro de la planta acompañado del ion NO_3^- . La correlación entre el P y el Ca es positiva, lo cual no refleja el antagonismo reportado entre estos dos elementos, por la formación de complejos entre el P y el Ca que precipitan, provocando su inmovilización en la raíz (Neuman y Römheld, 2012), en este caso pareciera como si se comportaran de forma sinérgica. No obstante, aunque en el tejido vegetal los nutrientes estén inmóviles, por ejemplo, en forma de oxalato de Ca en las paredes celulares (Hawkesford *et al.*, 2012), el método de determinación del elemento permite cuantificar su concentración independientemente de su estado de movilidad dentro de la planta. El K también presenta una correlación significativa con el Ca, aunque estos dos iones presentan antagonismo debido a su competencia por los sitios de cambio generados por los grupos

carboxilo (COOH⁻) en las paredes celulares. En este caso, el hecho de que el Ca inmóvil también se pueda medir, implica que su concentración se correlacione con la del K.

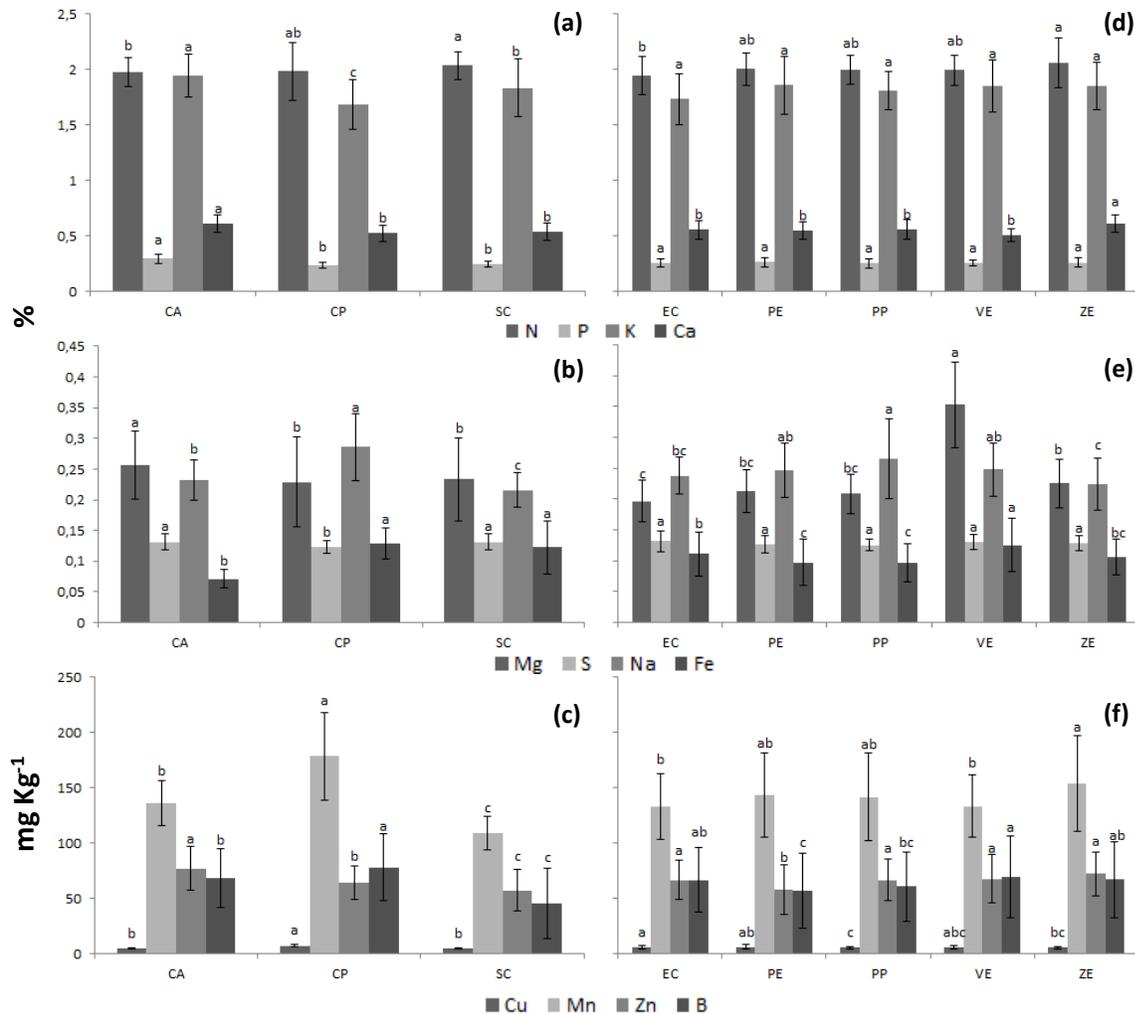


Figura 40. Concentración de N, P, K, Ca, (a y d); Mg, S, Na y Fe (b y e) y Cu, Mn, Zn y B (c y f) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Al igual que en la matriz de correlación, tan solo se evidencian correlaciones aisladas y puntuales entre el K y el P en la combinación CP1–CP2 (Figura 37). Lo más notable del ACP es que el Pf.Raíz no tiene cercanía ni correlación evidente con la concentración de ningún nutriente, lo que indica que la generación y crecimiento de las raíces de esquejes de clavel en etapa de vivero no depende de la disponibilidad ni absorción de un nutriente en particular, se debe más a la acción conjunta de todos los elementos esenciales. Cabe recordar, que en esta etapa no se realiza aporte de nutrientes mediante fertilización, que pueda estimular la absorción de uno o varios nutrientes sobre los demás.

Como ya se mencionó anteriormente, de los materiales de origen orgánico, el sustrato de coco (SC) generó el mayor crecimiento de raíces (Figura 38), este efecto se atribuye a la

óptima absorción de elementos mayores y secundarios (N, P, K, Ca, Mg y S) (Figura 40), ya que las plantas que crecieron en mezclas con SC presentaron la mayor concentración de N, y tuvieron un rango medio de absorción de P, K, Ca y Mg, lo que pudo incidir en la mayor generación de raíces (Figura 40). No obstante, cabe aclarar que el hecho de que se presente la mayor concentración de uno o un grupo de nutrientes en el tejido vegetal, no indica que el estado nutricional de la planta sea el óptimo, pues existen interacciones, antagonismos y sinergismos entre nutrientes, que podrían ejercer un efecto positivo o negativo en el desarrollo de la planta (Tabla 29). Si se comparan los niveles óptimos en tejido vegetal para plantas de clavel presentados en la Tabla 28, con los del sustrato SC50-VE50, que obtuvo el mayor Pf.Raíz, de los elementos mayores y secundarios, tan solo el P (0,25%) se encuentra dentro del rango adecuado (0,2 a 0,35%).

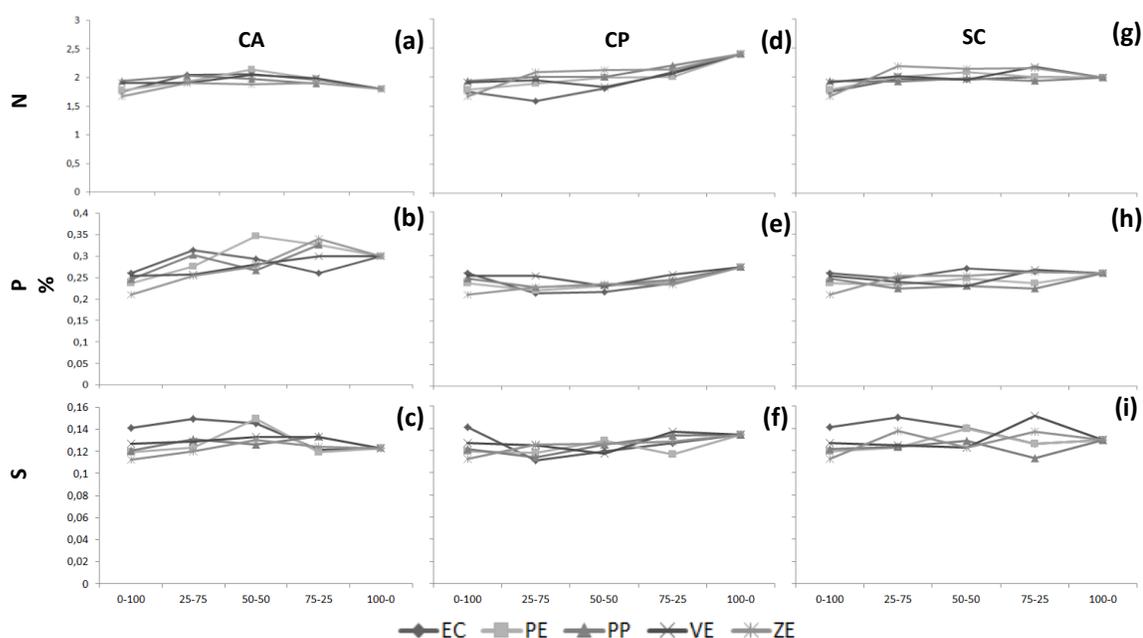


Figura 41. Concentración de N, P y S del tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

La PE presentó una de las mayores acumulaciones de Na en tejido vegetal, lo que pudo influir sobre la baja acumulación de Mg y media acumulación de Ca, comparado con los demás materiales de origen mineral (Figura 40).

Aunque se evidencia que a medida que aumenta el contenido de CP en el sustrato, también lo hace la concentración de N en el tejido vegetal (Figura 41) y que los esquejes propagados en los sustratos CP100, CP75-PP25 y SC25-EC75 contienen la mayor concentración de N (Tabla 56), estos no corresponden con los de mayor Pf.Raíz (Tabla 54), aun cuando es bastante aceptado que el crecimiento vegetativo, así como la producción de raíces de la mayoría de las especies de plantas está influenciado notablemente por el aporte de N.

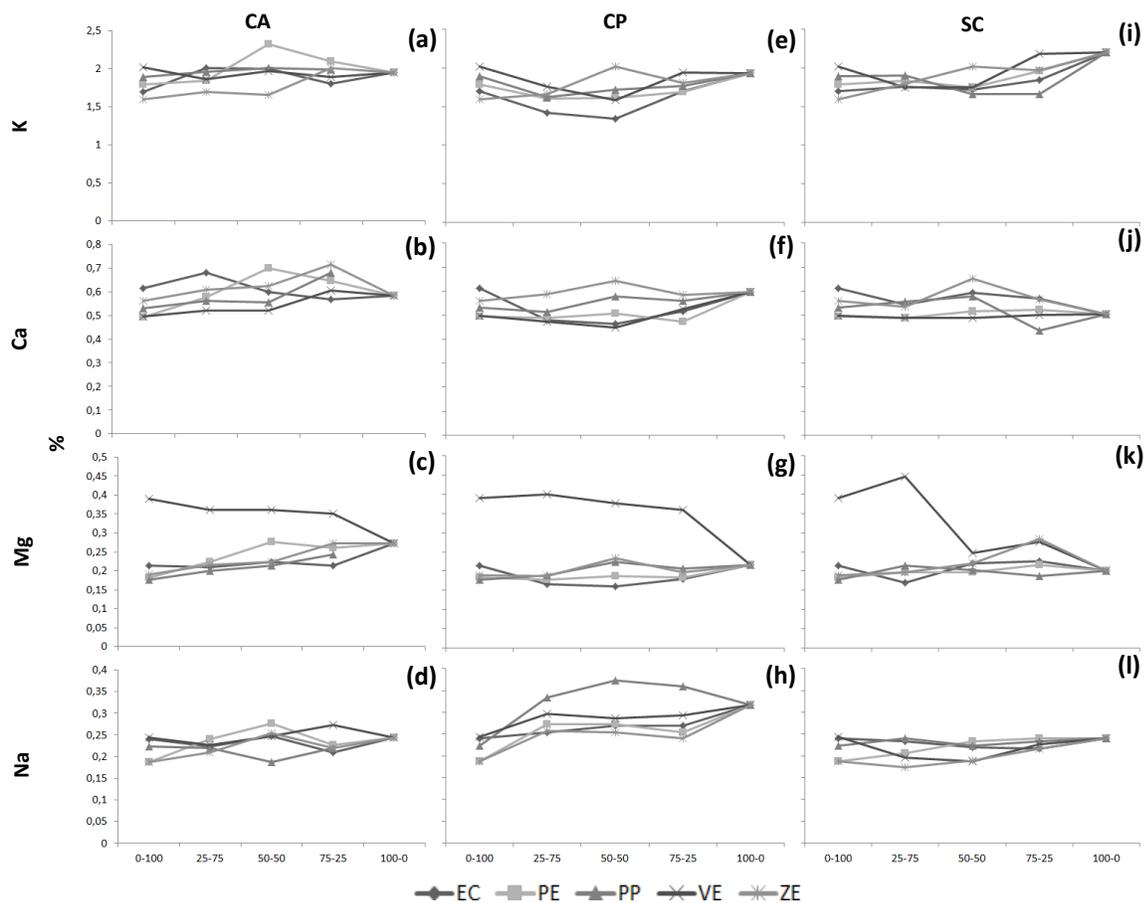


Figura 42. Concentración de cationes intercambiables en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

Cuando se compara la variable Pf.Raíz con la concentración de nutrientes a partir de los sustratos sin tener en cuenta el factor proporción (Tabla 57), se puede evidenciar, que aunque los sustratos con mayor Pf.Raíz (Tabla 55) no son al mismo tiempo los que contienen exactamente la mayor concentración de nutrientes, estos sustratos si se encuentran en las posiciones superiores de la prueba de comparación de Tuckey¹⁶ para los nutrientes N, P, K, Ca y Mg, es decir, si se encuentran dentro de los que mayor concentración de estos nutrientes tiene en tejido vegetal. Esto se puede vislumbrar con mayor facilidad en los sustratos sin tener en cuenta la proporción (Tabla 57), que en aquellos con el factor proporción incluido en la prueba de comparación (Tabla 56). Por tal

¹⁶ En la prueba de comparación de Tuckey, los valores más altos se asocian con las primeras letras del alfabeto y a sus combinaciones, por ejemplo "a", "ab", "abc", "bc", etc. Entre más alejados estén de estas letras, menor será el valor de la variable estudiada. También cabe recordar, que valores con la misma letra no presentan diferencias significativas al alfa establecido previamente.

razón, se puede inferir que el origen de los materiales incluidos en el sustrato tiene una mayor influencia sobre el desarrollo de las plantas, que su proporción en la mezcla.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, de los cationes intercambiables, sobresale la alta concentración de Mg en el tejido vegetal de las plantas que crecieron en sustratos con VE combinado con los tres sustratos de origen orgánico (Figura 42-c, g y k), lo cual concuerda con la alta concentración de este catión tanto en la fase intercambiable (Tabla 36), como en la fase soluble de la VE (Tabla 38). De igual forma, las plantas que crecieron en sustratos que contienen una alta proporción de SC dentro de la mezcla (> 75%) presentan un alto porcentaje de K (Figura 42-a, e y i), que concuerda con la alta concentración de este catión en su fase intercambiable (Tabla 44). Sin embargo, aunque de los sustratos de origen orgánico la CA contiene la mayor concentración de K, tanto en fase intercambiable (Tabla 44) como en fase soluble (Tabla 40), este sustrato no generó la mayor absorción de este catión por parte de las plantas, lo cual se explica por los antagonismos que se pueden presentar entre cationes.

En cuanto a las relaciones iónicas en el tejido vegetal, se puede observar en la Tabla 34 que los sustratos que generaron el mayor Pf.Raíz presentaron una adecuada relación N/P, N/S y N/K. Es de resaltar, que todos los sustratos mostrados en la Tabla 34 presentaron los desbalances catiónicos (inferior al rango óptimo) K/Na, Ca/Mg y Ca/Na, y debido a que la relación catiónica Ca/K se encontraba dentro del rango adecuado, se evidencia un exceso de absorción de Na, y Mg.

5.2.3 Concentración de elementos menores en tejido vegetal

La concentración de elementos menores presenta una correlación muy débil, generalmente negativa, con la ganancia de peso fresco de raíces (Tabla 32). Sin embargo, el Fe presenta una correlación significativa de forma negativa con el P (-0,45), el Ca (-0,41) y el K (-0,31), lo que indica que este micronutriente está limitando la absorción de P y Ca o viceversa, el P y el Ca están limitando la absorción de Fe. Cabe resaltar, que el P puede formar complejos con el Fe, que se precipitan, limitando así su absorción por parte de las raíces de las plantas (Sposito, 2008). De igual forma, cuando el Fe está en una concentración muy alta, tanto en la solución como en el complejo de cambio, compite con iones como el Ca y el K por espacio en los canales y transportadores de las membranas celulares de las raíces de la planta, algunos de baja selectividad (Marschner, 2012).

Cuando se comparan los niveles óptimos en tejido vegetal para plantas de clavel presentados en la Tabla 28 con los del sustrato SC50-VE50, que obtuvo el mayor Pf.Raíz, de los elementos menores, el Mn y el Zn (103 y 41 mg Kg⁻¹, respectivamente) se encuentran dentro de este rango.

No es tan clara la influencia de un sustrato en particular sobre la absorción de micronutrientes por las plantas (Figura 43). Tan solo se evidencia una tendencia que muestra que aquellas plantas que crecen en sustratos con CP tienden a absorber más Cu a medida que la proporción de este material aumenta (Figura 43-e) en el sustrato. De

los materiales de origen mineral, la vermiculita (VE) y la zeolita (ZE) fueron los que más concentraron micronutrientes en el tejido vegetal (Figura 40).

Tabla 34. Relaciones elementales en tejido vegetal de las tres mezclas que produjeron esquejes con mayor y menor Pf.Raíz, comparado con las relaciones adecuadas definidas por Medina (2006) y el sustrato testigo utilizado comercialmente (CA100). Datos presentados en mg Kg⁻¹.

| Relación | Adecuado | TESTIGO | Mayor Pf.Raíz | | | | Menor Pf.Raíz | | |
|----------|-------------|---------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|--|
| | | CA100 | SC50-VE50 | CA50-PE50 | SC50-PP50 | CA50-ZE50 | CP75-EC25 | CA50-EC50 | |
| N/P | 7 – 13 | 6,0 | 8,5 | 7,3 | 8,6 | 7,0 | 9,2 | 6,8 | |
| N/S | 7 – 15 | 14,6 | 15,3 | 15,3 | 15,3 | 14,4 | 16,4 | 14,2 | |
| N/K | 0,7 - 1,4 | 0,9 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 1,1 | |
| N/Cu | 3400 - 4600 | 4822 | 4231 | 3929 | 4507 | 3593 | 3158 | 3958 | |
| P/S | 0,7 - 1,8 | 2,4 | 1,8 | 2,1 | 1,8 | 2,0 | 1,8 | 2,1 | |
| P/Zn | 18 - 52 | 57,2 | 60,1 | 60,3 | 42,7 | 36,1 | 38,0 | 33,3 | |
| K/Mg | 6 - 12 | 7,1 | 8,9 | 5,5 | 8,2 | 9,0 | 9,2 | 7,4 | |
| K/Na | 10 - 60 | 8,0 | 7,5 | 8,0 | 7,4 | 8,1 | 7,5 | 6,6 | |
| Ca/K | 0,2 - 0,9 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | |
| Ca/Mg | 3,5 - 5,8 | 2,1 | 2,6 | 1,4 | 2,8 | 2,7 | 3,0 | 2,8 | |
| Ca/Mn | 50 - 180 | 23,4 | 50,2 | 30,0 | 56,2 | 34,1 | 47,9 | 36,4 | |
| Ca/B | 210 - 590 | 109,3 | 218,0 | 211,6 | 241,0 | 66,9 | 74,6 | 90,1 | |
| Ca/Na | 4 - 30 | 2,4 | 2,2 | 2,1 | 2,6 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | |
| Mg/Mn | 10 - 45 | 11,0 | 19,1 | 20,8 | 19,8 | 12,7 | 16,1 | 13,0 | |
| Fe/Mn | 0,5 - 1,5 | 2,4 | 11,7 | 5,2 | 10,7 | 5,9 | 11,2 | 4,5 | |
| Fe/Cu | 0,5 - 2,6 | 160,7 | 243,3 | 173,1 | 250,0 | 180,2 | 202,0 | 160,8 | |
| Fe/Zn | 9 - 25 | 11,4 | 29,2 | 19,4 | 20,4 | 12,7 | 22,2 | 9,2 | |

Cuando se analizan los resultados de los sustratos sin tener en cuenta la proporción (Tabla 59), se evidencia que al igual que como sucedió con el N, P, K, Ca y Mg; el Fe y en menor nivel el Zn, podrían influir positivamente sobre el crecimiento de los esquejes de clavel, debido a que si se comparan los resultados de la Tabla 55 con los de la Tabla 59, se aprecia que cuando la variable Pf.Raíz está en las primeras posiciones de la prueba de comparación de Tuckey, estos dos microelementos se encuentran en las posiciones superiores (no exactamente las primeras) de la misma prueba.

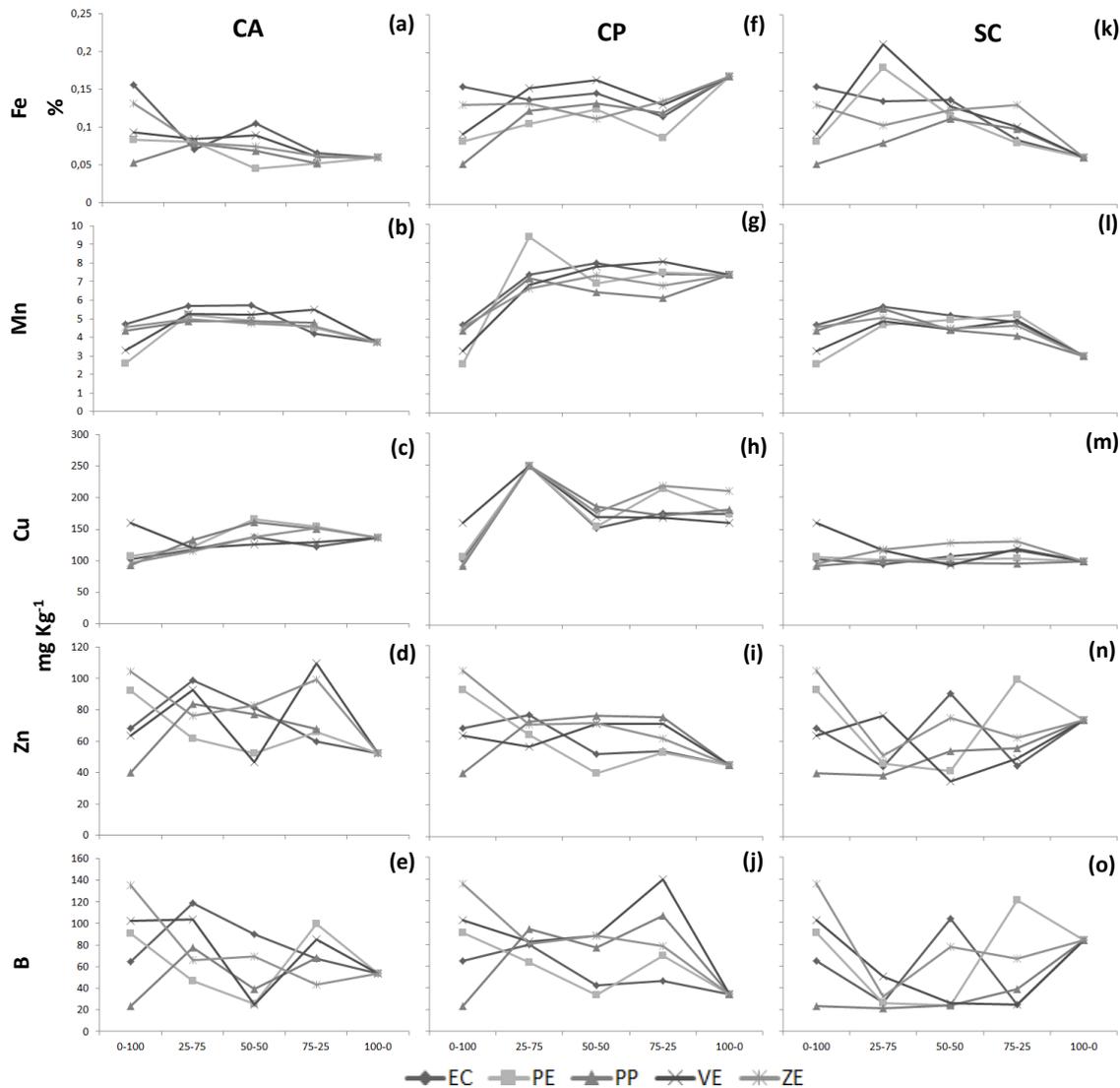


Figura 43. Concentración de Fe, Cu, Mn, Zn y B en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

En cuanto a las relaciones iónicas, se presentaron desbalances en la relación Fe/Mn y Fe/Cu (superior al rango adecuado) para todos los sustratos (Tabla 34). Esto indica un exceso en la absorción de Fe, que se corrobora con los datos presentados en la Tabla 58¹⁷, comparados con los datos de la Tabla 28. Al mismo tiempo, los mejores sustratos mostraron una adecuada relación Ca/B, que no sucedió con ninguno de los sustratos que generaron el menor Pf.Raíz ni el testigo. Esto podría dar un indicio de que una correcta relación Ca/B puede influenciar positivamente la ganancia en peso fresco de raíces. Al

¹⁷ Se debe tener en cuenta que los nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S y Fe se muestran en %, y para estimar los balances iónicos se transformaron a mg Kg⁻¹.

respecto, Fernández *et al.* (2006), mencionan que la productividad de clavel se incrementa con niveles adecuados de calcio y boro.

5.3 Conclusiones

De los materiales de origen orgánico evaluados, el sustrato de coco presentó los mejores resultados en cuanto a acumulación de masa fresca de raíces, lo que sigue corroborando que este sustrato tiene potencial para la producción de plantas en sistemas de cultivo sin suelo.

Aunque la acumulación de peso fresco de raíces en esquejes sembrados en vermiculita fue estadísticamente más alta, cuando se evalúa su comportamiento en todas las proporciones, no se presentó una tendencia que pudiera definir a este material como el mejor de todos los de origen mineral que se evaluaron, ya que la perlita y la piedra pómez, en algunas proporciones, también mostraron muy buenos resultados.

La cascarilla de palma no mostró diferencias significativas con la cascarilla de arroz en cuanto a ganancia de masa fresca de raíces, por lo que este material se muestra como promisorio para su uso como medio de cultivo en sistemas sin suelo. Se recomienda realizar más investigaciones con cascarilla de palma, que permitan evaluar su comportamiento con diversos cultivos, preferiblemente con un ciclo de producción más amplio.

No se aprecia una influencia clara de los sustratos evaluados sobre la concentración de nutrientes en tejido vegetal, tan solo la vermiculita mostró un efecto notable sobre la absorción de magnesio. No obstante, en promedio todos los nutrientes presentaron una menor concentración, comparado con su nivel antes de la siembra. Sería recomendable hacer un pequeño aporte de nutrientes durante el periodo de enraizamiento, ya que la concentración de nutrientes en los esquejes de clavel al finalizar este ciclo se encontraba por fuera del rango normal, lo que supone un esfuerzo adicional de la planta para alcanzar los niveles adecuados cuando sea trasplantada en campo.

Los sustratos que generaron un mayor peso fresco de raíces mostraron adecuadas relaciones elementales N/P, N/S, N/K, Ca/K, Ca/B y Mg/Mn. Lo que puede indicar, que más que la concentración de nutrientes en el tejido vegetal, es la proporción de los elementos la que puede influenciar positivamente la generación de raíces durante el periodo de propagación de esquejes de clavel.

Se podría inferir, que el origen de los materiales incluidos en el sustrato tendría un mayor efecto sobre el crecimiento de las plantas, que su proporción en la mezcla. Esto debido, a que se pueden encontrar relaciones más claras entre las variables estudiadas, cuando se comparan los sustratos sin tener en cuenta el factor proporción.

Conclusiones y recomendaciones generales

Conclusiones

De 21 materiales identificados inicialmente, se seleccionaron cinco de origen mineral (escoria de carbón, perlita, piedra pómez, vermiculita y zeolita) y tres de origen orgánico (cascarilla de palma, cascarilla de arroz y sustrato de coco), cuyas propiedades los hacen promisorios para ser implementados en sistemas de cultivo sin suelo en Colombia, ya sea para vivero o producción en campo. Su viabilidad agronómica se evaluó a través de la propagación de esquejes de clavel.

En todos los materiales escogidos y sus mezclas hubo enraizamiento de los esquejes. Sin embargo, en cuanto al desarrollo de la planta, definida en términos de acumulación de masa fresca de raíces, el sustrato de coco presentó los mejores resultados. El aumento del contenido de sustrato de coco en la mezcla, correspondió con un aumento en el peso de las raíces. En los sustratos minerales, la vermiculita mostró una tendencia a generar mayor masa fresca de raíces. La perlita y la piedra pómez, en algunas proporciones, también mostraron muy buenos resultados.

La cascarilla de palma resulta promisoria por sus características químicas, físicas, de estabilidad, microbiológicas, amplia disponibilidad y bajo costo, además no se presentaron diferencias significativas en la ganancia de masa fresca de raíces con respecto a la cascarilla de arroz quemada, que es el sustrato de referencia.

Con excepción de la vermiculita, que influyó sobre la absorción de magnesio, los demás sustratos no influenciaron claramente la concentración de nutrientes en el tejido vegetal. Esta concentración fue mayor en el esqueje al inicio, y disminuyó al final del proceso de enraizamiento. Sería recomendable hacer un pequeño aporte de nutrientes durante el periodo de enraizamiento, ya que la concentración de nutrientes en los esquejes de clavel al finalizar este ciclo se encontraba por fuera del rango normal, lo que supone un esfuerzo adicional de la planta para alcanzar los niveles adecuados cuando sea trasplantada en campo.

No hubo evidencia que la concentración de un nutriente en particular influyera sobre el proceso de enraizamiento, pero fue evidente la influencia del balance de nutrientes en el proceso. Los sustratos que generaron un mayor peso fresco de raíces mostraron adecuadas relaciones N/P, N/S, N/K, Ca/K, Ca/B y Mg/Mn, lo que resalta la importancia del balance de nutrientes en el enraizamiento de los esquejes de clavel.

A lo largo del estudio, se aprecia una tendencia a la disminución de la concentración de iones en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, que obedece a procesos de absorción desde la fase soluble a las raíces de las plantas y desorción desde las superficies cargadas a la solución del sustrato.

Independiente del sustrato, la concentración de iones en los lixiviados mostró una tendencia a disminuir, alcanzando una concentración estable al final del estudio. A

medida que avanza el proceso de enraizamiento, aumenta la absorción de nutrientes por la planta, agotando los nutrientes que están en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, ya que el sistema no recibió fertilización, por consiguiente, la concentración de iones disminuye en la fase soluble de los sustratos y esto genera una disminución de la cantidad de iones descargada en los lixiviados.

La concentración de nitratos en la fase soluble de los sustratos no sobrepasó los límites permitidos, lo que indica que estos materiales no liberaron nitratos en cantidades que pudieran ser nocivas para el ambiente.

Recomendaciones

Aunque los materiales provenientes del cultivo de palma se muestran como promisorios, es necesario ampliar las investigaciones de su uso en campo, pues no se conoce claramente como responderían las plantas tanto de ciclo corto, como de ciclo largo si crecieran en estos medios de cultivo.

Dada la importancia de la estabilidad de los materiales, se recomienda evaluar en futuros trabajos si aquellos de origen orgánico con altos contenidos de lignina, como la cascarilla de palma, pueden equiparar la resistencia a la degradación que posee la cascarilla de arroz, atribuida a sus altos contenidos de óxido de silicio. De igual forma, es conveniente tener en cuenta la durabilidad de los materiales, puesto que aunque algunos de naturaleza mineral como la zeolita son costosos, pero resistentes a la alteración, pueden ser reutilizados durante mucho más tiempo, reduciendo los costos a largo plazo.

Para establecer si hay aumentos en la lixiviación de nitratos, es necesario evaluar el comportamiento de los lixiviados en sistemas productivos comerciales, en los cuales se aplican fertilizantes.

Se recomienda tener en cuenta la granulometría de los materiales, ya que este parámetro afecta las características de los sustratos al definir la cantidad y tamaño de poros, la retención de agua y la densidad del material.

El conocimiento de las características de los materiales individuales podría predecir las características de la mezcla final, pues las propiedades químicas que sobresalen en un material, aumentan a medida que él contenido de dicho material se incrementa en la mezcla. De esta forma, se pueden fabricar sustratos con las características químicas deseadas, si se conocen las propiedades y composición química de los materiales que lo compondrán.

Literatura citada

- Abad, B., Noguera, M y Carrión, B. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía (Ed.). Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3 edición. Ediciones mundi prensa, p: 299-354.
- Abad, M. y Noguera, M. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía, L. (Ed.). Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales, 2ª Ed. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 290- 339p.
- Abad, M., Martínez, F., Martínez, D. y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. Actas de Horticultura. 11: 141- 154.
- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urreztarazu, M. (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi- prensa. Madrid. P:113- 158.
- Abad, M., Noguera, P., Bures, S. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. Bioresour. Technol. 77, 197–200.
- 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. Vol 82, P: 241-245.
- Agronet. 2015. Estadísticas agropecuarias Arroz de riego. <http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/ReportesAjax/VerReporte.aspx>. Febrero 2015.
- Ansorena, M. 1994. Sustratos: Propiedades y Caracterización. Mundi Prensa. Madrid, España. 105, 172 p.
- Apaolaza, L. y Guerrero, F. 2008. Comparison between pine bark and coconut husk sorption capacity of metals and nitrate when mixed sewage sludge. Bioresour Technol. 99(6): 1544- 1548.
- Apaolaza, L., Gascó, A., Gascó, J. y Guerrero, F. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. Biosource Technology. 96: 125- 131.
- Asiah, A., Mohd, R., Mohd, K., Marziahj, M., Shaharuddin, M. 2004. Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust and Oil Palm Empty Fruit Bunch and the Growth of Hybrid Heat Tolerant Cauliflower Plant. PertanikaJ. Trap. Agric. Sci, 27(2), 121–133.
- Asocolflores. 2013. Informe de gestión Asocolflores 2013. Capítulo Ceniflores.
- Barber, S.A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach (2nd edn). New York: Wiley.
- Bar-Yosef, B. 1996. Root excretion and their environmental effects: Influence on availability of phosphorus. En Plant Roots, The Hidden Half, 2nd edn (Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, eds). New York: Marcel Dekker, pp. 581–605.
- Bar-Yosef, B. 1996. Root excretion and their environmental effects: Influence on availability of phosphorus. En Plant Roots, The Hidden Half, 2nd edn (Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, eds). New York: Marcel Dekker, pp. 581–605.
- Benton, J. 2005. Hydroponics – A practical guide for the soilless grower. Second edition. CRC Press. USA. p. 15-17.

- Benton, J. 2005. Hydroponics – A practical guide for the soilless grower. Second edition. CRC Press. USA. p. 15-17
- Biauxuli, C., Aguilar, J. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas – Aspectos prácticos y experiencias. Valencia, España. Generalitat valenciana
- Block, C., C. de Krejff, R. Baas y G. Wever. 2008. Analytical methods in soilless cultivation in Soilless culture – Theory and practice. Elsevier. USA. p. 245 - 289
- Boodt, M., Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*. 37: 2054- 2062.
- Botero, A., Flórez, V. 2006. Cambios en la composición química de los sustratos en el cultivo de clavel. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 217-234
- Botero, A., Flórez, V. 2006. Cambios en la composición química de los sustratos en el cultivo de clavel. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 217-234
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Feng Ma, J., Rengel, Z. y Zhao, F. 2012. Beneficial elements. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 249 - 270
- Brown, E. y Pokorny, F. 1975. Physical and chemical properties of media composed of milled pine bark and sand. *J. Amer. Soc. Hortic. Sci.*, 100, 119–121.
- Cadahía, L. 2005. Fertirrigación. Aspectos básicos – Fertirrigación de cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ª edición. España. Mundi prensa. P 79-89
- Cárdenas, C., Rivera, I., Flórez, V., Piedrahita, W., Chávez, B. 2006. Análisis de crecimiento en clavel estándar variedad Nelson cultivado en sustratos. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 111 - 128
- Castaldi, P., y Melis, P. 2004. Growth and Yield Characteristics and Heavy Metal Content on Tomatoes Grown in Different Growing Media. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35:1-2, 85-98. <http://doi.org/10.1081/CSS-120027636>
- Chaparro, L., A. Farias., B. Chaves., D. Miranda y V. Flórez. 2006. Análisis de crecimiento en rosa variedad Charlotte en los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo - En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 77-90
- Charlo, H., Ferreira, A., Vargas, P., Castoldi, R., Melo, D., y Braz, L. 2012. Alterations in Levels of NPK, Electrical Conductivity and pH of Substrate, in Cultivation of Peppers. *Xxviii International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (Ihc2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation*, 927 (FEBRUARY 2012), 437–442. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.54>
- Chavez, W., Di Benedetto, A., Civeira, G., y Lavado, R. 2008. Alternative soilless media for growing *Petunia x hybrida* and *Impatiens wallerana*: Physical behavior, effect of fertilization and nitrate losses. *Bioresource Technology*, 99(17), 8082–8087. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.063>
- Conover, C. 1967. Soil amendments for pot and field grown Flowers. *Florida Flower Grower*. 4(4): 1- 4.
- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, M., Robles, A., Juárez, P. 2013. Sustratos en la horticultura. Mexico. *Revista Biociencias*. P 17-26
- Daniels, R. y Hammer, R. 1992. *Soil Geomorphology*. John Wiley & Sons. Inc. U.S.A.

- Daniels, W. y Wright, R. 1988. Cation exchange properties of pine bark growing media as influenced by pH, particle size, and cation species. *J Amer. Soc. Hort. Sci.*, 113, 557–560.
- De Boodt, M., Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in floriculture. *Acta Horticulturae*. 26: 37- 44.
- De Farias, W., Oliveira, L., Oliveira, T. Dantas, L. y Silva, T. 2012. Caracterizacáo física de substratos alternativos para producao de mudas. *Agropecuária Científica No Semiarido*. 8(3): 1-6.
- Dogan, M y Alkan, M. 2004. Some physiochemical properties of perlite as an adsorbent. *Fresenius Environ. Bull.*, 13, 252–257.
- Evans, M., Konduru, S. y Stamps, R. 1996. Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *Hort Science*. 31(6): 965- 967.
- Farias, A., L. Chaparro., A. Campos., B. Chavez y V. Flórez. 2006. Curvas de crecimiento de rosa en sistemas de cultivo sin suelo en la sabana de Bogotá - En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P. 91 – 110.
- Fernández, A., Flórez, V.J y Chaves, B. 2006. Niveles foliares de nutrientes en clavel variedad “Nelson” y su relación con la producción. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 237-247
- Fernández, M. 2010. Evaluación de sustrato de fibra de madera de pino frente a sustratos convencionales en cultivo hidropónico de tomate. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Técnico Agrícola en explotaciones agropecuarias. Nafarroako Unibersitate Publikoa. Pamplona.
- Filzmoser, P y Gschwandtner, M. 2015. Mvoutlier: Multivariate outlier detection based on robust methods. R package version 2.0.6. <https://CRAN.R-project.org/package=mvoutlier>
- 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: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 43-52.
- Forero, A; Escobar, H; Medina, A y Monsalve, O. 2010. Uso de materiales orgánicos en el manejo del suelo en cultivos de hortalizas. Universidad Jorge Tadeo Lozano - Centro de Biosistemas.
- Fornes, F; Belda, R. 2014. Aprovechamiento de residuos orgánicos como componentes de sustrato de cultivo. En: Máster en Gestión, Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos (UV). Alfa Delta Digital S.L. Valencia.
- Gallegos, D. 2008. Volumen óptimo de piedra pómez y tezontle como sustratos para la producción de jitomate en hidroponía. Tesis como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agrobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 56p.
- Gerding, V., M. Herмосilla y R. Grez. 1996. Sustratos de corteza compostada para la propagación vegetativa de estacas de tallo de *Podocarpus nubigena* Lindl. y *Eucryphia cordifolia* Cav. *Bosque* 17(2), 57-64.
- Ghehsareh, A.M., Kalbasi, M. 2012. Effect of addition of organic and inorganic combinations to soil on growing property of greenhouse cucumber. *African Journal of Biotechnology* Vol. 11(37), pp. 9102-9107. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>. DOI: 10.5897/AJB11.1750

- Gul, A., Erogul, D. y Ongun, A. 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp- head lettuce. *Scientia Horticulturae*. 106: 464- 471.
- Gul, A., Kidoglu, F. y Anac, D. 2007. Effect of nutrient sources on cucumber production in different substrates. *Scientia Horticulturae*. 113: 216- 220.
- Hall, J. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of experimental botany*. Vol. 53, No 366. P: 1-11
- Harland, J., Lane, S. y Price, D. 1999. Further experiences with recycled zeolite as substrate for the sweet pepper crop. *Acta Hort*. 481: 187- 194.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I, y White, P. 2012. Functions of macronutrients. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 135 - 190
- Henao, M y V. Flórez. 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: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 265-281
- Henao, M y V. Flórez. 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: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 265-281
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C. y Jaillard, B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant Soil*, 248, 43–59.
- Huang, M y A. Violante. 1986. Influence of organic acids on crystallization of precipitation products of aluminium. En: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (P.M. Huang y M. Schnitzer, eds). SSSA, Spec. Pub. No. 17. Madison: Soil Science Society of America. p. 159 – 222
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2012. *Viveros de frutales registrados ante el ICA a nivel nacional*.
- Jaramillo, D. 2014. *El suelo: Origen, propiedades, especialidad*. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias, Escuela de geo ciencias. Medellín Colombia.
- Jenagathan, M. 1992. Nut water analysis as a diagnostic tool in coconut nutrition studies. *Commun Soil Sci. Plant Anal*. 23(17-20): 2667- 2686.
- Johar, N., Ahmad, I., y Dufresne, A. 2012. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 93–99. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>
- Kafkafi, U. 2008. Functions of the root systems. En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 13 - 40
- Kampf, A. y Fermino, M. 2000. Seleccion de materiais para uso como sustrato. En: *Substratos para plantas: a base da producao vegetal em recipientes*. Porto Alegre: Génesis. 139- 145.
- Kang, J-Y., Lee, H-H. y Kim, K-H. 2004. Physical and Chemical Properties of Inorganic Horticultural Substrates Used in Korea. *Proc. IS on Growing Media* Eds.: Alsanius, Jensen & Asp *Acta Hort* 644, ISHS 2004.

- Kroeff, J. A. Dutra de Sousa, P. and 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.
- Ku, C.S.M., Hershey, D.R. 1997. Growth response, nutrient leaching, and mass balance for potted poinsettia. I. Nitrogen. *J. Amer. Soc. Horti. Sci.* 122, 452– 458.
- Landis, T., R. Tinus., S. McDonald y J. Barnett. 1990. *The container tree nursery manual. Handbook 674.* Washington, DC. USDA, Forest Service. 85 p.
- Lang, H.J., Pannuk, T.R. 1998. Effects of fertilizer concentration and minimum-leach drip irrigation on the growth of New Guinea Impatiens. *HortScience* 33, 83–688.
- Lavado R. 2000. Aguas y sustratos para la producción ornamental. Origen, propiedades, manejo, influencia sobre los cultivos y determinaciones. Buenos Aires, Argentina. *New Plant.* 109 p.
- Lieth, H y Oki, L. 2008. Irrigation in soilless production. En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice.* Elsevier. USA. P: 117:156
- Liu, L. 2015. Desarrollo de nuevos sustratos a base de compost y biochar para la propagación y producción de *Rosmarinus officinalis* L. en vivero profesional. Tesis de pregrado. Escuela técnica superior de ingeniería agronómica y del medio natural. Universidad Politécnica de Valencia.
- Lu, H., Ye, Z., Zhang, X., Lin, X., y Ni, W. 2011. Growth and yield responses of crops and macronutrient balance influenced by commercial organic manure used as a partial substitute for chemical fertilizers in an intensive vegetable cropping system. *Physics and chemistry of the earth.* Vol 36. P: 387-394.
- Marschner, P. 2012. *Mineral nutrition of higher plants.* Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier
- Marshall, T., Holmes, J. y Rose, C. 1996. *Soil Physics (3rd edn).* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Martell, A.E. y Smith, R.M. 1989. *Critical Stability Constants.* Vol. 6, New York: Plenum Press.
- Martínez, P.F. y Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo, propiedades y manejo. En: Flórez (ed.). *Sustratos, manejo de clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo.* Unibiblos, Bogotá. P: 37-78
- Medina, A. 2006. Caracterización de sustratos para el cultivo sin suelo. Centro de investigaciones y asesorías agroindustriales. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Medina, A. 2006. Métodos de diagnóstico nutricional para fertirriego utilizados en Colombia. Experiencias y perspectivas. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana.* Bogotá. Unibiblios. P. 191-216
- Medina, A; Escobar, H y Monsalve, O. 2008. Actual stage and perspectives for fertirrigation and organic matter use for greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) production systems in Colombia. *International Symposium on tomato in the tropics.* Book of abstracts. p: 80.
- Mendiburu, F. 2015. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research.* R package version 1.2-3. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.
- Monsalve, O., Escobar, H., Garzón, P. 2009. Caracterización de materiales y mezclas con potencial de uso en la producción de cultivos hortícolas en sustrato. *Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura.* Paipa. Septiembre 2009.

- Monsalve, O., Escobar, H., Garzón, P. 2009. Caracterización de materiales y mezclas con potencial de uso en la producción de cultivos hortícolas en sustrato. Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura. Paipa. Septiembre 2009.
- Monsalve, O., H, Escobar; A, Medina y A, Forero. 2009. Estrategias de fertilización limpia y orgánica en la producción de tomate bajo invernadero. Universidad Jorge Tadeo Lozano - Centro de Investigaciones y asesorías Agroindustriales.
- Monsalve, O; Peña, M e Higuera, C. 2008. Caracterización físico-química de mezclas de sustratos más materiales orgánicos con potencial para ser utilizados en cultivos hidropónicos de tomate (*Solanum lycopersicum*). XIV congreso colombiano de la ciencia del suelo – Manejo del suelo para la mitigación del cambio climático. Libro de resúmenes. P: 57.
- Montes, A., Fuentes, N., Perera, Y., Pérez, O., Castruita, G., García, S., García, M. 2014. Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca^{2+} por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. Superficies y vacío. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C. Vol. 28, núm. 1. P: 5-11
- Moral, R., Gomez, I., Pedreno, J. N., & Mataix, J. 1994. Effects of cadmium on nutrient distribution, yield, and growth of tomato grown in soilless culture. Journal of Plant Nutrition, 17(6), 953–962. <http://doi.org/10.1080/01904169409364780>
- Morel, C. y Hinsinger, P. 1999. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. Plant Soil, 211, 103–110.
- Mumpton, F.A. 1999. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 96, 3463–3471.
- Neuman, Günter, y Römheld, V. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. En: Marschner (Ed). Mineral nutrition of higher plants. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 347 – 368.
- Nieto, D y V. Flórez. 2006. Producción y calidad de rosa y clavel cultivados en cascarilla de arroz y fibra de coco. En: Flórez (ed.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá. Unibiblios, P: 129 - 143
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. Acta Hort. 517, 279-286.
- Olivo, V. y Baduba, C. 2006. Influencia de seis sustratos en el crecimiento de Pinus ponderosa producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. Bosque. 27(3): 267- 271.
- Orlando, U., Baes, A., Nishijima, W. y Okada, M. 2002. Preparation of agricultural residue anion exchangers and its nitrate maximum adsorption capacity. Chemosphere. 48: 1041- 1046.
- Ortega, R. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. En: Silva Mojica, F (ed.). Fertirrigación. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo, p. 136-137
- Peña, M., Casierra, F. y Monsalve, O. 2009. Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum*) en sustratos acondicionados a partir de materiales inertes y orgánicos. Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura. Paipa. Septiembre 2009.
- Peña, M., Casierra, F., Monsalve, O. 2013. Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y

- orgánicos. Revista colombiana de ciencias hortícolas - Vol. 7 - No. 2 - pp. 217-227, julio-diciembre 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2236>.
- Petitt, I. 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. Universidad Nacional de Colombia.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D y R Core Team. 2016. Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models_. R package version 3.1-124, <URL: <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>>.
- Portal Siembra. 2015. Corpoica. Consolidado de demandas de la agenda de Flores y Follajes – Flores tradicionales. <http://www.siembra.gov.co/siembra/Agenda.aspx>. Febrero 2015.
- Pulido, S y Escobar, H. 2009. Propagación del Tomate en Manual de Producción de tomate bajo invernadero (Escobar, H y Lee, R). Universidad Jorge Tadeo Lozano. Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales. P: 17-20
- Puustjarvi, V. 1977. Peat and its Use in Horticulture. Turveteollisuusliitto Ry, Publ. 3, Helsinki.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R.A. (1975). Physical and chemical properties. In Peat in Horticulture (D.W. Robinson and J.G.D. Lamb, eds). New York: Academic press, pp. 23–38.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R.A. (1975). Physical and chemical properties. In Peat in Horticulture (D.W. Robinson and J.G.D. Lamb, eds). New York: Academic press, pp. 23–38.
- Quian, Y.L.; A.J. Koski y R. Welton. 2001. Amending sand with isolite and zeolite under saline conditions: leachate composition and salt deposition. HortScience 36: 717-720.
- Quintero, M. 2014. Sustratos para cultivo de flor cortada. Mejora de fertirriego en clavel. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería y Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Agronomía. Doctorado en Agricultura Protegida. Tesis de doctorado.
- Quintero, M. 2014. Sustratos para cultivo de flor cortada. Mejora de fertirriego en clavel. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería y Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Agronomía. Doctorado en Agricultura Protegida. Tesis de doctorado.
- Quintero, M., González, C., Guzmán, J. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. p. 79-108. En: Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo, Unibiblos, Bogotá.
- Quintero, M., Guzmán, J. y Valenzuela, J. 2012. Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavel (*Dianthus caryophyllus* L.). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 6(1): 76- 87.
- Quintero, M., M. Gúzman., J. Valenzuela y C. González. 2013. Utilización de la cascarilla de arroz en sistemas de cultivos sin suelo: Una revisión. Flor y Cultura. 2 Ed. Asocolflores. Bogotá. p. 35 - 42
- Quintero, M., M. Gúzman., J. Valenzuela y C. González. 2013. Utilización de la cascarilla de arroz en sistemas de cultivos sin suelo: Una revisión. Flor y Cultura. 2 Ed. Asocolflores. Bogotá. p. 35 - 42
- Quintero, M., Melgarejo, M., Ortega, D., Valenzuela, J., Guzmán, M. 2011. Temporal physicochemical variations in burnt rice husk: improvement of fertigation protocols in carnations crops. J. Food. Agric. Environ. 9(3-4): 77- 732.

- Quintero, M., Ortega, D., Valenzuela, J., Guzmán, M. 2013. Variation of hydro- physical properties of burnt rice husk used for carnation crops: Improvement of fertigation criteria. *Scientia Horticulturae*. 154: 82- 87.
- Quintero, M.F. González-Murillo, C.A. and Florez-Roncancio, V.J. 2006. Evaluación de las características hidro-físicas de los sustratos cascarilla de arroz quemada, fibra de coco y sus mezclas. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P: 451-462.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. ISBN 3-900051-07-0.
- Raviv, M y J. Heinrick. 2008. *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 546-548
- Raviv, M., Zaidman B.Z. y Kapulnik, Y. 1998. The use of compost as a peat substitute for organic vegetable transplants production. *Compost Science and Utilisation*, 6, 46–52.
- RHP. 2007. Product certificatie schema. Stichting RHP's Gravenzande, The Netherlands, Looseleaf Publication.
- Sánchez, P.G., Fernández, L.P., Trejo, L.T., Alcántar, G.G. and Cruz, J.D. 1999. Heavy metal accumulation in beans and its impact on growth and yield under soilless culture. *Acta Hortic*. 481, 617-624. DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.481.73 <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.73>
- Sarkar, D. 2008. *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5
- Schmitz, J., Dutra, P. y Kampf, A. 2002. Propiedades químicas e físicas de sustratos de origen mineral o organica para o cultivo de mudas em recipientes. *Ciencia Rural*, Santa Maria. 32(6): 937- 944.
- Serna, A. 2012. Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico, Pereira, Colombia. 53 p.
- Silber, A. 2008. Chemical Characteristics of Soilless Media En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 210 - 239
- Silber, A., Bar-Yosef, B., Singer, A. y Chen, Y. 1994. Mineralogical and chemical composition of three tuffs from northern Israel. *Geoderma*, 63, 123–144.
- Silver, A y M. Raviv. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant Soil*, 186. p. 353 – 360.
- Silver, A. 2008. Chemical Characteristics of Soilless Media in *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 210 - 239
- Silver, A., Bar- Yosef, B., Suryano, S. y Levkovitch, I. 2012. Zinc adsorption by perlite: effects of pH, ionic strength, temperature, and pre-use as growth substrate. *Geoderma*. 170: 159- 167.
- Sonnevel, C y W. Voogt. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer Science Business Media. Nueva York. 432 p.
- Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Dissertation. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 151 pp.
- Sposito, G. 2008. *The chemistry of soil*. Second edition. Oxford University press, Oxford.

- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reactions* (2nd edn). New York: John Wiley and Sons.
- Tan, H. 1986. Degradation of soil minerals by organic acids. In *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (P.M. Huang, M. Schnitzer, eds). SSSA, Spec. Pub. No. 17, Madison: Soil Science Society of America. p. 1 – 27.
- Tate, K y B. Theng. 1980. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In *Soils with Variable Charge* (B.K.G. Theng, ed.). New Zealand: Lower Hutt. p. 225 – 249.
- Terrés, L., Artetxe, A., Beunza, A., Sáins de la Maza, E. Lenzaun, M. 2001. Physical properties of the substrates. *Proc. 5th IS Protect. Cult. Mild Winter Clim* (Eds.) Fernández, Martínez & Castilla. *Acta Hort.* 559: 663- 668.
- Triana, Y., CASTIBLANCO, E., Flórez, V. 2006. Comportamiento de nutrientes en un sistema de cultivo sin suelo en rosa. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P: 249-263
- Ulloa, L., N. Vargas., D. Miranda y V. Flórez. 2006. Efecto de la salinidad sobre los parámetros de desarrollo en especies hortícolas cultivadas en sistemas sin suelo. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 53 – 76
- Urbina, E., Baca, G., Núñez, R., Colinas, M., Tijerina, L., Tirado, J. 2006. Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargada con K⁺, Ca²⁺, o Mg²⁺ y diferente granulometría. *Agrociencia. Colegio de posgraduados. México. Vol 40 N° 004. P: 419:429*
- Van Soest, P., Robertson, J., Lewis, B. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J Dairy Sci.* 74, 3583-3597
- Velde, B., Meunier, A. 2008. *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer. Alemania. P: 61-62.
- Wallach, R. 2008. *Physical Characteristics of Soilless Media in Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 41 – 107 77.
- Wallach, R., Da Silva, F.y Chen, Y. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society Horticultural Science.* 117: 415: 421. 78.
- White, P. 2012. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 7:48
- Yalçın, N., & Sevinç, V. 2001. Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*, 27(2), 219–224. [http://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00068-7](http://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00068-7)
- Zanin, O., Mat Rasoi, A., Hassan, H. 1998. Irradiation effect on chemical components of oil palm empty fruit bunch and palm press fibre. *Nuclear Sci. J. Malaysia.* 16 (1): 21-30.

Anexos

ANEXO 1. Resultados de la comparación entre los tratamientos evaluados en el estudio “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”

Tabla 35. Propiedades químicas y concentración de iones en fase soluble, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”.

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | CE | pH | Ca | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ |
|-----|-----|-----|-----|-----------|--------------------|------|--------------------|--------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| | | | | | dS m ⁻¹ | Unid | mg L ⁻¹ | | | | | | |
| CA | 100 | | | CA100 | 1,5 | 10,2 | 7,1 | 1372,0 | 4,8 | 15,3 | 32,3 | 75,4 | 395,6 |
| SC | 100 | | | SC100 | 0,7 | 6,3 | 10,4 | 386,6 | 4,6 | 153,8 | 185,3 | 368,0 | 25,5 |
| CP | 100 | | | CP100 | 1,5 | 4,8 | | | | | | | |
| | | EC | 100 | EC100 | 0,9 | 6,7 | 56,7 | 312,4 | 39,6 | 43,5 | 67,5 | 945,8 | 33,2 |
| | | PE | 100 | PE100 | 0,0 | 8,3 | 5,6 | 18,7 | 0,6 | 24,8 | 39,9 | 39,6 | 3,9 |
| | | PP | 100 | PP100 | 0,7 | 9,6 | 8,0 | 123,8 | 1,2 | 187,4 | 154,8 | 312,5 | 10,9 |
| | | VE | 100 | VE100 | 0,1 | 6,7 | 8,8 | 48,6 | 35,9 | 11,6 | 83,5 | 32,6 | 1,6 |
| | | ZE | 100 | ZE100 | 0,1 | 8,1 | 5,8 | 2,1 | 1,5 | 15,4 | 32,1 | 38,6 | 0,1 |
| CA | 75 | EC | 25 | CA75-EC25 | 0,6 | 8,0 | 3,0 | 825,8 | 5,6 | 22,4 | 57,4 | 498,4 | 526,7 |
| CA | 50 | EC | 50 | CA50-EC50 | 0,6 | 7,7 | 12,9 | 707,7 | 17,2 | 31,5 | 57,4 | 588,1 | 308,4 |
| CA | 25 | EC | 75 | CA25-EC75 | 0,5 | 7,1 | 15,3 | 378,8 | 35,9 | 38,5 | 66,0 | 771,4 | 63,5 |
| CA | 75 | PE | 25 | CA75-PE25 | 0,7 | 9,1 | 7,4 | 908,5 | 10,2 | 17,3 | 60,3 | 94,9 | 1000,0 |
| CA | 50 | PE | 50 | CA50-PE50 | 0,4 | 8,5 | 8,3 | 527,6 | 9,0 | 21,1 | 64,6 | 108,6 | 587,2 |
| CA | 25 | PE | 75 | CA25-PE75 | 0,2 | 8,1 | 7,2 | 224,8 | 7,1 | 23,4 | 37,3 | 46,1 | 263,0 |
| CA | 75 | PP | 25 | CA75-PP25 | 0,8 | 9,3 | 5,4 | 398,0 | 17,0 | 116,2 | 172,3 | 225,8 | 1479,0 |
| CA | 50 | PP | 50 | CA50-PP50 | 0,6 | 8,5 | 8,9 | 805,7 | 9,9 | 148,2 | 80,4 | 262,5 | 787,0 |
| CA | 25 | PP | 75 | CA25-PP75 | 0,5 | 8,6 | 6,8 | 338,1 | 6,8 | 164,9 | 105,3 | 381,4 | 339,9 |
| CA | 75 | VE | 25 | CA75-VE25 | 0,3 | 8,1 | 13,1 | 611,2 | 65,6 | 19,9 | 89,0 | 166,5 | 689,7 |
| CA | 50 | VE | 50 | CA50-VE50 | 0,3 | 8,0 | 21,1 | 491,7 | 149,4 | 19,6 | 91,9 | 126,9 | 1116,0 |
| CA | 25 | VE | 75 | CA25-VE75 | 0,1 | 7,4 | 14,9 | 177,1 | 56,9 | 12,0 | 91,9 | 45,5 | 494,4 |
| CA | 75 | ZE | 25 | CA75-ZE25 | 0,3 | 8,6 | 6,8 | 156,9 | 7,7 | 38,0 | 27,8 | 68,7 | 256,8 |
| CA | 50 | ZE | 50 | CA50-ZE50 | 0,1 | 7,8 | 13,3 | 9,1 | 7,2 | 28,4 | 109,1 | 45,5 | 85,8 |
| CA | 25 | ZE | 75 | CA25-ZE75 | 0,1 | 7,5 | 11,3 | 6,0 | 5,8 | 23,8 | 30,6 | 42,9 | 77,9 |
| CP | 75 | EC | 25 | CP75-EC25 | | | 17,0 | 323,8 | 30,0 | 9,3 | | | |
| CP | 50 | EC | 50 | CP50-EC50 | | | 19,6 | 328,6 | 20,2 | 17,7 | | | |
| CP | 25 | EC | 75 | CP25-EC75 | | | 18,4 | 387,6 | 30,8 | 21,6 | | | |

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | CE | pH | Ca | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ |
|-----|----|-----|----|-----------|--------------------|------|--------------------|-------|------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| | | | | | dS m ⁻¹ | Unid | mg L ⁻¹ | | | | | | |
| CP | 75 | PE | 25 | CP75-PE25 | | | 14,4 | 214,6 | 5,1 | 6,0 | | | |
| CP | 50 | PE | 50 | CP50-PE50 | | | 15,5 | 183,4 | 5,4 | 6,9 | | | |
| CP | 25 | PE | 75 | CP25-PE75 | | | 7,1 | 61,3 | 7,1 | 9,5 | | | |
| CP | 75 | PP | 25 | CP75-PP25 | | | 11,8 | 269,7 | 27,4 | 32,4 | | | |
| CP | 50 | PP | 50 | CP50-PP50 | | | 8,6 | 141,7 | 14,5 | 45,2 | | | |
| CP | 25 | PP | 75 | CP25-PP75 | | | 9,0 | 63,2 | 7,3 | 75,1 | | | |
| CP | 75 | VE | 25 | CP75-VE25 | | | 15,9 | 284,3 | 10,9 | 2,7 | | | |
| CP | 50 | VE | 50 | CP50-VE50 | | | 8,0 | 50,6 | 18,8 | 1,9 | | | |
| CP | 25 | VE | 75 | CP25-VE75 | | | 4,9 | 16,5 | 35,1 | 1,9 | | | |
| CP | 75 | ZE | 25 | CP75-ZE25 | | | 28,5 | 87,9 | 19,6 | 63,3 | | | |
| CP | 50 | ZE | 50 | CP50-ZE50 | | | 26,2 | 5,6 | 13,8 | 39,0 | | | |
| CP | 25 | ZE | 75 | CP25-ZE75 | | | 17,3 | 3,2 | 6,2 | 18,7 | | | |
| SC | 75 | EC | 25 | SC75-EC25 | 0,2 | 7,4 | 15,4 | 394,4 | 5,3 | 164,1 | 52,2 | 713,0 | 60,2 |
| SC | 50 | EC | 50 | SC50-EC50 | 0,2 | 7,0 | 35,9 | 419,0 | 20,4 | 144,1 | 84,2 | 947,1 | 42,2 |
| SC | 25 | EC | 75 | SC25-EC75 | 0,2 | 7,0 | 82,8 | 329,2 | 30,9 | 87,9 | 61,3 | 910,1 | 40,3 |
| SC | 75 | PE | 25 | SC75-PE25 | 0,1 | 7,1 | 10,0 | 123,0 | 2,5 | 61,2 | 167,5 | 318,0 | 14,8 |
| SC | 50 | PE | 50 | SC50-PE50 | 0,0 | 7,4 | 5,4 | 47,3 | 1,3 | 38,2 | 43,1 | 254,3 | 6,6 |
| SC | 25 | PE | 75 | SC25-PE75 | 0,0 | 7,6 | 3,1 | 25,4 | 0,7 | 23,1 | 44,5 | 77,7 | 4,5 |
| SC | 75 | PP | 25 | SC75-PP25 | 0,1 | 7,1 | 9,5 | 364,1 | 2,4 | 173,0 | 166,5 | 383,6 | 29,1 |
| SC | 50 | PP | 50 | SC50-PP50 | 0,1 | 7,4 | 8,6 | 252,2 | 2,1 | 199,9 | 140,7 | 251,8 | 13,2 |
| SC | 25 | PP | 75 | SC25-PP75 | 0,1 | 7,3 | 8,1 | 141,5 | 1,6 | 292,8 | 143,6 | 289,2 | 11,3 |
| SC | 75 | VE | 25 | SC75-VE25 | 0,1 | 7,4 | 11,9 | 226,0 | 12,8 | 179,4 | 137,8 | 285,6 | 25,1 |
| SC | 50 | VE | 50 | SC50-VE50 | 0,1 | 7,3 | 12,8 | 131,9 | 22,5 | 130,6 | 105,3 | 221,0 | 11,8 |
| SC | 25 | VE | 75 | SC25-VE75 | 0,0 | 7,5 | 9,0 | 58,7 | 21,3 | 59,7 | 74,7 | 84,3 | 1,3 |
| SC | 75 | ZE | 25 | SC75-ZE25 | 0,0 | 6,8 | 9,5 | 9,0 | 3,8 | 46,2 | 67,0 | 140,2 | 1,3 |
| SC | 50 | ZE | 50 | SC50-ZE50 | 0,0 | 7,4 | 8,0 | 4,2 | 2,6 | 23,5 | 41,6 | 80,3 | 1,4 |
| SC | 25 | ZE | 75 | SC25-ZE75 | 0,0 | 7,3 | 6,1 | 2,3 | 1,8 | 18,8 | 33,0 | 66,6 | 0,1 |

Tabla 36. Propiedades químicas y concentración de cationes en fase intercambiable, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales".

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | CIC | Ca | K | Mg | Na |
|-----|-----|-----|-----|----------|------------------------------------|-----|------|------|-----|
| | | | | | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | |
| CA | 100 | | | CA100 | 7,1 | 7,3 | 1,4 | 1,9 | 0,2 |
| SC | 100 | | | SC100 | 74,7 | 9,7 | 13,0 | 11,2 | 6,5 |
| CP | 100 | | | CP100 | 10,5 | 1,8 | 5,0 | 3,2 | 0,1 |
| | | EC | 100 | EC100 | 4,2 | 4,6 | 0,1 | 0,5 | 0,3 |
| | | PE | 100 | PE100 | 8,4 | 1,8 | 0,6 | 0,5 | 0,2 |
| | | PP | 100 | PP100 | 6,2 | 4,4 | 0,5 | 0,6 | 3,0 |

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | CIC | Ca | K | Mg | Na |
|-----|----|-----|-----|-----------|------------------------------------|------|-----|------|------|
| | | | | | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | |
| | | VE | 100 | VE100 | 27,3 | 1,3 | 0,2 | 18,1 | 0,1 |
| | | ZE | 100 | ZE100 | 23,0 | 52,0 | 1,0 | 6,2 | 16,6 |
| CA | 75 | EC | 25 | CA75-EC25 | 7,5 | 4,4 | 9,5 | 0,9 | 0,5 |
| CA | 50 | EC | 50 | CA50-EC50 | 5,5 | 3,1 | 3,5 | 0,7 | 0,4 |
| CA | 25 | EC | 75 | CA25-EC75 | 5,9 | 3,9 | 2,0 | 0,8 | 0,4 |
| CA | 75 | PE | 25 | CA75-PE25 | 11,3 | 2,1 | 6,9 | 0,7 | 0,4 |
| CA | 50 | PE | 50 | CA50-PE50 | 13,1 | 1,4 | 3,8 | 0,5 | 0,3 |
| CA | 25 | PE | 75 | CA25-PE75 | 11,3 | 1,6 | 2,2 | 0,7 | 0,4 |
| CA | 75 | PP | 25 | CA75-PP25 | 12,9 | 3,1 | 9,3 | 2,6 | 1,4 |
| CA | 50 | PP | 50 | CA50-PP50 | 13,2 | 2,4 | 6,5 | 3,5 | 1,9 |
| CA | 25 | PP | 75 | CA25-PP75 | 14,0 | 1,8 | 2,6 | 4,8 | 2,6 |
| CA | 75 | VE | 25 | CA75-VE25 | 31,2 | 4,0 | 5,8 | 0,6 | 0,3 |
| CA | 50 | VE | 50 | CA50-VE50 | 49,5 | 3,6 | 4,1 | 0,5 | 0,3 |
| CA | 25 | VE | 75 | CA25-VE75 | 67,6 | 3,4 | 2,5 | 0,4 | 0,2 |
| CA | 75 | ZE | 25 | CA75-ZE25 | 12,8 | 24,0 | 4,4 | 34,0 | 19,9 |
| CA | 50 | ZE | 50 | CA50-ZE50 | 11,6 | 26,5 | 1,9 | 42,6 | 23,1 |
| CA | 25 | ZE | 75 | CA25-ZE75 | 13,1 | 30,8 | 1,1 | 56,1 | 30,5 |
| CP | 75 | EC | 25 | CP75-EC25 | 6,2 | 3,0 | 6,5 | 3,2 | 0,2 |
| CP | 50 | EC | 50 | CP50-EC50 | 5,6 | 3,1 | 4,1 | 1,7 | 0,3 |
| CP | 25 | EC | 75 | CP25-EC75 | 7,4 | 3,2 | 3,7 | 1,7 | 0,2 |
| CP | 75 | PE | 25 | CP75-PE25 | 6,1 | 0,4 | 1,6 | 0,5 | 0,1 |
| CP | 50 | PE | 50 | CP50-PE50 | 6,9 | 0,3 | 1,5 | 1,0 | 0,0 |
| CP | 25 | PE | 75 | CP25-PE75 | 10,9 | 0,1 | 0,7 | 0,2 | 0,1 |
| CP | 75 | PP | 25 | CP75-PP25 | 5,9 | 0,3 | 1,7 | 0,6 | 0,2 |
| CP | 50 | PP | 50 | CP50-PP50 | 9,8 | 1,5 | 1,9 | 0,6 | 1,0 |
| CP | 25 | PP | 75 | CP25-PP75 | 12,1 | 0,9 | 1,1 | 0,5 | 0,9 |
| CP | 75 | VE | 25 | CP75-VE25 | 22,9 | 0,9 | 1,7 | 22,2 | 0,0 |
| CP | 50 | VE | 50 | CP50-VE50 | 26,9 | 0,9 | 1,8 | 18,7 | 0,0 |
| CP | 25 | VE | 75 | CP25-VE75 | 27,3 | 2,1 | 3,5 | 58,7 | 0,1 |
| CP | 75 | ZE | 25 | CP75-ZE25 | 5,4 | 13,3 | 1,5 | 3,7 | 14,2 |
| CP | 50 | ZE | 50 | CP50-ZE50 | 6,2 | 37,4 | 1,1 | 7,3 | 50,0 |
| CP | 25 | ZE | 75 | CP25-ZE75 | 7,8 | 27,1 | 0,5 | 4,9 | 31,6 |
| SC | 75 | EC | 25 | SC75-EC25 | 27,8 | 4,8 | 2,9 | 3,1 | 1,7 |
| SC | 50 | EC | 50 | SC50-EC50 | 15,1 | 5,0 | 2,0 | 1,9 | 1,1 |
| SC | 25 | EC | 75 | SC25-EC75 | 9,5 | 3,7 | 1,3 | 1,0 | 0,6 |
| SC | 75 | PE | 25 | SC75-PE25 | 32,7 | 2,5 | 2,8 | 2,7 | 1,5 |
| SC | 50 | PE | 50 | SC50-PE50 | 26,0 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 1,1 |
| SC | 25 | PE | 75 | SC25-PE75 | 13,0 | 1,2 | 0,8 | 0,9 | 0,5 |

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | CIC | Ca | K | Mg | Na |
|-----|----|-----|----|-----------|------------------------------------|------|-----|------|------|
| | | | | | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | |
| SC | 75 | PP | 25 | SC75-PP25 | 45,1 | 5,6 | 4,5 | 7,3 | 4,0 |
| SC | 50 | PP | 50 | SC50-PP50 | 30,4 | 2,8 | 1,9 | 4,6 | 2,5 |
| SC | 25 | PP | 75 | SC25-PP75 | 20,9 | 2,4 | 0,9 | 4,4 | 2,4 |
| SC | 75 | VE | 25 | SC75-VE25 | 69,0 | 6,8 | 3,9 | 6,9 | 3,7 |
| SC | 50 | VE | 50 | SC50-VE50 | 66,9 | 5,7 | 3,1 | 4,3 | 2,3 |
| SC | 25 | VE | 75 | SC25-VE75 | 74,8 | 4,3 | 2,0 | 1,9 | 1,0 |
| SC | 75 | ZE | 25 | SC75-ZE25 | 23,3 | 27,8 | 1,4 | 45,7 | 24,9 |
| SC | 50 | ZE | 50 | SC50-ZE50 | 16,6 | 26,9 | 0,8 | 42,1 | 22,9 |
| SC | 25 | ZE | 75 | SC25-ZE75 | 12,8 | 28,4 | 0,7 | 50,8 | 27,6 |

Tabla 37. Propiedades químicas y concentración de micronutrientes y P disponibles, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales".

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | Cu | Fe | Mn | Zn | P |
|-----|-----|-----|-----|-----------|---------------------|------|-------|------|--------|
| | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | |
| CA | 100 | | | CA100 | 0,5 | 3,5 | 35,1 | 5,1 | 1052,3 |
| SC | 100 | | | SC100 | 2,0 | 15,7 | 12,7 | 9,1 | 12,5 |
| CP | 100 | | | CP100 | | | | | |
| | | EC | 100 | EC100 | 4,6 | 14,7 | 5,9 | 6,4 | 376,6 |
| | | PE | 100 | PE100 | 0,5 | 2,8 | 5,1 | 1,2 | 17,9 |
| | | PP | 100 | PP100 | 0,3 | 2,5 | 2,1 | 2,7 | 15,8 |
| | | VE | 100 | VE100 | 2,0 | 21,5 | 48,47 | 3,9 | 4,2 |
| | | ZE | 100 | ZE100 | 0,1 | 2,2 | 4,1 | 0,2 | 4,6 |
| CA | 75 | EC | 25 | CA75-EC25 | 3,7 | 9,0 | 33,6 | 9,1 | 911,9 |
| CA | 50 | EC | 50 | CA50-EC50 | 4,6 | 12,1 | 22,8 | 8,1 | 627,3 |
| CA | 25 | EC | 75 | CA25-EC75 | 4,8 | 12,9 | 12,3 | 6,9 | 340,4 |
| CA | 75 | PE | 25 | CA75-PE25 | 0,6 | 3,2 | 30,8 | 6,5 | 1055,0 |
| CA | 50 | PE | 50 | CA50-PE50 | 0,5 | 2,0 | 24,4 | 5,5 | 398,5 |
| CA | 25 | PE | 75 | CA25-PE75 | 0,5 | 2,8 | 16,7 | 3,6 | 217,4 |
| CA | 75 | PP | 25 | CA75-PP25 | 0,5 | 3,2 | 24,4 | 6,3 | 1088,0 |
| CA | 50 | PP | 50 | CA50-PP50 | 0,4 | 2,9 | 23,9 | 4,7 | 659,3 |
| CA | 25 | PP | 75 | CA25-PP75 | 0,3 | 2,7 | 11,9 | 3,8 | 285,4 |
| CA | 75 | VE | 25 | CA75-VE25 | 1,2 | 11,5 | 66,5 | 13,3 | 1581,0 |
| CA | 50 | VE | 50 | CA50-VE50 | 1,5 | 18,9 | 58,9 | 10,1 | 1184,0 |
| CA | 25 | VE | 75 | CA25-VE75 | 1,7 | 23,8 | 53,9 | 7,0 | 555,6 |
| CA | 75 | ZE | 25 | CA75-ZE25 | 0,4 | 3,0 | 20,2 | 3,5 | 624,8 |
| CA | 50 | ZE | 50 | CA50-ZE50 | 0,4 | 2,8 | 8,2 | 1,5 | 273,1 |
| CA | 25 | ZE | 75 | CA25-ZE75 | 0,2 | 3,0 | 6,3 | 1,1 | 75,7 |

| ORG | % | MIN | % | SUSTRATO | Cu | Fe | Mn | Zn | P |
|-----|----|-----|----|-----------|---------------------|------|------|-----|-------|
| | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | |
| CP | 75 | EC | 25 | CP75-EC25 | | | | | |
| CP | 50 | EC | 50 | CP50-EC50 | | | | | |
| CP | 25 | EC | 75 | CP25-EC75 | | | | | |
| CP | 75 | PE | 25 | CP75-PE25 | | | | | |
| CP | 50 | PE | 50 | CP50-PE50 | | | | | |
| CP | 25 | PE | 75 | CP25-PE75 | | | | | |
| CP | 75 | PP | 25 | CP75-PP25 | | | | | |
| CP | 50 | PP | 50 | CP50-PP50 | | | | | |
| CP | 25 | PP | 75 | CP25-PP75 | | | | | |
| CP | 75 | VE | 25 | CP75-VE25 | | | | | |
| CP | 50 | VE | 50 | CP50-VE50 | | | | | |
| CP | 25 | VE | 75 | CP25-VE75 | | | | | |
| CP | 75 | ZE | 25 | CP75-ZE25 | | | | | |
| CP | 50 | ZE | 50 | CP50-ZE50 | | | | | |
| CP | 25 | ZE | 75 | CP25-ZE75 | | | | | |
| SC | 75 | EC | 25 | SC75-EC25 | 4,8 | 33,4 | 13,0 | 9,6 | 314,9 |
| SC | 50 | EC | 50 | SC50-EC50 | 6,7 | 25,6 | 6,1 | 9,3 | 363,1 |
| SC | 25 | EC | 75 | SC25-EC75 | 4,4 | 17,3 | 6,6 | 6,7 | 450,7 |
| SC | 75 | PE | 25 | SC75-PE25 | 1,1 | 8,1 | 6,3 | 5,1 | 4,2 |
| SC | 50 | PE | 50 | SC50-PE50 | 0,9 | 4,6 | 5,6 | 2,8 | 11,5 |
| SC | 25 | PE | 75 | SC25-PE75 | 0,7 | 2,6 | 5,5 | 1,9 | 12,1 |
| SC | 75 | PP | 25 | SC75-PP25 | 1,7 | 11,2 | 6,0 | 7,2 | 7,3 |
| SC | 50 | PP | 50 | SC50-PP50 | 0,9 | 7,0 | 4,6 | 4,6 | 5,1 |
| SC | 25 | PP | 75 | SC25-PP75 | 0,4 | 2,3 | 2,7 | 2,5 | 10,8 |
| SC | 75 | VE | 25 | SC75-VE25 | 3,3 | 22,6 | 30,5 | 8,8 | 13,9 |
| SC | 50 | VE | 50 | SC50-VE50 | 3,0 | 20,3 | 41,9 | 6,8 | 8,5 |
| SC | 25 | VE | 75 | SC25-VE75 | 2,2 | 17,9 | 42,3 | 4,9 | 5,8 |
| SC | 75 | ZE | 25 | SC75-ZE25 | 0,4 | 4,4 | 8,6 | 1,6 | 4,3 |
| SC | 50 | ZE | 50 | SC50-ZE50 | 0,2 | 2,8 | 5,0 | 0,4 | 4,7 |
| SC | 25 | ZE | 75 | SC25-ZE75 | 0,1 | 2,7 | 4,6 | 0,3 | 4,6 |

Tabla 38. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CE ds m ⁻¹ | pH | Ca | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ |
|----------|--------------------------|----|--------------------|---|----|----|----|-----------------|-----------------|
| | | | mg L ⁻¹ | | | | | | |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ | | | | | | | |
|-----------|--------------------|-------|------|-------------|--------------------|--------------|--------|-----------|-------|-----------------|-----------------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,40 | a | 8,20 | A | 27,17 | cdefghijkl | 611,40 | a | 44,63 | de | 130,50 | jklmn | 173,50 | ijkl | 21,90 | gh | 826,30 | a |
| CP100 | 0,20 | bcdef | 7,07 | ijklmnopq | 28,87 | cdefghijk | 142,90 | efg | 34,10 | ef | 115,80 | klmnopq | 129,20 | klmno | 59,40 | efgh | 76,70 | efghij |
| SC100 | 0,33 | ab | 7,17 | fghijklmnop | 15,43 | jklmnop | 125,30 | fghi | 7,20 | mno | 330,20 | bc | 335,60 | defg | 242,20 | ab | 23,67 | ij |
| EC100 | 0,10 | ef | 6,50 | R | 67,10 | a | 13,87 | pq | 12,10 | jklmno | 71,13 | pqrst | 97,30 | lmno | 204,10 | abc | 16,57 | ij |
| PE100 | 0,10 | ef | 6,73 | opqr | 40,40 | bcd | 6,40 | q | 8,93 | lmno | 33,10 | tu | 73,00 | lmno | 34,27 | fgh | 0,10 | j |
| PP100 | 0,23 | bcde | 7,53 | bcdefghi | 43,07 | bc | 5,57 | q | 9,73 | klmno | 68,00 | qrstu | 107,40 | lmno | 18,67 | gh | 0,53 | j |
| VE100 | 0,27 | abcd | 7,63 | Bcdefgh | 19,90 | hijklmnop | 45,67 | klmnopq | 68,70 | bc | 272,30 | de | 451,70 | bc | 39,37 | fgh | 0,17 | j |
| ZE100 | 0,10 | ef | 7,23 | efghijklmno | 10,13 | mno | 0,50 | q | 3,03 | o | 19,67 | u | 27,03 | o | 14,37 | h | 0,60 | j |
| CA75-ZE25 | 0,10 | ef | 7,67 | Abcdefg | 49,60 | b | 25,60 | nopq | 29,77 | efg | 76,93 | opqrst | 109,30 | klmno | 15,17 | h | 221,40 | c |
| CA75-VE25 | 0,33 | ab | 8,00 | ab | 19,63 | hijklmnop | 321,50 | b | 54,93 | cd | 212,00 | ghi | 333,10 | defg | 26,97 | gh | 417,30 | b |
| CA75-PP25 | 0,20 | bcdef | 7,80 | abcd | 26,23 | defghijklmn | 124,50 | fghi | 14,20 | ghijklmno | 118,50 | klmnop | 174,90 | ijkl | 21,67 | gh | 113,00 | defgh |
| CA75-PE25 | 0,10 | ef | 7,37 | cdefghijkl | 20,83 | ghijklmnop | 19,33 | opq | 8,77 | lmno | 78,73 | opqrst | 113,70 | klmno | 36,60 | fgh | 16,27 | ij |
| CA75-EC25 | 0,20 | bcdef | 7,77 | abcde | 22,33 | fghijklmnop | 214,00 | cd | 19,97 | fghijklmn | 109,00 | lmnopqr | 159,90 | ijkl | 91,70 | defgh | 217,70 | c |
| CA50-ZE50 | 0,10 | ef | 7,57 | bcdefghi | 39,40 | bcde | 7,43 | q | 14,53 | ghijklmno | 58,97 | rstu | 51,07 | mno | 15,37 | h | 143,80 | cde |
| CA50-VE50 | 0,30 | abc | 7,90 | abc | 24,40 | defghijklmno | 208,00 | cde | 65,33 | c | 238,50 | efg | 384,00 | cde | 18,70 | gh | 370,60 | b |
| CA50-PP50 | 0,20 | bcdef | 7,73 | abcde | 23,37 | efghijklmnop | 92,27 | fghijklmn | 10,60 | jklmno | 105,30 | mnopqr | 166,10 | ijkl | 24,50 | gh | 79,03 | defghij |
| CA50-PE50 | 0,13 | def | 7,67 | abcdefg | 15,07 | klmnop | 59,40 | ijklmnopq | 10,83 | jklmno | 79,17 | opqrst | 142,00 | jklm | 25,07 | gh | 84,63 | defghij |
| CA50-EC50 | 0,17 | cdef | 7,60 | bcdefghi | 27,47 | cdefghijkl | 108,00 | fghijk | 12,77 | ijklmno | 77,80 | opqrst | 126,00 | klmno | 286,50 | a | 141,30 | cdef |
| CA25-ZE75 | 0,10 | ef | 7,43 | cdefghijk | 33,77 | bcdefgh | 3,80 | q | 11,07 | jklmno | 60,53 | rstu | 35,50 | no | 62,50 | efgh | 124,00 | defg |
| CA25-VE75 | 0,30 | abc | 7,70 | abcdef | 23,43 | efghijklmnop | 93,30 | fghijklm | 63,47 | c | 253,20 | defg | 430,30 | bcd | 31,20 | gh | 165,10 | cd |
| CA25-PP75 | 0,17 | cdef | 7,73 | abcde | 31,27 | cdefghijk | 34,83 | mnopq | 15,07 | ghijklmno | 107,00 | lmnopqr | 165,50 | ijkl | 17,07 | gh | 56,97 | efghij |
| CA25-PE75 | 0,17 | cdef | 7,73 | abcde | 19,10 | hijklmnop | 112,80 | fghij | 25,00 | fghijk | 84,13 | nopqrs | 139,20 | jklmn | 20,70 | gh | 219,20 | c |
| CA25-EC75 | 0,10 | ef | 7,47 | bcdefghij | 32,87 | cdefghi | 60,80 | ijklmnopq | 10,83 | jklmno | 73,17 | pqrst | 111,30 | klmno | 85,80 | defgh | 92,93 | defghi |
| CP75-ZE25 | 0,17 | cdef | 6,93 | jklmnopqr | 31,80 | cdefghij | 54,20 | jklmnopq | 21,70 | fghijklm | 94,07 | nopqrs | 254,30 | fghi | 58,57 | efgh | 28,90 | hij |
| CP75-VE25 | 0,13 | def | 6,93 | jklmnopqr | 37,50 | bcdef | 31,70 | mnopq | 15,77 | ghijklmno | 81,83 | nopqrst | 111,30 | klmno | 69,07 | efgh | 17,50 | ij |
| CP75-PP25 | 0,23 | bcde | 6,90 | klmnopqr | 26,47 | defghijklm | 152,50 | def | 98,47 | a | 179,30 | hij | 238,30 | ghij | 98,23 | defgh | 63,57 | efghij |
| CP75-PE25 | 0,20 | bcdef | 6,63 | pqr | 34,80 | bcdefgh | 85,03 | ghijklmno | 25,20 | fghijk | 115,70 | klmnopq | 96,47 | lmno | 61,93 | efgh | 78,17 | defghij |
| CP75-EC25 | 0,20 | bcdef | 7,07 | ijklmnopq | 26,93 | cdefghijkl | 108,00 | fghijk | 32,20 | ef | 116,30 | klmnopq | 120,80 | klmno | 58,43 | efgh | 86,73 | defghij |
| CP50-ZE50 | 0,20 | bcdef | 6,97 | jklmnopqr | 27,60 | cdefghijkl | 106,00 | fghijkl | 61,07 | c | 145,30 | jklm | 168,30 | ijkl | 62,53 | efgh | 61,07 | efghij |
| CP50-VE50 | 0,17 | cdef | 6,90 | klmnopqr | 31,83 | cdefghij | 115,30 | fghij | 23,63 | fghijkl | 105,00 | mnopqr | 129,20 | klmno | 51,67 | efgh | 57,57 | efghij |
| CP50-PP50 | 0,13 | def | 6,77 | nopqr | 36,73 | bcdefg | 6,73 | q | 13,73 | hijklmno | 98,40 | mnopqr | 100,10 | lmno | 47,33 | fgh | 27,57 | hij |
| CP50-PE50 | 0,17 | cdef | 6,80 | mnopqr | 38,17 | bcdef | 84,43 | ghijklmno | 25,60 | fghij | 113,40 | klmnopq | 104,50 | lmno | 66,80 | efgh | 65,03 | efghij |
| CP50-EC50 | 0,20 | bcdef | 6,87 | lmnopqr | 33,73 | bcdefghi | 49,73 | jklmnopq | 29,37 | efgh | 118,60 | klmnop | 140,00 | jklmn | 57,07 | efgh | 69,43 | efghij |
| CP25-ZE75 | 0,33 | ab | 7,10 | hijklmnopq | 30,53 | cdefghijk | 158,40 | cdef | 82,97 | ab | 156,50 | jkl | 261,20 | fghi | 72,27 | efgh | 73,20 | efghij |
| CP25-VE75 | 0,13 | def | 7,07 | ijklmnopq | 35,30 | bcdefgh | 48,87 | jklmnopq | 21,67 | fghijklm | 102,10 | mnopqr | 123,20 | klmno | 56,60 | efgh | 49,20 | ghij |
| CP25-PP75 | 0,07 | f | 6,57 | qr | 40,23 | bcd | 7,27 | q | 14,50 | ghijklmno | 96,43 | mnopqrs | 39,40 | mno | 33,23 | fgh | 55,50 | fghij |
| CP25-PE75 | 0,10 | ef | 7,13 | ghijklmnop | 40,20 | bcd | 24,07 | opq | 14,77 | ghijklmno | 90,27 | nopqrs | 105,70 | lmno | 61,93 | efgh | 23,17 | ij |
| CP25-EC75 | 0,20 | bcdef | 6,63 | pqr | 39,60 | bcde | 48,93 | jklmnopq | 25,27 | fghijk | 124,90 | klmno | 134,00 | jklmn | 65,03 | efgh | 79,77 | defghij |
| SC75-ZE25 | 0,10 | ef | 7,07 | ijklmnopq | 22,60 | fghijklmnop | 5,73 | q | 10,17 | jklmno | 83,90 | nopqrs | 140,00 | jklmn | 38,70 | fgh | 7,37 | ij |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | |
|-----------|--------------------|-------|------|--------------|--------------------|--------------|--------|-----------|-------|---------|--------|---------|--------|-------|-----------------|-------|-----------------|---------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| SC75-VE25 | 0,30 | abc | 7,27 | defghijklmno | 20,87 | ghijklmnop | 220,70 | c | 28,13 | fghi | 421,90 | a | 688,20 | a | 173,90 | bcd | 28,40 | hij |
| SC75-PP25 | 0,20 | bcdef | 7,23 | efghijklmno | 8,73 | op | 107,30 | fghijk | 4,33 | no | 341,90 | bc | 415,60 | bcd | 98,70 | defgh | 23,07 | ij |
| SC75-PE25 | 0,10 | ef | 7,33 | defghijklm | 9,70 | nop | 139,90 | fgh | 3,73 | o | 265,60 | def | 349,30 | cdef | 117,50 | cdefg | 15,50 | ij |
| SC75-EC25 | 0,10 | ef | 7,47 | bcdefghij | 11,40 | lmnop | 52,43 | ijklmnopq | 4,33 | no | 291,80 | cd | 288,70 | efgh | 133,90 | cdef | 85,63 | defghij |
| SC50-ZE50 | 0,10 | ef | 7,27 | defghijklmno | 17,20 | ijklmnop | 2,30 | q | 5,73 | no | 59,27 | rstu | 82,57 | lmno | 75,27 | defgh | 2,90 | j |
| SC50-VE50 | 0,30 | abc | 7,30 | defghijklmn | 20,10 | hijklmnop | 126,00 | fghi | 44,50 | de | 379,90 | ab | 624,10 | a | 151,30 | bcde | 17,70 | ij |
| SC50-PP50 | 0,20 | bcdef | 7,40 | cdefghijkl | 11,80 | lmnop | 34,83 | mnopq | 6,17 | mno | 217,20 | fgh | 252,40 | fghi | 81,07 | defgh | 7,67 | ij |
| SC50-PE50 | 0,20 | bcdef | 7,43 | cdefghijk | 6,93 | p | 39,73 | lmnopq | 2,57 | o | 162,60 | ijk | 213,00 | hijk | 68,50 | efgh | 5,70 | j |
| SC50-EC50 | 0,17 | cdef | 7,13 | ghijklmnop | 23,93 | defghijklmno | 15,37 | pq | 11,63 | ijklmno | 116,30 | klmnopq | 167,90 | ijkl | 82,43 | defgh | 44,43 | ghij |
| SC25-ZE75 | 0,10 | ef | 7,43 | cdefghijk | 12,07 | lmnop | 1,07 | q | 3,53 | o | 46,70 | stu | 71,00 | lmno | 27,97 | gh | 1,27 | j |
| SC25-VE75 | 0,23 | bcde | 7,30 | defghijklmn | 20,00 | hijklmnop | 75,17 | hijklmnop | 56,27 | cd | 325,80 | c | 506,30 | b | 73,47 | defgh | 2,47 | j |
| SC25-PP75 | 0,20 | bcdef | 7,47 | bcdefghij | 8,57 | op | 36,23 | mnopq | 4,63 | no | 180,70 | hij | 285,80 | efgh | 236,50 | ab | 5,07 | j |
| SC25-PE75 | 0,10 | ef | 7,33 | defghijklm | 9,33 | op | 17,43 | pq | 5,13 | no | 92,87 | nopqrs | 142,80 | jklm | 46,53 | fgh | 2,10 | j |
| SC25-EC75 | 0,10 | ef | 7,27 | defghijklmno | 33,00 | cdefghi | 12,20 | pq | 9,67 | klmno | 78,20 | opqrst | 112,10 | klmno | 86,87 | defgh | 27,33 | hij |

Tabla 39. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | |
|----------|--------------------|------|------|-------|--------------------|------|--------|-----|-------|-----|--------|------|--------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,40 | a | 8,20 | a | 27,17 | cdef | 611,40 | a | 44,63 | ab | 130,50 | defg | 173,50 | defg | 21,90 | ef | 826,30 | a |
| CP100 | 0,20 | cdef | 7,07 | cdefg | 28,87 | bcde | 142,90 | bc | 34,10 | abc | 115,80 | defg | 129,20 | efg | 59,40 | def | 76,70 | def |
| SC100 | 0,33 | ab | 7,17 | cdef | 15,43 | efg | 125,30 | bcd | 7,20 | c | 330,20 | ab | 335,60 | bc | 242,20 | a | 23,67 | ef |
| EC100 | 0,10 | f | 6,50 | g | 67,10 | a | 13,87 | cd | 12,10 | bc | 71,13 | fg | 97,30 | fg | 204,10 | ab | 16,57 | ef |
| PE100 | 0,10 | f | 6,73 | fg | 40,40 | bc | 6,40 | d | 8,93 | bc | 33,10 | fg | 73,00 | fg | 34,27 | ef | 0,10 | f |
| PP100 | 0,23 | bcde | 7,53 | bc | 43,07 | b | 5,57 | d | 9,73 | bc | 68,00 | fg | 107,40 | fg | 18,67 | f | 0,53 | f |
| VE100 | 0,27 | abcd | 7,63 | abc | 19,90 | defg | 45,67 | cd | 68,70 | a | 272,30 | bc | 451,70 | b | 39,37 | ef | 0,17 | f |
| ZE100 | 0,10 | f | 7,23 | cde | 10,13 | fg | 0,50 | d | 3,03 | c | 19,67 | g | 27,03 | g | 14,37 | f | 0,60 | f |
| CA_EC | 0,16 | def | 7,61 | bc | 27,56 | cde | 127,60 | bc | 14,52 | bc | 86,66 | fg | 132,40 | efg | 154,70 | ab | 150,60 | cd |
| CA_PE | 0,13 | ef | 7,59 | bc | 18,33 | efg | 63,86 | cd | 14,87 | bc | 80,68 | fg | 131,60 | efg | 27,46 | ef | 106,70 | cde |
| CA_PP | 0,19 | cdef | 7,76 | ab | 26,96 | cdef | 83,87 | cd | 13,29 | bc | 110,20 | defg | 168,80 | defg | 21,08 | f | 83,00 | cdef |
| CA_VE | 0,31 | ab | 7,87 | ab | 22,49 | def | 207,60 | b | 61,24 | a | 234,60 | bc | 382,50 | b | 25,62 | ef | 317,70 | b |
| CA_ZE | 0,10 | f | 7,56 | bc | 40,92 | b | 12,28 | d | 18,46 | bc | 65,48 | fg | 65,28 | g | 31,01 | ef | 163,10 | c |
| CP_EC | 0,20 | cde | 6,86 | efg | 33,42 | bc | 68,90 | cd | 28,94 | bc | 119,90 | defg | 131,60 | efg | 60,18 | def | 78,64 | def |
| CP_PE | 0,16 | def | 6,86 | efg | 37,72 | bc | 64,51 | cd | 21,86 | bc | 106,50 | defg | 102,20 | fg | 63,56 | cdef | 55,46 | ef |
| CP_PP | 0,14 | def | 6,74 | fg | 34,48 | bc | 55,51 | cd | 42,23 | ab | 124,70 | defg | 125,90 | fg | 59,60 | def | 48,88 | ef |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | | |
|----------|--------------------|------|------|------|--------------------|-----|--------|----|-------|----|--------|-----|--------|-----|-----------------|------|-----------------|----|--|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | |
| CP_VE | 0,14 | def | 6,97 | defg | 34,88 | bc | 65,29 | cd | 20,36 | bc | 96,31 | efg | 121,20 | fg | 59,11 | def | 41,42 | ef | |
| CP_ZE | 0,23 | bcd | 7,00 | defg | 29,98 | bcd | 106,20 | cd | 55,24 | a | 132,00 | def | 227,90 | cde | 64,46 | cdef | 54,39 | ef | |
| SC_EC | 0,12 | ef | 7,29 | cd | 22,78 | def | 26,67 | cd | 8,54 | c | 162,10 | de | 189,60 | def | 101,10 | bode | 52,47 | ef | |
| SC_PE | 0,13 | ef | 7,37 | c | 8,66 | g | 65,68 | cd | 3,81 | c | 173,70 | cd | 235,00 | cd | 77,50 | cdef | 7,77 | f | |
| SC_PP | 0,20 | cdef | 7,37 | c | 9,70 | g | 59,47 | cd | 5,04 | c | 246,60 | bc | 317,90 | bc | 138,80 | abc | 11,93 | f | |
| SC_VE | 0,28 | abc | 7,29 | cd | 20,32 | def | 140,60 | bc | 42,97 | ab | 375,90 | a | 606,20 | a | 132,90 | bcd | 16,19 | f | |
| SC_ZE | 0,10 | f | 7,26 | cd | 17,29 | efg | 3,03 | d | 6,48 | c | 63,29 | fg | 97,84 | fg | 47,31 | ef | 3,84 | f | |

Tabla 40. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | | |
|-----------|--------------------|-------|------|-----------|--------------------|---------------|--------|------------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|-----------------|--------------|-----------------|----------|--|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,37 | a | 8,03 | a | 49,27 | bcdefghijk | 332,00 | a | 67,13 | de | 190,60 | fghi | 263,20 | cdefg | 43,73 | nopqr | 294,70 | b | |
| CP100 | 0,23 | abcde | 6,57 | opq | 56,77 | bcdefgh | 82,57 | defghijk | 47,10 | fgh | 174,00 | fghijk | 109,70 | klm | 69,77 | jklmnopqr | 115,80 | de | |
| SC100 | 0,27 | abcd | 7,30 | defghijk | 4,30 | s | 42,30 | ijklmno | 2,80 | q | 148,60 | ghijkl | 117,50 | klm | 72,47 | ijklmnopqr | 16,70 | lmno | |
| EC100 | 0,10 | e | 7,17 | fghijkl | 57,43 | bcdefg | 9,03 | mno | 12,60 | klmnopq | 84,57 | jklmn | 132,80 | ijklm | 80,77 | ghijklmnop | 9,47 | mno | |
| PE100 | 0,10 | e | 7,23 | efghijk | 38,87 | fghijklmnop | 10,10 | mno | 8,47 | mnopq | 66,67 | lmn | 104,10 | klm | 39,13 | opqr | 0,37 | o | |
| PP100 | 0,20 | bcde | 7,43 | bcdefghi | 32,10 | ghijklmnopqr | 6,70 | no | 7,97 | mnopq | 67,63 | lmn | 101,10 | klm | 19,70 | qr | 2,73 | o | |
| VE100 | 0,20 | bcde | 7,37 | cdefghij | 26,03 | klmnopqrs | 62,10 | fghijklmno | 75,70 | cd | 364,50 | bc | 560,70 | a | 75,63 | hijklmnopq | 6,17 | no | |
| ZE100 | 0,10 | e | 7,03 | hijklmno | 11,20 | qrs | 0,70 | o | 3,40 | q | 22,77 | n | 27,93 | m | 15,90 | r | 0,27 | o | |
| CA75-EC25 | 0,20 | bcde | 7,53 | abcdefgh | 39,73 | efghijklmnop | 121,70 | bcdefg | 24,83 | ijklmno | 122,70 | hijklmn | 175,40 | efghijk | 69,87 | jklmnopqr | 93,60 | defg | |
| CA75-PE25 | 0,30 | abc | 7,83 | abc | 39,20 | efghijklmnop | 130,30 | bcdef | 55,37 | ef | 167,50 | fghijkl | 295,90 | bcd | 52,03 | mnopqr | 161,60 | c | |
| CA75-PP25 | 0,30 | abc | 7,80 | abcd | 56,20 | bcdefghi | 167,20 | bc | 29,80 | hijkl | 167,80 | fghijkl | 305,10 | bc | 38,33 | pqr | 107,10 | def | |
| CA75-VE25 | 0,33 | ab | 7,77 | abcd | 65,87 | bcd | 376,30 | a | 131,40 | a | 331,20 | bcd | 550,40 | a | 121,50 | cdefghij | 443,60 | a | |
| CA75-ZE25 | 0,27 | abcd | 7,90 | ab | 95,90 | a | 24,87 | ijklmno | 46,87 | fgh | 103,40 | ijklmn | 252,80 | cdefghi | 34,73 | pqr | 164,90 | c | |
| CA50-EC50 | 0,20 | bcde | 7,33 | cdefghijk | 53,77 | bcdefghij | 82,07 | defghijk | 21,33 | ijklmnopq | 105,40 | ijklmn | 152,40 | fghijkl | 150,30 | bcd | 64,40 | fghij | |
| CA50-PE50 | 0,27 | abcd | 7,90 | ab | 37,97 | fghijklmnop | 145,60 | bcd | 35,07 | ghi | 132,40 | hijklm | 278,70 | cde | 62,40 | klmnopqr | 126,40 | cd | |
| CA50-PP50 | 0,23 | abcde | 7,60 | abcdefg | 50,53 | bcdefghijk | 110,70 | bcdefgh | 22,47 | ijklmnop | 149,60 | ghijkl | 257,60 | cdefgh | 40,53 | nopqr | 50,73 | ghijklm | |
| CA50-VE50 | 0,23 | abcde | 7,73 | abcde | 54,10 | bcdefghij | 178,70 | b | 110,80 | b | 358,80 | bc | 561,50 | a | 157,80 | bc | 169,50 | c | |
| CA50-ZE50 | 0,20 | bcde | 7,93 | ab | 61,43 | bcdef | 6,37 | no | 25,23 | ijklmn | 99,97 | ijklmn | 114,90 | klm | 32,13 | pqr | 132,00 | cd | |
| CA25-EC75 | 0,17 | cde | 7,47 | bcdefghi | 55,13 | bcdefghij | 48,70 | hijklmno | 20,67 | ijklmnopq | 125,90 | hijklmn | 165,10 | efghijk | 130,90 | cdefgh | 48,83 | hijklmn | |
| CA25-PE75 | 0,20 | bcde | 7,57 | abcdefg | 47,00 | cdefghijklm | 38,73 | ijklmno | 17,23 | ijklmnopq | 125,30 | hijklmn | 164,30 | efghijk | 50,50 | mnopqr | 30,53 | hijklmno | |
| CA25-PP75 | 0,27 | abcd | 7,63 | abcdef | 33,87 | ghijklmnopq | 43,20 | hijklmno | 14,10 | klmnopq | 101,10 | ijklmn | 156,60 | fghijkl | 19,87 | qr | 30,50 | hijklmno | |
| CA25-VE75 | 0,20 | bcde | 7,80 | abcd | 41,87 | cdefghijklmno | 101,30 | cdefghi | 89,47 | c | 377,00 | b | 555,10 | a | 97,37 | defghijklmno | 61,70 | ghijk | |
| CA25-ZE75 | 0,10 | e | 7,80 | abcd | 17,47 | opqrs | 2,30 | o | 7,93 | mnopq | 38,03 | mn | 37,83 | lm | 27,17 | pqr | 28,27 | ijklmno | |
| CP75-EC25 | 0,20 | bcde | 6,57 | opq | 64,53 | bcde | 64,17 | fghijklmno | 34,97 | ghi | 137,00 | hijklm | 132,00 | ijklm | 117,40 | cdefghijkl | 93,43 | defg | |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | |
|-----------|--------------------|------|------|-----------|--------------------|---------------|--------|------------|-------|-----------|--------|---------|--------|----------|-----------------|--------------|-----------------|----------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| CP75-PE25 | 0,20 | bcde | 6,63 | mnopq | 23,80 | lmnopqrs | 137,50 | bcde | 25,50 | ijklm | 135,90 | hijklm | 147,60 | ghijklm | 52,77 | mnopqr | 74,03 | efgh |
| CP75-PP25 | 0,20 | bcde | 6,43 | q | 43,40 | cdefghijklmn | 57,30 | ghijklmno | 30,20 | hijkl | 141,10 | hijklm | 124,10 | klm | 56,63 | mnopqr | 54,73 | ghijkl |
| CP75-VE25 | 0,30 | abc | 6,60 | nopq | 23,43 | lmnopqrs | 134,40 | bcde | 57,43 | def | 186,40 | ghij | 132,30 | ijklm | 58,20 | mnopqr | 71,53 | fghi |
| CP75-ZE25 | 0,10 | e | 6,43 | q | 34,10 | ghijklmnopq | 5,43 | no | 13,00 | klmnopq | 84,53 | ijklm | 84,57 | klm | 58,53 | mnopqr | 27,80 | ijklmno |
| CP50-EC50 | 0,20 | bcde | 7,13 | fghijklm | 73,10 | ab | 25,23 | ijklmno | 26,83 | ijklm | 130,60 | hijklm | 169,90 | efghijk | 98,47 | cdefghijklmn | 33,40 | hijklmno |
| CP50-PE50 | 0,17 | cde | 6,83 | klmnopq | 31,27 | ijklmnopqr | 56,60 | ghijklmno | 21,70 | ijklmnopq | 125,50 | hijklm | 109,70 | klm | 54,50 | mnopqr | 33,77 | hijklmno |
| CP50-PP50 | 0,20 | bcde | 6,50 | pq | 46,63 | cdefghijklm | 49,43 | hijklmno | 31,33 | hijk | 143,40 | ghijkl | 148,30 | ghijkl | 51,30 | mnopqr | 41,33 | hijklmno |
| CP50-VE50 | 0,20 | bcde | 6,53 | opq | 23,30 | lmnopqrs | 79,10 | defghijkl | 63,40 | def | 144,30 | ghijkl | 146,40 | ghijklm | 80,13 | ghijklmnop | 48,60 | hijklm |
| CP50-ZE50 | 0,10 | e | 6,40 | q | 40,83 | defghijklmnop | 8,17 | no | 15,63 | ijklmnopq | 84,00 | ijklm | 78,97 | klm | 54,80 | mnopqr | 41,00 | hijklmno |
| CP25-EC75 | 0,20 | bcde | 7,10 | ghijklmn | 67,13 | bc | 27,03 | ijklmno | 20,30 | ijklmnopq | 126,30 | hijklm | 142,40 | hijklm | 118,10 | cdefghijk | 15,37 | lmno |
| CP25-PE75 | 0,17 | cde | 6,87 | ijklmnopq | 31,70 | hijklmnopqr | 58,20 | ghijklmno | 18,80 | ijklmnopq | 108,50 | ijklm | 138,80 | hijklm | 59,67 | lmnopqr | 24,83 | ijklmno |
| CP25-PP75 | 0,20 | bcde | 6,53 | opq | 48,40 | bcdefghijkl | 32,47 | ijklmno | 24,83 | ijklmno | 142,40 | ghijklm | 169,90 | efghijk | 48,77 | mnopqr | 17,80 | klmno |
| CP25-VE75 | 0,27 | abcd | 6,63 | mnopq | 17,10 | opqrs | 122,80 | bcdefg | 67,53 | de | 180,80 | fghij | 272,40 | cdef | 72,33 | ijklmnopqr | 24,07 | ijklmno |
| CP25-ZE75 | 0,10 | e | 6,67 | lmnopq | 25,17 | klmnopqrs | 1,67 | o | 8,57 | mnopq | 73,00 | klmn | 73,40 | klm | 42,40 | nopqr | 6,10 | no |
| SC75-EC25 | 0,13 | de | 7,30 | defghijk | 8,23 | rs | 28,47 | ijklmno | 4,30 | pq | 164,90 | fghijkl | 172,30 | efghijk | 102,90 | cdefghijklm | 49,40 | ghijklmn |
| SC75-PE25 | 0,13 | de | 7,23 | efghijk | 6,87 | rs | 32,37 | ijklmno | 3,50 | q | 162,10 | ghijkl | 180,70 | defghijk | 117,70 | cdefghijkl | 8,87 | mno |
| SC75-PP25 | 0,27 | abcd | 7,33 | cdefghijk | 15,53 | pqrs | 77,13 | efghijklm | 6,07 | opq | 270,00 | cdef | 348,10 | bc | 82,00 | fghijklmnop | 11,60 | lmno |
| SC75-VE25 | 0,17 | cde | 7,50 | bcdefghi | 12,10 | qrs | 84,57 | defghij | 12,20 | lmnopq | 310,20 | bcde | 357,40 | bc | 133,10 | cdefgh | 14,67 | lmno |
| SC75-ZE25 | 0,10 | e | 7,13 | fghijklm | 30,30 | ijklmnopqr | 6,87 | no | 13,67 | klmnopq | 107,70 | ijklm | 179,10 | defghijk | 57,60 | mnopqr | 3,67 | o |
| SC50-EC50 | 0,17 | cde | 7,00 | ijklmnop | 30,17 | ijklmnopqr | 14,27 | klmno | 12,63 | klmnopq | 137,30 | hijklm | 178,30 | defghijk | 141,10 | bcde | 29,33 | ijklmno |
| SC50-PE50 | 0,20 | bcde | 7,30 | defghijk | 6,90 | rs | 46,97 | hijklmno | 5,43 | pq | 217,40 | efgh | 244,90 | cdefghij | 130,70 | cdefghi | 13,73 | lmno |
| SC50-PP50 | 0,33 | ab | 7,03 | hijklmno | 61,13 | bcdef | 72,53 | efghijklmn | 14,77 | ijklmnopq | 344,00 | bcd | 328,60 | bc | 84,67 | efghijklmnop | 15,70 | lmno |
| SC50-VE50 | 0,20 | bcde | 7,33 | cdefghijk | 22,63 | mnopqrs | 63,00 | fghijklmno | 33,17 | ghij | 525,00 | a | 415,40 | b | 216,10 | a | 33,03 | hijklmno |
| SC50-ZE50 | 0,10 | e | 7,23 | efghijk | 25,70 | klmnopqrs | 3,10 | o | 8,50 | mnopq | 93,13 | ijklm | 113,70 | klm | 84,87 | efghijklmnop | 4,00 | o |
| SC25-EC75 | 0,13 | de | 7,03 | hijklmno | 36,23 | fghijklmnopq | 12,33 | lmno | 12,83 | klmnopq | 110,90 | ijklm | 169,90 | efghijk | 135,50 | cdefg | 16,63 | lmno |
| SC25-PE75 | 0,10 | e | 7,37 | cdefghij | 17,73 | opqrs | 14,67 | klmno | 9,63 | mnopq | 127,60 | hijklm | 157,90 | fghijkl | 68,70 | ijklmnopqr | 4,37 | o |
| SC25-PP75 | 0,27 | abcd | 7,10 | ghijklmn | 19,37 | nopqrs | 49,07 | hijklmno | 14,23 | ijklmnopq | 247,30 | defg | 268,80 | cdef | 198,70 | ab | 6,97 | mno |
| SC25-VE75 | 0,20 | bcde | 7,37 | cdefghij | 26,27 | klmnopqrs | 57,63 | ghijklmno | 51,73 | efg | 330,50 | bcd | 412,40 | b | 139,10 | cdef | 9,53 | mno |
| SC25-ZE75 | 0,10 | e | 7,13 | fghijklm | 21,73 | mnopqrs | 2,00 | o | 6,53 | nopq | 85,63 | ijklm | 94,53 | klm | 76,13 | hijklmnopq | 2,30 | o |

Tabla 41. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cl | | SO ₄ | | PO ₄ | |
|----------|--------------------|---|------|---|--------------------|------|--------|---|-------|---|--------|----|--------|----|-----------------|---|-----------------|---|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,37 | a | 8,03 | a | 49,27 | abcd | 332,00 | a | 67,13 | b | 190,60 | cd | 263,20 | cd | 43,73 | d | 294,70 | a |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | K | Mg | Na | Cl | SO ₄ | PO ₄ | | | | | | | |
|----------|--------------------|------|------|------|--------------------|------|--------|-----|--------|-----------------|-----------------|-----|--------|------|--------|-----|--------|----|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| CP100 | 0,23 | abcd | 6,57 | g | 56,77 | abc | 82,57 | cde | 47,10 | bc | 174,00 | de | 109,70 | efg | 69,77 | cd | 115,80 | bc |
| SC100 | 0,27 | abcd | 7,30 | cde | 4,30 | e | 42,30 | cde | 2,80 | g | 148,60 | def | 117,50 | efg | 72,47 | cd | 16,70 | c |
| EC100 | 0,10 | e | 7,17 | cdef | 57,43 | abc | 9,03 | de | 12,60 | defg | 84,57 | def | 132,80 | efg | 80,77 | bcd | 9,47 | c |
| PE100 | 0,10 | e | 7,23 | cde | 38,87 | bcde | 10,10 | de | 8,47 | fg | 66,67 | ef | 104,10 | efg | 39,13 | d | 0,37 | c |
| PP100 | 0,20 | bcde | 7,43 | bcd | 32,10 | cde | 6,70 | de | 7,97 | fg | 67,63 | ef | 101,10 | efg | 19,70 | d | 2,73 | c |
| VE100 | 0,20 | bcde | 7,37 | bcd | 26,03 | cde | 62,10 | cde | 75,70 | b | 364,50 | ab | 560,70 | a | 75,63 | bcd | 6,17 | c |
| ZE100 | 0,10 | e | 7,03 | def | 11,20 | de | 0,70 | e | 3,40 | g | 22,77 | f | 27,93 | g | 15,90 | d | 0,27 | c |
| CA_EC | 0,19 | cde | 7,44 | bc | 49,54 | abc | 84,16 | cd | 22,28 | cdefg | 118,00 | def | 164,30 | def | 117,00 | abc | 68,94 | c |
| CA_PE | 0,26 | abcd | 7,77 | a | 41,39 | bcd | 104,90 | c | 35,89 | cd | 141,70 | def | 246,30 | cd | 54,98 | d | 106,20 | c |
| CA_PP | 0,27 | abc | 7,68 | ab | 46,87 | abcd | 107,00 | c | 22,12 | cdefg | 139,50 | def | 239,80 | cd | 32,91 | d | 62,77 | c |
| CA_VE | 0,26 | abcd | 7,77 | a | 53,94 | abc | 218,80 | b | 110,60 | a | 355,70 | ab | 555,70 | a | 125,60 | ab | 224,90 | ab |
| CA_ZE | 0,19 | cde | 7,88 | a | 58,27 | ab | 11,18 | de | 26,68 | cdef | 80,46 | ef | 135,20 | efg | 31,34 | d | 108,40 | c |
| CP_EC | 0,20 | bcd | 6,93 | ef | 68,26 | a | 38,81 | cde | 27,37 | cdef | 131,30 | def | 148,10 | defg | 111,30 | bc | 47,40 | c |
| CP_PE | 0,18 | cde | 6,78 | fg | 28,92 | cde | 84,09 | cd | 22,00 | cdefg | 123,30 | def | 132,00 | efg | 55,64 | d | 44,21 | c |
| CP_PP | 0,20 | bcd | 6,49 | g | 46,14 | abcd | 46,40 | cde | 28,79 | cde | 142,30 | def | 147,40 | defg | 52,23 | d | 37,96 | c |
| CP_VE | 0,26 | abcd | 6,59 | g | 21,28 | de | 112,10 | c | 62,79 | b | 170,50 | de | 183,70 | de | 70,22 | cd | 48,07 | c |
| CP_ZE | 0,10 | e | 6,50 | g | 33,37 | cde | 5,09 | e | 12,40 | efg | 80,51 | ef | 78,98 | fg | 51,91 | d | 24,97 | c |
| SC_EC | 0,14 | de | 7,11 | def | 24,88 | cde | 18,36 | de | 9,92 | fg | 137,70 | def | 173,50 | de | 126,50 | ab | 31,79 | c |
| SC_PE | 0,14 | de | 7,30 | cd | 10,50 | e | 31,33 | de | 6,19 | g | 169,00 | de | 194,50 | de | 105,70 | bc | 8,99 | c |
| SC_PP | 0,29 | ab | 7,16 | cdef | 32,01 | cde | 66,24 | cde | 11,69 | efg | 287,10 | bc | 315,20 | bc | 121,80 | ab | 11,42 | c |
| SC_VE | 0,19 | cde | 7,40 | bcd | 20,33 | de | 68,40 | cde | 32,37 | cd | 388,60 | a | 395,10 | b | 162,80 | a | 19,08 | c |
| SC_ZE | 0,10 | e | 7,17 | cdef | 25,91 | cde | 3,99 | e | 9,57 | fg | 95,49 | def | 129,10 | efg | 72,87 | cd | 3,32 | c |

Tabla 42. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CIC | | Ca | K | Mg | Na | Cu | Fe | Mn | Zn | | | | | | | | |
|----------|------------------------------------|----------|-------|--------|------|----|---------------------|-----|-------|-----|------|-------------|-------|----------|-------|----------|-------|-------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 18,63 | ijklmnop | 7,83 | fghijk | 4,66 | a | 12,70 | ghi | 1,97 | ghi | 1,73 | ghijklmnop | 2,57 | pqr | 76,60 | ab | 15,17 | ab |
| CP100 | 8,60 | nop | 2,67 | ijk | 0,86 | de | 2,53 | j | 0,93 | hi | 4,57 | abcd | 12,43 | ijklmnop | 37,53 | ef | 11,07 | cd |
| SC100 | 83,73 | ab | 15,00 | f | 4,07 | ab | 16,30 | fg | 11,40 | e | 2,20 | fghijklmnop | 24,23 | defgh | 29,83 | efg | 13,67 | abc |
| EC100 | 9,60 | mnop | 3,80 | hijk | 0,11 | e | 0,57 | j | 0,63 | i | 4,07 | bcdef | 13,93 | ijklmno | 3,07 | mn | 4,37 | ijklmnopqrs |
| PE100 | 18,27 | ijklmnop | 0,67 | k | 0,22 | e | 0,20 | j | 0,50 | i | 0,23 | op | 0,93 | r | 1,63 | n | 0,83 | rst |
| PP100 | 20,93 | ghijklmn | 1,57 | ijk | 0,16 | e | 0,40 | j | 0,70 | i | 0,27 | nop | 1,60 | qr | 1,90 | n | 0,70 | rst |
| VE100 | 78,67 | abc | 5,50 | ghijk | 0,78 | de | 63,60 | b | 3,50 | ghi | 1,97 | fghijklmnop | 13,67 | ijklmno | 15,00 | ghijklmn | 2,90 | nopqrst |

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|-----------|------------------------------------|----------|-------|--------|------|------|-------|-----|-------|-----|---------------------|--------------|-------|----------|-------|----------|-------|-------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| ZE100 | 10,40 | lmnop | 41,27 | bc | 0,66 | de | 2,93 | j | 15,80 | d | 0,10 | p | 1,30 | r | 1,63 | n | 0,20 | t |
| CA75-EC25 | 15,53 | klmnop | 5,70 | ghijk | 1,72 | bcde | 3,30 | j | 0,93 | hi | 2,37 | efghijklmno | 13,40 | ijklmno | 40,57 | de | 7,87 | defghij |
| CA75-PE25 | 16,43 | klmnop | 1,17 | k | 3,55 | abc | 0,50 | j | 0,43 | i | 0,57 | mnop | 4,43 | opqr | 16,47 | ghijklmn | 2,90 | nopqrst |
| CA75-PP25 | 15,73 | klmnop | 3,83 | hijk | 4,06 | ab | 2,13 | j | 0,73 | i | 0,97 | jklmnop | 5,10 | nopqr | 53,20 | cd | 8,67 | defghi |
| CA75-VE25 | 34,17 | efg | 5,50 | ghijk | 0,96 | de | 22,87 | ef | 1,57 | hi | 1,23 | hijklmnop | 7,00 | mnopqr | 63,03 | bc | 11,13 | bcd |
| CA75-ZE25 | 11,97 | klmnop | 33,10 | d | 1,15 | cde | 5,77 | hij | 18,60 | cd | 1,00 | jklmnop | 2,73 | pqr | 25,97 | efgh | 7,23 | defghijkl |
| CA50-EC50 | 10,83 | klmnop | 5,63 | ghijk | 1,17 | cde | 1,80 | j | 0,70 | i | 3,20 | cdefghi | 10,47 | klmnopqr | 20,73 | ghij | 7,67 | defghijk |
| CA50-PE50 | 11,93 | klmnop | 1,70 | ijk | 1,99 | bcde | 1,37 | j | 0,47 | i | 0,73 | lmnop | 1,67 | qr | 20,67 | ghij | 3,77 | klmnopqrst |
| CA50-PP50 | 19,43 | ijklmnop | 2,30 | ijk | 1,61 | cde | 1,13 | j | 0,50 | i | 0,70 | lmnop | 1,30 | r | 18,17 | ghijklm | 2,47 | opqrst |
| CA50-VE50 | 39,40 | def | 5,70 | ghijk | 1,61 | cde | 37,37 | d | 1,67 | hi | 2,00 | fghijklmnop | 8,73 | lmnopqr | 79,10 | a | 9,37 | defgh |
| CA50-ZE50 | 11,13 | klmnop | 39,60 | bcd | 1,24 | cde | 4,60 | hij | 21,33 | bc | 0,47 | mnop | 1,47 | qr | 9,70 | ijklmn | 1,97 | pqrst |
| CA25-EC75 | 9,57 | mnop | 5,30 | hijk | 1,22 | cde | 1,27 | j | 0,70 | i | 2,97 | cdefghijk | 11,67 | jklmnopq | 8,73 | ijklmn | 5,63 | hijklmnop |
| CA25-PE75 | 13,03 | klmnop | 2,73 | ijk | 1,10 | de | 3,20 | j | 0,80 | i | 0,93 | klmnop | 2,47 | pqr | 38,67 | de | 6,90 | fghijklmn |
| CA25-PP75 | 20,47 | hijklmno | 1,93 | ijk | 0,35 | e | 0,60 | j | 0,60 | i | 0,37 | mnop | 1,20 | r | 3,83 | mn | 1,37 | qrst |
| CA25-VE75 | 52,13 | d | 6,47 | ghijk | 1,34 | cde | 53,23 | c | 2,73 | ghi | 2,13 | fghijklmnop | 10,90 | klmnopqr | 83,70 | a | 5,10 | ijklmnopq |
| CA25-ZE75 | 12,93 | klmnop | 35,80 | cd | 1,09 | de | 3,53 | j | 15,80 | d | 0,23 | op | 1,00 | r | 5,17 | klmn | 1,00 | rst |
| CP75-EC25 | 8,83 | nop | 2,17 | ijk | 0,29 | e | 2,27 | j | 0,80 | i | 2,37 | efghijklmno | 6,73 | mnopqr | 17,57 | ghijklm | 5,60 | hijklmnop |
| CP75-PE25 | 8,23 | nop | 1,63 | ijk | 0,38 | de | 1,20 | j | 0,80 | i | 2,80 | cdefghijkl | 27,83 | def | 7,67 | ijklmn | 4,43 | jklmnopqrs |
| CP75-PP25 | 30,43 | fghij | 3,70 | hijk | 1,22 | cde | 27,07 | e | 1,50 | hi | 2,93 | cdefghijk | 18,57 | fghijkl | 20,00 | ghijkl | 3,20 | lmnopqrst |
| CP75-VE25 | 6,40 | p | 1,97 | ijk | 0,42 | de | 0,80 | j | 0,57 | i | 3,30 | cdefghi | 15,27 | ghijklmn | 4,60 | lmn | 6,17 | ghijklmno |
| CP75-ZE25 | 11,93 | klmnop | 1,57 | ijk | 0,59 | de | 0,67 | j | 0,80 | i | 2,53 | defghijklm | 5,43 | nopqr | 9,70 | ijklmn | 3,17 | mnopqrst |
| CP50-EC50 | 10,67 | klmnop | 3,03 | hijk | 0,27 | e | 2,30 | j | 0,87 | hi | 6,37 | a | 16,90 | ghijklm | 53,37 | cd | 15,30 | a |
| CP50-PE50 | 8,33 | nop | 3,10 | hijk | 0,36 | e | 1,10 | j | 0,70 | i | 2,50 | defghijklm | 28,17 | def | 5,50 | ijklmn | 3,83 | jklmnopqrst |
| CP50-PP50 | 12,40 | klmnop | 24,03 | e | 1,23 | cde | 2,80 | j | 22,73 | ab | 1,17 | hijklmnop | 8,13 | mnopqr | 8,77 | ijklmn | 2,70 | opqrst |
| CP50-VE50 | 7,40 | op | 1,20 | k | 0,51 | de | 0,87 | j | 0,67 | i | 2,43 | defghijklmn | 5,07 | nopqr | 7,20 | ijklmn | 5,97 | ghijklmnop |
| CP50-ZE50 | 21,07 | ghijklmn | 2,50 | ijk | 0,88 | de | 13,20 | gh | 1,13 | hi | 3,33 | cdefgh | 22,57 | efghi | 19,73 | ghijkl | 2,17 | opqrst |
| CP25-EC75 | 11,80 | klmnop | 1,83 | ijk | 0,42 | de | 1,50 | j | 0,80 | i | 2,87 | cdefghijkl | 28,40 | cdef | 9,07 | ijklmn | 3,80 | klmnopqrst |
| CP25-PE75 | 7,90 | nop | 2,67 | ijk | 0,17 | e | 0,67 | j | 0,47 | i | 3,43 | bcdefg | 25,07 | defg | 4,73 | klmn | 6,07 | ghijklmno |
| CP25-PP75 | 11,07 | klmnop | 24,77 | e | 1,10 | de | 2,63 | j | 25,03 | a | 1,30 | ghijklmnop | 6,47 | nopqr | 8,23 | ijklmn | 2,33 | opqrst |
| CP25-VE75 | 9,33 | mnop | 1,37 | jk | 0,54 | de | 0,77 | j | 0,67 | i | 2,13 | fghijklmnop | 6,20 | nopqr | 7,80 | ijklmn | 5,57 | hijklmnop |
| CP25-ZE75 | 23,93 | ghijk | 2,37 | ijk | 0,94 | de | 17,63 | fg | 1,13 | hi | 3,13 | cdefghij | 21,83 | efghij | 19,33 | ghijkl | 2,47 | opqrst |
| SC75-EC25 | 47,27 | de | 8,70 | fghij | 2,12 | bcde | 4,93 | hij | 3,00 | ghi | 4,40 | abcde | 48,47 | ab | 22,10 | fghi | 11,00 | cde |
| SC75-PE25 | 49,23 | d | 3,87 | hijk | 2,77 | abcd | 4,17 | ij | 2,93 | ghi | 1,63 | ghijklmnop | 20,70 | efghijk | 14,70 | ghijklmn | 7,37 | defghijk |
| SC75-PP25 | 69,50 | c | 7,97 | fghijk | 1,49 | cde | 6,03 | hij | 4,17 | gh | 2,27 | efghijklmnop | 38,50 | bc | 20,20 | ghijk | 10,37 | cdef |
| SC75-VE25 | 91,13 | a | 12,73 | fg | 0,50 | de | 44,50 | cd | 7,80 | f | 4,57 | abcd | 56,17 | a | 56,97 | c | 9,93 | cdefg |
| SC75-ZE25 | 30,60 | fghi | 36,47 | cd | 0,78 | de | 5,20 | hij | 19,50 | bc | 0,60 | mnop | 11,67 | jklmnopq | 15,60 | ghijklmn | 2,87 | nopqrst |
| SC50-EC50 | 22,50 | ghijklm | 5,57 | ghijk | 0,99 | de | 2,03 | j | 0,83 | hi | 4,97 | abc | 32,93 | cd | 8,17 | ijklmn | 7,77 | defghijk |
| SC50-PE50 | 39,27 | def | 3,27 | hijk | 1,87 | bcde | 2,67 | j | 2,00 | ghi | 1,17 | hijklmnop | 13,70 | ijklmno | 13,50 | hijklmn | 3,90 | jklmnopqrst |
| SC50-PP50 | 41,27 | def | 6,33 | ghijk | 0,89 | de | 4,27 | ij | 2,43 | ghi | 1,13 | ijklmnop | 14,70 | hijklmno | 14,40 | ghijklmn | 4,07 | jklmnopqrst |

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|-----------|------------------------------------|----------|-------|-------|------|-----|-------|----|-------|-----|---------------------|------------|-------|--------|-------|----------|------|------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| SC50-VE50 | 71,17 | bc | 10,30 | fgh | 0,24 | e | 69,60 | b | 5,10 | fg | 4,87 | abc | 50,13 | a | 84,33 | a | 4,63 | ijklmnopqr |
| SC50-ZE50 | 15,73 | klmnop | 52,67 | a | 0,43 | de | 4,23 | ij | 20,93 | bc | 0,27 | nop | 4,63 | opqr | 10,00 | ijklmn | 0,97 | rst |
| SC25-EC75 | 15,43 | klmnop | 4,27 | hijk | 0,79 | de | 0,80 | j | 0,43 | i | 5,60 | ab | 30,17 | cde | 6,90 | ijklmn | 7,00 | efghijklm |
| SC25-PE75 | 23,80 | ghijkl | 4,77 | hijk | 1,06 | de | 2,67 | j | 1,10 | hi | 0,93 | klmnop | 6,57 | nopqr | 15,43 | ghijklmn | 2,17 | opqrst |
| SC25-PP75 | 33,20 | fgh | 5,73 | ghijk | 0,98 | de | 3,23 | j | 1,73 | hi | 1,60 | ghijklmnop | 7,40 | mnopqr | 8,43 | ijklmn | 3,77 | klmnopqrst |
| SC25-VE75 | 81,83 | abc | 8,87 | fghi | 1,48 | cde | 90,43 | a | 3,43 | ghi | 4,90 | abc | 33,70 | cd | 87,90 | a | 2,80 | opqrst |
| SC25-ZE75 | 17,07 | ijklmnop | 45,00 | b | 0,63 | de | 3,50 | j | 21,10 | bc | 0,20 | op | 4,73 | opqr | 9,10 | ijklmn | 0,50 | st |

Tabla 43. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|----------|------------------------------------|----|-------|-----|-------|------|-------|---|-------|----|---------------------|-------|-------|------|------|----|-------|-------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 18,6 | de | 7,833 | def | 4,657 | a | 12,7 | c | 1,967 | d | 1,733 | def | 2,567 | f | 76,6 | a | 15,17 | a |
| CP100 | 8,6 | e | 2,667 | f | 0,86 | cdef | 2,533 | c | 0,933 | d | 4,567 | ab | 12,43 | def | 37,5 | b | 11,07 | abc |
| SC100 | 83,7 | a | 15 | cd | 4,07 | ab | 16,3 | c | 11,4 | bc | 2,2 | bcdef | 24,23 | bcd | 29,8 | bc | 13,67 | ab |
| EC100 | 9,6 | e | 3,8 | f | 0,107 | f | 0,567 | c | 0,633 | d | 4,067 | abc | 13,93 | cdef | 3,07 | c | 4,367 | defg |
| PE100 | 18,3 | de | 0,667 | f | 0,223 | f | 0,2 | c | 0,5 | d | 0,233 | f | 0,933 | f | 1,63 | c | 0,833 | g |
| PP100 | 20,9 | de | 1,567 | f | 0,157 | f | 0,4 | c | 0,7 | d | 0,267 | f | 1,6 | f | 1,9 | c | 0,7 | g |
| VE100 | 78,7 | a | 5,5 | ef | 0,78 | cdef | 63,6 | a | 3,5 | cd | 1,967 | cdef | 13,67 | cdef | 15 | bc | 2,9 | efg |
| ZE100 | 10,4 | e | 41,27 | ab | 0,657 | def | 2,933 | c | 15,8 | ab | 0,1 | f | 1,3 | f | 1,63 | c | 0,2 | g |
| CA_EC | 12 | e | 5,544 | ef | 1,37 | cdef | 2,122 | c | 0,778 | d | 2,844 | bcd | 11,84 | def | 23,3 | bc | 7,056 | cde |
| CA_PE | 13,8 | e | 1,867 | f | 2,213 | bc | 1,689 | c | 0,567 | d | 0,744 | f | 2,856 | f | 25,3 | bc | 4,522 | defg |
| CA_PP | 18,5 | de | 2,689 | f | 2,01 | bcd | 1,289 | c | 0,611 | d | 0,678 | f | 2,533 | f | 25,1 | bc | 4,167 | defg |
| CA_VE | 41,9 | bc | 5,889 | def | 1,307 | cdef | 37,82 | b | 1,989 | d | 1,789 | def | 8,878 | def | 75,3 | a | 8,533 | bcd |
| CA_ZE | 12 | e | 36,17 | b | 1,16 | cdef | 4,633 | c | 18,58 | ab | 0,567 | f | 1,733 | f | 13,6 | bc | 3,4 | efg |
| CP_EC | 10,4 | e | 2,344 | f | 0,328 | f | 2,022 | c | 0,822 | d | 3,867 | abc | 17,34 | cde | 26,7 | bc | 8,233 | bcd |
| CP_PE | 8,16 | e | 2,467 | f | 0,306 | f | 0,989 | c | 0,656 | d | 2,911 | bcd | 27,02 | bc | 5,97 | c | 4,778 | cdefg |
| CP_PP | 18 | de | 17,5 | c | 1,182 | cdef | 10,83 | c | 16,42 | ab | 1,8 | def | 11,06 | def | 12,3 | bc | 2,744 | efg |
| CP_VE | 7,71 | e | 1,511 | f | 0,489 | ef | 0,811 | c | 0,633 | d | 2,622 | bcde | 8,844 | def | 6,53 | c | 5,9 | cdef |
| CP_ZE | 19 | de | 2,144 | f | 0,801 | cdef | 10,5 | c | 1,022 | d | 3 | bcd | 16,61 | cde | 16,3 | bc | 2,6 | fg |
| SC_EC | 28,4 | cd | 6,178 | def | 1,301 | cdef | 2,589 | c | 1,422 | d | 4,989 | a | 37,19 | ab | 12,4 | bc | 8,589 | bcd |
| SC_PE | 37,4 | bc | 3,967 | f | 1,901 | cde | 3,167 | c | 2,011 | d | 1,244 | ef | 13,66 | def | 14,5 | bc | 4,478 | defg |
| SC_PP | 48 | b | 6,678 | def | 1,12 | cdef | 4,511 | c | 2,778 | d | 1,667 | def | 20,2 | cd | 14,3 | bc | 6,067 | cdef |
| SC_VE | 81,4 | a | 10,63 | de | 0,74 | def | 68,18 | a | 5,444 | cd | 4,778 | a | 46,67 | a | 76,4 | a | 5,789 | cdefg |
| SC_ZE | 21,1 | de | 44,71 | a | 0,614 | def | 4,311 | c | 20,51 | a | 0,356 | f | 7,011 | ef | 11,6 | bc | 1,444 | g |

Tabla 44. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|-----------|------------------------------------|-------|-------|----------|------|------------|-------|-----|-------|--------|---------------------|----------------|-------|-------|-------|-----------|-------|------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 18,20 | hijkl | 9,50 | klm | 2,98 | b | 9,63 | g | 1,67 | klmno | 3,13 | hijklmn | 5,80 | hi | 99,87 | a | 16,97 | ab |
| CP100 | 9,17 | jkl | 1,57 | stu | 0,32 | ijklm | 1,27 | i | 0,77 | mno | 3,00 | hijklmn | 12,33 | fghi | 8,13 | hijklmn | 5,00 | ijklmn |
| SC100 | 103,30 | a | 16,70 | hi | 2,90 | b | 17,17 | f | 10,67 | g | 4,80 | ghijklmn | 25,63 | ef | 45,67 | cd | 17,33 | ab |
| EC100 | 8,27 | jkl | 3,93 | opqrstu | 0,08 | m | 0,70 | i | 0,57 | no | 8,17 | cdefghijklmn | 17,33 | efghi | 5,03 | klmn | 7,03 | fghijklmn |
| PE100 | 12,73 | jkl | 0,73 | u | 0,26 | jklm | 0,23 | i | 0,53 | no | 1,77 | ijklmn | 1,83 | i | 2,13 | mn | 1,70 | lmn |
| PP100 | 15,27 | ijkl | 1,63 | stu | 0,18 | lm | 0,33 | i | 0,93 | mno | 2,27 | hijklmn | 2,47 | i | 2,67 | mn | 1,27 | lmn |
| VE100 | 66,80 | c | 5,43 | mnopqrs | 0,88 | efghijklm | 61,70 | b | 3,47 | jk | 7,10 | defghijklmn | 13,63 | fghi | 30,20 | def | 5,07 | ijklmn |
| ZE100 | 10,23 | jkl | 38,53 | d | 0,84 | efghijklm | 3,17 | ghi | 15,83 | f | 0,07 | n | 2,07 | i | 1,83 | n | 0,30 | n |
| CA75-EC25 | 11,60 | jkl | 4,87 | nopqrstu | 0,88 | efghijklm | 2,33 | hi | 0,83 | mno | 13,10 | abcdefghijkl | 12,13 | fghi | 45,27 | cd | 15,30 | abcd |
| CA75-PE25 | 10,90 | jkl | 3,27 | opqrstu | 1,06 | defghijkl | 3,30 | ghi | 1,10 | mno | 20,23 | abc | 3,33 | i | 43,37 | cde | 12,17 | bdefghi |
| CA75-PP25 | 12,13 | jkl | 2,23 | qrstu | 1,05 | defghijkl | 1,57 | i | 1,50 | klmno | 18,23 | abcde | 3,57 | i | 50,30 | c | 15,10 | abcd |
| CA75-VE25 | 28,50 | fghi | 6,67 | mnop | 1,81 | cd | 20,67 | ef | 2,27 | jklmno | 12,03 | abcdefghijklmn | 12,13 | fghi | 91,67 | ab | 15,93 | abc |
| CA75-ZE25 | 12,80 | jkl | 23,13 | g | 5,63 | a | 4,63 | ghi | 16,20 | f | 4,20 | ghijklmn | 4,63 | i | 23,23 | fghij | 12,40 | bcdefghi |
| CA50-EC50 | 7,90 | jkl | 4,17 | opqrstu | 0,56 | fghijklm | 1,33 | i | 0,77 | mno | 8,53 | cdefghijklmn | 11,83 | fghi | 29,33 | defg | 10,23 | bcdefghijk |
| CA50-PE50 | 11,90 | jkl | 2,17 | rstu | 1,11 | defghijk | 1,53 | i | 0,97 | mno | 8,53 | cdefghijklmn | 2,27 | i | 23,13 | fghij | 7,60 | efghijklmn |
| CA50-PP50 | 14,77 | ijkl | 2,03 | rstu | 0,96 | defghijklm | 1,17 | i | 1,10 | mno | 9,23 | cdefghijklmn | 2,10 | i | 21,57 | fghijkl | 4,30 | jklmn |
| CA50-VE50 | 39,07 | ef | 7,10 | lmno | 1,06 | defghijkl | 32,70 | d | 2,73 | jklm | 8,73 | cdefghijklmn | 13,67 | fghi | 94,47 | ab | 12,77 | abcdefgh |
| CA50-ZE50 | 9,97 | jkl | 27,60 | f | 2,49 | bc | 4,27 | ghi | 15,97 | f | 1,27 | klmn | 2,10 | i | 11,93 | ghijklmn | 2,90 | klmn |
| CA25-EC75 | 6,97 | kl | 3,77 | opqrstu | 0,23 | klm | 0,73 | i | 0,43 | o | 23,23 | ab | 16,20 | efghi | 12,33 | fghijklmn | 15,67 | abcd |
| CA25-PE75 | 14,63 | ijkl | 1,90 | stu | 0,64 | fghijklm | 0,80 | i | 0,90 | mno | 1,93 | hijklmn | 2,43 | i | 11,63 | ghijklmn | 3,77 | klmn |
| CA25-PP75 | 14,83 | ijkl | 1,60 | stu | 0,45 | ghijklm | 0,50 | i | 0,83 | mno | 2,37 | hijklmn | 2,80 | i | 4,97 | klmn | 1,57 | lmn |
| CA25-VE75 | 47,80 | de | 7,30 | lmno | 1,06 | defghijkl | 50,63 | c | 3,30 | jkl | 6,03 | fghijklmn | 16,67 | efghi | 88,53 | ab | 8,57 | cdefghijkl |
| CA25-ZE75 | 9,93 | jkl | 33,30 | e | 1,67 | cde | 3,53 | ghi | 16,47 | f | 2,30 | hijklmn | 1,83 | i | 6,47 | jklmn | 1,83 | lmn |
| CP75-EC25 | 5,97 | l | 1,87 | stu | 0,25 | jklm | 0,87 | i | 0,67 | no | 4,60 | ghijklmn | 64,23 | bc | 5,73 | jklmn | 7,03 | fghijklmn |
| CP75-PE25 | 7,90 | jkl | 1,13 | stu | 0,60 | fghijklm | 0,97 | i | 0,60 | no | 2,10 | hijklmn | 9,77 | fghi | 8,97 | hijklmn | 3,47 | klmn |
| CP75-PP25 | 10,00 | jkl | 1,80 | stu | 0,34 | ijklm | 1,07 | i | 0,87 | mno | 1,70 | ijklmn | 16,47 | efghi | 11,97 | ghijklmn | 3,17 | klmn |
| CP75-VE25 | 9,20 | jkl | 1,57 | stu | 0,59 | fghijklm | 3,80 | ghi | 1,03 | mno | 4,90 | ghijklmn | 22,80 | efgh | 6,93 | ijklmn | 5,57 | hijklmn |
| CP75-ZE25 | 9,67 | jkl | 22,23 | g | 1,15 | defghij | 2,73 | hi | 22,77 | d | 1,60 | jklmn | 10,53 | fghi | 10,13 | hijklmn | 2,20 | lmn |
| CP50-EC50 | 6,33 | l | 2,53 | pqrstu | 0,17 | lm | 0,77 | i | 0,67 | no | 10,77 | cdefghijklmn | 73,77 | ab | 4,53 | lmn | 10,10 | bcdefghijk |
| CP50-PE50 | 9,03 | jkl | 1,23 | stu | 0,40 | ghijklm | 0,77 | i | 0,60 | no | 2,57 | hijklmn | 17,07 | efghi | 13,67 | fghijklmn | 4,67 | jklmn |
| CP50-PP50 | 10,87 | jkl | 1,80 | stu | 0,32 | ijklm | 1,23 | i | 0,83 | mno | 1,33 | jklmn | 11,00 | fghi | 7,23 | ijklmn | 3,33 | klmn |
| CP50-VE50 | 21,27 | hij | 1,93 | stu | 0,83 | efghijklm | 8,50 | gh | 1,20 | mno | 3,43 | hijklmn | 18,37 | efghi | 11,47 | ghijklmn | 4,40 | jklmn |
| CP50-ZE50 | 9,27 | jkl | 19,93 | gh | 1,25 | defgh | 2,67 | hi | 20,10 | e | 1,37 | jklmn | 7,87 | ghi | 8,03 | ijklmn | 1,57 | lmn |

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|-----------|------------------------------------|-------|-------|----------|------|------------|-------|-----|-------|--------|---------------------|---------------|-------|------|--------|-----------|-------|------------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CP25-EC75 | 6,33 | l | 2,23 | qrstu | 0,17 | lm | 0,50 | i | 0,47 | o | 13,90 | abcdefgh | 88,10 | a | 3,43 | mn | 11,33 | bcdefghij |
| CP25-PE75 | 8,00 | jkl | 0,90 | tu | 0,40 | ghijklm | 0,47 | i | 0,53 | no | 2,67 | hijklmn | 7,13 | ghi | 7,47 | ijklmn | 3,70 | klmn |
| CP25-PP75 | 11,50 | jkl | 1,70 | stu | 0,27 | jklm | 0,77 | i | 0,77 | mno | 1,47 | jklmn | 11,50 | fghi | 7,90 | ijklmn | 2,77 | klmn |
| CP25-VE75 | 30,90 | fgh | 3,17 | opqrstu | 1,19 | defghi | 25,17 | e | 1,67 | klmno | 6,23 | efghijklmn | 24,17 | efg | 22,77 | fghijk | 5,03 | ijklmn |
| CP25-ZE75 | 9,77 | jkl | 30,80 | ef | 0,72 | fghijklm | 2,73 | hi | 28,63 | c | 0,90 | mn | 5,57 | hi | 8,43 | hijklmn | 1,00 | mn |
| SC75-EC25 | 35,97 | efg | 8,87 | klmn | 0,63 | fghijklm | 5,33 | ghi | 3,40 | jk | 23,93 | a | 33,43 | de | 24,60 | fghi | 20,17 | a |
| SC75-PE25 | 39,80 | ef | 4,57 | nopqrstu | 0,77 | efghijklm | 4,10 | ghi | 2,47 | jklmn | 18,10 | abcdef | 6,83 | ghi | 17,67 | fghijklmn | 14,17 | abcdef |
| SC75-PP25 | 50,17 | de | 7,27 | lmno | 1,00 | defghijkl | 5,57 | ghi | 3,90 | j | 13,40 | abcdefghij | 13,07 | fghi | 26,13 | efgh | 5,53 | hijklmn |
| SC75-VE25 | 84,93 | b | 14,73 | ij | 1,86 | cd | 46,77 | c | 8,17 | h | 13,33 | abcdefghijk | 50,37 | cd | 80,13 | b | 14,67 | abcde |
| SC75-ZE25 | 22,03 | ghij | 46,77 | c | 2,81 | b | 5,43 | ghi | 39,23 | b | 2,40 | hijklmn | 6,27 | hi | 13,53 | fghijklmn | 2,90 | klmn |
| SC50-EC50 | 16,60 | ijkl | 6,57 | mno | 0,19 | lm | 2,10 | hi | 1,17 | mno | 20,17 | abc | 26,30 | ef | 12,47 | fghijklmn | 15,30 | abcd |
| SC50-PE50 | 37,10 | ef | 5,13 | mno | 0,73 | fghijklm | 3,47 | ghi | 2,17 | jklmno | 12,23 | abcdefghijklm | 9,80 | fghi | 20,20 | fghijklm | 8,37 | defghijklm |
| SC50-PP50 | 36,53 | ef | 6,37 | mno | 0,42 | ghijklm | 4,30 | ghi | 2,23 | jklmno | 15,73 | abcdefg | 14,73 | fghi | 19,97 | fghijklm | 8,57 | cdefghijkl |
| SC50-VE50 | 68,53 | c | 12,07 | jk | 1,42 | def | 65,43 | b | 6,13 | i | 13,73 | abcdefghi | 55,50 | c | 100,80 | a | 8,27 | defghijklm |
| SC50-ZE50 | 19,57 | hijkl | 54,60 | b | 1,31 | defg | 4,30 | ghi | 46,90 | a | 1,20 | lmn | 3,20 | i | 11,50 | ghijklmn | 1,40 | lmn |
| SC25-EC75 | 10,50 | jkl | 4,70 | nopqrstu | 0,16 | lm | 0,93 | i | 0,80 | mno | 18,80 | abcd | 22,60 | efgh | 9,43 | hijklmn | 13,20 | abcdefg |
| SC25-PE75 | 21,23 | hij | 2,10 | rstu | 0,36 | hijklm | 0,83 | i | 0,63 | no | 5,00 | ghijklmn | 9,47 | fghi | 12,33 | fghijklmn | 4,20 | jklmn |
| SC25-PP75 | 21,20 | hijk | 3,30 | opqrstu | 0,36 | hijklm | 1,63 | i | 1,37 | lmno | 8,53 | cdefghijklmn | 6,07 | hi | 10,37 | hijklmn | 6,53 | ghijklmn |
| SC25-VE75 | 57,07 | cd | 11,40 | jkl | 0,99 | defghijklm | 80,57 | a | 4,13 | j | 11,60 | bcdefghijklmn | 52,23 | c | 97,27 | ab | 4,63 | jklmn |
| SC25-ZE75 | 15,60 | ijkl | 59,53 | a | 0,85 | efghijklm | 4,07 | ghi | 48,27 | a | 0,30 | mn | 2,43 | i | 7,10 | ijklmn | 0,30 | n |

Tabla 45. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|----------|------------------------------------|----|------|------|-----|------|------|-----|------|----|---------------------|-------|------|-----|------|----|------|-------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 18,2 | ef | 9,5 | de | 3 | ab | 9,63 | cde | 1,67 | f | 3,13 | cdef | 5,8 | ef | 99,9 | a | 17 | a |
| CP100 | 9,167 | ef | 1,57 | gh | 0,3 | ef | 1,27 | e | 0,77 | f | 3 | cdef | 12,3 | def | 8,13 | cd | 5 | def |
| SC100 | 103,3 | a | 16,7 | d | 2,9 | ab | 17,2 | c | 10,7 | d | 4,8 | cdef | 25,6 | cd | 45,7 | b | 17,3 | a |
| EC100 | 8,267 | ef | 3,93 | efgh | 0,1 | f | 0,7 | e | 0,57 | f | 8,17 | bcdef | 17,3 | cde | 5,03 | cd | 7,03 | bcdef |
| PE100 | 12,73 | ef | 0,73 | h | 0,3 | ef | 0,23 | e | 0,53 | f | 1,77 | def | 1,83 | f | 2,13 | d | 1,7 | ef |
| PP100 | 15,27 | ef | 1,63 | gh | 0,2 | f | 0,33 | e | 0,93 | f | 2,27 | def | 2,47 | f | 2,67 | d | 1,27 | f |
| VE100 | 66,8 | b | 5,43 | efgh | 0,9 | cdef | 61,7 | a | 3,47 | ef | 7,1 | bcdef | 13,6 | def | 30,2 | bc | 5,07 | def |
| ZE100 | 10,23 | ef | 38,5 | b | 0,8 | cdef | 3,17 | cde | 15,8 | c | 0,07 | f | 2,07 | f | 1,83 | d | 0,3 | f |
| CA_EC | 8,822 | ef | 4,27 | efgh | 0,6 | def | 1,47 | e | 0,68 | f | 15 | ab | 13,4 | def | 29 | bc | 13,7 | ab |
| CA_PE | 12,48 | ef | 2,44 | fgh | 0,9 | cdef | 1,88 | e | 0,99 | f | 10,2 | bcd | 2,68 | f | 26 | bc | 7,84 | bcde |

| SUSTRATO | CIC | | Ca | | K | | Mg | | Na | | Cu | | Fe | | Mn | | Zn | |
|----------|------------------------------------|----|------|------|-----|------|------|-----|------|---|---------------------|-------|------|-----|------|----|------|-------|
| | cmol _c Kg ⁻¹ | | | | | | | | | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CA_PP | 13,91 | ef | 1,96 | gh | 0,8 | cdef | 1,08 | e | 1,14 | f | 9,94 | bcd | 2,82 | f | 25,6 | bc | 6,99 | cdef |
| CA_VE | 38,46 | c | 7,02 | e | 1,3 | cde | 34,7 | b | 2,77 | f | 8,93 | bcdef | 14,2 | de | 91,6 | a | 12,4 | abc |
| CA_ZE | 10,9 | ef | 28 | c | 3,3 | a | 4,14 | cde | 16,2 | c | 2,59 | def | 2,86 | f | 13,9 | cd | 5,71 | def |
| CP_EC | 6,211 | f | 2,21 | gh | 0,2 | f | 0,71 | e | 0,6 | f | 9,76 | bcde | 75,4 | a | 4,57 | d | 9,49 | abcd |
| CP_PE | 8,311 | ef | 1,09 | h | 0,5 | def | 0,73 | e | 0,58 | f | 2,44 | def | 11,3 | ef | 10 | cd | 3,94 | def |
| CP_PP | 10,79 | ef | 1,77 | gh | 0,3 | ef | 1,02 | e | 0,82 | f | 1,5 | ef | 13 | def | 9,03 | cd | 3,09 | ef |
| CP_VE | 20,46 | de | 2,22 | gh | 0,9 | cdef | 12,5 | cd | 1,3 | f | 4,86 | cdef | 21,8 | cd | 13,7 | cd | 5 | def |
| CP_ZE | 9,567 | ef | 24,3 | c | 1 | cdef | 2,71 | de | 23,8 | b | 1,29 | f | 7,99 | ef | 8,87 | cd | 1,59 | f |
| SC_EC | 21,02 | de | 6,71 | ef | 0,3 | ef | 2,79 | de | 1,79 | f | 21 | a | 27,4 | c | 15,5 | cd | 16,2 | a |
| SC_PE | 32,71 | cd | 3,93 | efgh | 0,6 | def | 2,8 | de | 1,76 | f | 11,8 | bc | 8,7 | ef | 16,7 | cd | 8,91 | abcde |
| SC_PP | 35,97 | c | 5,64 | efg | 0,6 | def | 3,83 | cde | 2,5 | f | 12,6 | abc | 11,3 | ef | 18,8 | cd | 6,88 | cdef |
| SC_VE | 70,18 | b | 12,7 | d | 1,4 | cd | 64,3 | a | 6,14 | e | 12,9 | abc | 52,7 | b | 92,7 | a | 9,19 | abcde |
| SC_ZE | 19,07 | e | 53,6 | a | 1,7 | bc | 4,6 | cde | 44,8 | a | 1,3 | f | 3,97 | ef | 10,7 | cd | 1,53 | f |

ANEXO 2. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”

Tabla 46. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | |
|-----------|--------------------|--------|-----|------------|--------------------|----------|-------|-------|------|-----------|------|--------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 2,4 | a | 9,2 | a | 3,0 | j | 766,3 | a | 15,6 | bcdefg | 52,6 | efgh |
| CP100 | 0,5 | ij | 6,5 | lmnop | 7,5 | ghij | 65,9 | gh | 24,2 | a | 60,1 | defgh |
| SC100 | 0,5 | hij | 6,5 | lmnop | 4,5 | ij | 62,9 | gh | 2,1 | op | 56,4 | defgh |
| EC100 | 0,6 | ghij | 7,0 | fghijklmn | 48,3 | a | 12,9 | h | 6,6 | hijklmnop | 54,7 | efgh |
| PE100 | 0,4 | ij | 6,8 | ijklmnop | 13,5 | cdefghij | 3,9 | h | 3,8 | lmnop | 54,9 | efgh |
| PP100 | 0,5 | hij | 7,0 | fghijklmn | 15,6 | cdefghij | 6,2 | h | 3,8 | lmnop | 74,7 | bcdefg |
| VE100 | 0,4 | ij | 6,8 | hijklmno | 8,7 | fghij | 2,9 | h | 5,6 | ijklmnop | 49,2 | gh |
| ZE100 | 0,4 | ij | 6,8 | ijklmnop | 23,0 | bcdef | 1,1 | h | 5,4 | ijklmnop | 35,7 | h |
| CA75-EC25 | 0,6 | fghij | 8,0 | bcde | 10,0 | efghij | 81,4 | fgh | 7,0 | hijklmnop | 57,8 | defgh |
| CA50-EC50 | 0,8 | defghi | 8,0 | bcdef | 7,0 | ghij | 122,8 | defgh | 19,5 | ab | 53,3 | efgh |
| CA25-EC75 | 1,1 | cde | 7,6 | bcdefghijk | 35,4 | ab | 209,2 | cdef | 17,9 | abc | 67,5 | bcdefg |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | |
|-----------|--------------------|--------|-----|-------------|--------------------|----------|-------|-------|------|--------------|-------|--------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| CA75-PE25 | 1,8 | b | 8,6 | ab | 6,5 | hij | 507,1 | b | 12,0 | bcdefghijk | 61,6 | defgh |
| CA50-PE50 | 1,2 | cd | 8,4 | ab | 5,8 | hij | 251,0 | cd | 11,7 | bcdefghijkl | 63,3 | defgh |
| CA25-PE75 | 0,7 | efghij | 7,8 | bcdefghi | 11,8 | cdefghij | 98,1 | efgh | 10,3 | cdefghijklmn | 59,6 | defgh |
| CA75-PP25 | 1,0 | cdefg | 8,6 | ab | 8,3 | ghij | 259,0 | cd | 9,8 | defghijklmno | 66,6 | bcdefg |
| CA50-PP50 | 1,0 | cdefgh | 8,1 | bcd | 9,0 | fghij | 183,8 | cdefg | 5,8 | ijklmnop | 82,3 | bcde |
| CA25-PP75 | 0,6 | ghij | 7,7 | bcdefghij | 13,4 | cdefghij | 28,6 | h | 7,9 | ghijklmnop | 64,7 | cdefgh |
| CA75-VE25 | 1,1 | cdef | 8,3 | ab | 5,4 | hij | 226,3 | cde | 17,2 | abcd | 53,4 | efgh |
| CA50-VE50 | 1,3 | cd | 8,2 | abc | 13,9 | cdefghij | 256,0 | cd | 8,2 | fghijklmnop | 65,4 | cdefgh |
| CA25-VE75 | 0,6 | ghij | 7,8 | bcdefgh | 6,6 | hij | 46,7 | gh | 16,4 | abcde | 52,9 | efgh |
| CA75-ZE25 | 0,7 | efghij | 7,9 | bcdefg | 25,3 | bcd | 20,9 | h | 13,9 | bcdefgh | 80,2 | bcdef |
| CA50-ZE50 | 0,5 | ghij | 7,8 | bcdefghi | 26,2 | bc | 4,3 | h | 10,4 | cdefghijklm | 61,1 | defgh |
| CA25-ZE75 | 0,5 | ij | 7,6 | bcdefghij | 26,1 | bc | 2,2 | h | 9,2 | efghijklmnop | 47,3 | gh |
| CP75-EC25 | 0,3 | ij | 6,5 | lmnop | 7,6 | ghij | 20,6 | h | 16,6 | abcde | 57,0 | defgh |
| CP50-EC50 | 0,3 | j | 5,8 | p | 15,5 | cdefghij | 3,3 | h | 6,4 | hijklmnop | 53,7 | efgh |
| CP25-EC75 | 0,3 | j | 5,8 | op | 19,4 | cdefgh | 4,0 | h | 7,9 | ghijklmnop | 56,8 | defgh |
| CP75-PE25 | 0,3 | j | 6,1 | nop | 21,3 | bcdefg | 0,5 | h | 6,6 | hijklmnop | 44,2 | gh |
| CP50-PE50 | 0,3 | j | 6,4 | lmnop | 8,7 | fghij | 19,7 | h | 5,0 | jklmnop | 59,2 | defgh |
| CP25-PE75 | 0,3 | ij | 6,2 | mnop | 10,2 | efghij | 25,8 | h | 6,1 | hijklmnop | 65,8 | cdefgh |
| CP75-PP25 | 0,4 | ij | 6,6 | klmnop | 5,6 | hij | 60,5 | gh | 8,8 | efghijklmnop | 73,1 | bcdefg |
| CP50-PP50 | 1,3 | c | 6,3 | lmnop | 11,4 | defghij | 306,0 | c | 5,4 | ijklmnop | 220,7 | a |
| CP25-PP75 | 1,2 | cd | 6,6 | klmnop | 11,3 | defghij | 250,8 | cd | 5,8 | ijklmnop | 215,5 | a |
| CP75-VE25 | 0,4 | ij | 6,2 | mnop | 13,9 | cdefghij | 46,0 | gh | 5,3 | jklmnop | 65,4 | cdefgh |
| CP50-VE50 | 0,4 | ij | 6,4 | lmnop | 8,4 | ghij | 84,5 | fgh | 13,4 | bcdefghi | 62,9 | defgh |
| CP25-VE75 | 0,5 | ghij | 6,8 | hijklmno | 11,7 | cdefghij | 105,9 | efgh | 12,8 | bcdefghij | 61,5 | defgh |
| CP75-ZE25 | 0,3 | j | 6,9 | ghijklmn | 11,3 | defghij | 13,3 | h | 10,3 | cdefghijklmn | 62,2 | defgh |
| CP50-ZE50 | 2,1 | ab | 7,3 | cdefghijkl | 23,6 | bcde | 656,0 | a | 16,1 | bcdef | 97,1 | b |
| CP25-ZE75 | 0,5 | ghij | 6,5 | lmnop | 42,7 | a | 9,4 | h | 18,1 | abc | 94,9 | bc |
| SC75-EC25 | 0,6 | ghij | 7,3 | cdefghijkl | 4,0 | ij | 64,8 | gh | 1,9 | op | 58,5 | defgh |
| SC50-EC50 | 0,4 | ij | 7,1 | efghijklmn | 8,2 | ghij | 6,7 | h | 3,5 | mnop | 56,6 | defgh |
| SC25-EC75 | 0,5 | hij | 7,2 | cdefghijklm | 16,2 | cdefghij | 10,6 | h | 4,5 | klmnop | 61,2 | defgh |
| SC75-PE25 | 0,5 | ghij | 7,0 | efghijklmn | 5,8 | hij | 55,9 | gh | 2,5 | mnop | 58,8 | defgh |
| SC50-PE50 | 0,4 | ij | 7,0 | efghijklmn | 4,4 | ij | 18,6 | h | 2,3 | nop | 56,4 | defgh |
| SC25-PE75 | 0,4 | ij | 7,0 | efghijklmn | 7,1 | ghij | 16,1 | h | 2,8 | mnop | 55,9 | efgh |
| SC75-PP25 | 0,5 | ij | 7,1 | defghijklmn | 3,4 | j | 38,8 | h | 1,7 | p | 59,1 | defgh |
| SC50-PP50 | 0,4 | ij | 7,2 | cdefghijklm | 6,0 | hij | 19,5 | h | 2,1 | op | 60,0 | defgh |
| SC25-PP75 | 0,6 | ghij | 7,2 | cdefghijklm | 6,9 | ghij | 28,1 | h | 2,4 | mnop | 86,5 | bcd |
| SC75-VE25 | 0,6 | ghij | 7,1 | efghijklmn | 5,2 | hij | 56,4 | gh | 3,9 | lmnop | 61,5 | defgh |
| SC50-VE50 | 0,4 | ij | 6,9 | hijklmn | 6,4 | hij | 19,8 | h | 4,5 | klmnop | 54,5 | efgh |
| SC25-VE75 | 0,4 | ij | 7,2 | cdefghijklm | 2,7 | j | 4,7 | h | 8,2 | fghijklmnop | 54,2 | efgh |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | |
|-----------|--------------------|----|-----|------------|--------------------|----------|-----|---|-----|----------|------|-----|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| SC75-ZE25 | 0,4 | ij | 7,0 | efghijklmn | 13,2 | cdefghij | 4,1 | h | 5,6 | ijklmnop | 51,2 | fgh |
| SC50-ZE50 | 0,4 | ij | 6,8 | ijklmnop | 14,5 | cdefghij | 1,5 | h | 4,8 | klmnop | 48,0 | gh |
| SC25-ZE75 | 0,4 | ij | 6,9 | hijklmn | 18,1 | cdefghi | 1,2 | h | 5,2 | ijklmnop | 51,6 | fgh |

Tabla 47. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | |
|-----------|--------------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-------|-------|------|--------------|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | % | | | |
| CA100 | 0,19 | cd | 483,5 | a | 21,8 | def | 143,2 | abcd | 46,0 | abc |
| CP100 | 0,30 | cd | 14,6 | h | 21,1 | def | 159,2 | abc | 25,4 | klm |
| SC100 | 0,00 | d | 7,5 | h | 32,1 | def | 149,7 | abcd | 34,0 | cdefghijklm |
| EC100 | 1,16 | abcd | 2,4 | h | 82,5 | cd | 103,9 | cdef | 49,7 | a |
| PE100 | 0,16 | d | 0,4 | h | 13,1 | def | 102,0 | def | 38,0 | abcdefgghij |
| PP100 | 1,04 | bcd | 0,8 | h | 24,1 | def | 118,7 | bcde | 40,5 | abcdefggh |
| VE100 | 0,14 | d | 0,5 | h | 2,9 | f | 101,9 | def | 41,9 | abcdefg |
| ZE100 | 0,14 | d | 0,4 | h | 8,7 | f | 99,1 | def | 36,0 | bcdefghijkl |
| CA75-EC25 | 0,51 | bcd | 49,1 | fgh | 10,2 | ef | 108,3 | bcdef | 43,4 | abcde |
| CA50-EC50 | 0,73 | bcd | 143,1 | cde | 16,2 | def | 112,8 | bcdef | 42,7 | abcdef |
| CA25-EC75 | 0,69 | bcd | 58,4 | efgh | 195,3 | b | 130,0 | abcd | 48,1 | ab |
| CA75-PE25 | 0,24 | cd | 374,0 | b | 31,8 | def | 136,9 | abcd | 40,4 | abcdefggh |
| CA50-PE50 | 0,30 | cd | 188,9 | cd | 17,4 | def | 122,1 | bcde | 39,0 | abcdefgghi |
| CA25-PE75 | 0,19 | cd | 67,0 | efgh | 8,9 | f | 111,5 | bcdef | 39,0 | abcdefgghi |
| CA75-PP25 | 0,49 | bcd | 142,8 | cde | 23,5 | def | 113,2 | bcdef | 48,0 | ab |
| CA50-PP50 | 1,12 | abcd | 102,8 | defg | 31,3 | def | 118,9 | bcde | 40,9 | abcdefg |
| CA25-PP75 | 1,33 | abcd | 34,9 | gh | 12,0 | ef | 103,3 | cdef | 42,3 | abcdefg |
| CA75-VE25 | 0,32 | cd | 170,1 | cd | 19,7 | def | 124,2 | abcde | 43,3 | abcde |
| CA50-VE50 | 0,28 | cd | 123,7 | cdef | 193,8 | b | 127,8 | abcde | 46,0 | abc |
| CA25-VE75 | 0,18 | d | 50,3 | fgh | 9,1 | f | 110,2 | bcdef | 41,5 | abcdefg |
| CA75-ZE25 | 0,31 | cd | 31,8 | gh | 58,8 | cdef | 118,8 | bcde | 42,4 | abcdefg |
| CA50-ZE50 | 0,28 | cd | 23,5 | gh | 10,0 | f | 109,8 | bcdef | 42,1 | abcdefg |
| CA25-ZE75 | 0,25 | cd | 27,2 | gh | 9,6 | f | 102,9 | cdef | 37,4 | abcdefghijkl |
| CP75-EC25 | 0,30 | cd | 3,3 | h | 12,5 | def | 126,0 | abcde | 22,7 | M |
| CP50-EC50 | 0,20 | cd | 3,1 | h | 9,6 | f | 118,1 | bcde | 44,8 | abcd |
| CP25-EC75 | 0,25 | cd | 6,6 | h | 14,6 | def | 127,3 | abcde | 46,1 | abc |
| CP75-PE25 | 0,45 | bcd | 1,2 | h | 7,6 | f | 119,5 | bcde | 27,2 | ijklm |
| CP50-PE50 | 0,24 | cd | 5,4 | h | 13,1 | def | 117,1 | bcde | 25,0 | lm |

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | | |
|-----------|--------------------|------|-----------------|------|-----------------|-----|-------|-------|------|-------------|---|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | % |
| CP25-PE75 | 0,21 | cd | 7,2 | h | 11,8 | ef | 123,6 | bcde | 26,5 | ijklm | |
| CP75-PP25 | 0,31 | cd | 11,1 | h | 80,6 | cde | 57,3 | F | 27,6 | ijklm | |
| CP50-PP50 | 0,27 | cd | 63,5 | efgh | 217,7 | b | 180,6 | A | 30,2 | ghijklm | |
| CP25-PP75 | 0,29 | cd | 36,7 | gh | 243,5 | b | 131,4 | abcd | 31,9 | efghijklm | |
| CP75-VE25 | 0,54 | bcd | 4,6 | h | 19,6 | def | 135,0 | abcd | 31,0 | efghijklm | |
| CP50-VE50 | 0,60 | bcd | 50,8 | fgh | 23,1 | def | 132,1 | abcd | 40,6 | abcdefg | |
| CP25-VE75 | 0,34 | cd | 72,2 | efgh | 51,0 | def | 132,4 | abcd | 39,2 | abcdefghi | |
| CP75-ZE25 | 0,42 | cd | 12,7 | h | 8,5 | f | 121,9 | bcde | 28,2 | hijklm | |
| CP50-ZE50 | 0,31 | cd | 203,9 | c | 540,2 | a | 163,0 | Ab | 30,4 | fghijklm | |
| CP25-ZE75 | 0,24 | cd | 12,8 | h | 122,1 | c | 72,7 | Ef | 33,1 | defghijklm | |
| SC75-EC25 | 1,28 | abcd | 15,9 | h | 27,0 | def | 122,3 | bcde | 41,2 | abcdefg | |
| SC50-EC50 | 0,69 | bcd | 3,2 | h | 6,9 | f | 96,8 | def | 37,8 | abcdefghij | |
| SC25-EC75 | 1,33 | abcd | 3,2 | h | 17,0 | def | 110,4 | bcdef | 43,0 | abcde | |
| SC75-PE25 | 2,60 | abcd | 6,6 | h | 32,4 | def | 137,3 | abcd | 37,2 | bcdefghijkl | |
| SC50-PE50 | 1,82 | abcd | 2,2 | h | 19,9 | def | 112,2 | bcdef | 37,9 | abcdefghij | |
| SC25-PE75 | 1,23 | abcd | 1,1 | h | 9,2 | f | 103,6 | cdef | 33,8 | cdefghijklm | |
| SC75-PP25 | 4,08 | a | 3,1 | h | 18,5 | def | 119,2 | bcde | 40,6 | abcdefg | |
| SC50-PP50 | 3,14 | abc | 1,0 | h | 11,9 | ef | 105,4 | cdef | 36,7 | bcdefghijkl | |
| SC25-PP75 | 3,38 | ab | 2,6 | h | 40,5 | def | 121,2 | bcde | 43,2 | abcde | |
| SC75-VE25 | 1,18 | abcd | 6,4 | h | 23,1 | def | 148,2 | abcd | 36,8 | bcdefghijkl | |
| SC50-VE50 | 0,76 | bcd | 1,4 | h | 9,2 | f | 106,3 | bcdef | 36,2 | bcdefghijkl | |
| SC25-VE75 | 1,71 | abcd | 0,2 | h | 2,6 | f | 97,5 | def | 31,9 | efghijklm | |
| SC75-ZE25 | 0,78 | bcd | 1,9 | h | 8,2 | f | 108,9 | bcdef | 38,7 | abcdefghij | |
| SC50-ZE50 | 1,05 | bcd | 1,1 | h | 6,9 | f | 106,9 | bcdef | 31,4 | efghijklm | |
| SC25-ZE75 | 0,34 | cd | 1,3 | h | 8,7 | f | 115,8 | bcde | 35,3 | cdefghijkl | |

Tabla 48. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | K | Mg | Na | | | | |
|----------|--------------------|-----|-----|------|------|----|-------|-----|--------------------|-----|------|---|
| | ds m ⁻¹ | | | | | | | | mg L ⁻¹ | | | |
| CA100 | 2,4 | a | 9,2 | a | 3,0 | d | 766,3 | a | 15,6 | ab | 52,6 | b |
| CP100 | 0,5 | cd | 6,5 | efg | 7,5 | cd | 65,9 | cde | 24,2 | a | 60,1 | b |
| SC100 | 0,5 | cd | 6,5 | defg | 4,5 | d | 62,9 | cde | 2,1 | e | 56,4 | b |
| EC100 | 0,6 | bcd | 7,0 | def | 48,3 | a | 12,9 | e | 6,6 | cde | 54,7 | b |
| PE100 | 0,4 | cd | 6,8 | defg | 13,5 | cd | 3,9 | e | 3,8 | de | 54,9 | b |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | |
|----------|--------------------|-----|-----|------|--------------------|-----|-------|------|------|------|-------|---|--|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | |
| PP100 | 0,5 | cd | 7,0 | def | 15,6 | bcd | 6,2 | e | 3,8 | De | 74,7 | b | |
| VE100 | 0,4 | cd | 6,8 | defg | 8,7 | cd | 2,9 | e | 5,6 | cde | 49,2 | b | |
| ZE100 | 0,4 | d | 6,8 | defg | 23,0 | bc | 1,1 | e | 5,4 | cde | 35,7 | b | |
| CA_EC | 0,9 | bcd | 7,9 | b | 17,5 | bc | 137,8 | bcde | 14,8 | B | 59,5 | b | |
| CA_PE | 1,2 | b | 8,3 | b | 8,1 | cd | 285,4 | b | 11,3 | Bc | 61,5 | b | |
| CA_PP | 0,9 | bcd | 8,1 | b | 10,2 | cd | 157,1 | bcde | 7,8 | bcde | 71,2 | b | |
| CA_VE | 1,0 | bc | 8,1 | b | 8,6 | cd | 176,4 | bcde | 13,9 | B | 57,2 | b | |
| CA_ZE | 0,6 | cd | 7,8 | bc | 25,8 | b | 9,1 | e | 11,2 | Bc | 62,9 | b | |
| CP_EC | 0,3 | d | 6,1 | g | 14,1 | cd | 9,3 | e | 10,3 | bcd | 55,8 | b | |
| CP_PE | 0,3 | d | 6,3 | fg | 13,4 | cd | 15,3 | e | 5,9 | cde | 56,4 | b | |
| CP_PP | 1,0 | bc | 6,5 | efg | 9,4 | cd | 205,7 | bcd | 6,7 | cde | 169,8 | a | |
| CP_VE | 0,5 | cd | 6,5 | efg | 11,3 | cd | 78,8 | cde | 10,5 | bcd | 63,2 | b | |
| CP_ZE | 1,0 | bc | 6,9 | def | 25,9 | b | 226,2 | bc | 14,8 | B | 84,7 | b | |
| SC_EC | 0,5 | cd | 7,2 | d | 9,5 | cd | 27,4 | de | 3,3 | E | 58,7 | b | |
| SC_PE | 0,5 | cd | 7,0 | de | 5,8 | d | 30,2 | de | 2,5 | E | 57,0 | b | |
| SC_PP | 0,5 | cd | 7,2 | cd | 5,4 | d | 28,8 | de | 2,1 | E | 68,5 | b | |
| SC_VE | 0,4 | cd | 7,1 | de | 4,8 | d | 27,0 | de | 5,5 | cde | 56,7 | b | |
| SC_ZE | 0,4 | d | 6,9 | def | 15,3 | bcd | 2,3 | e | 5,2 | De | 50,3 | b | |

Tabla 49. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | |
|----------|--------------------|----|-----------------|-----|-----------------|-----|-------|---|------|------|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,19 | c | 483,5 | a | 21,8 | c | 143,2 | a | 54,0 | cd |
| CP100 | 0,30 | c | 14,6 | cde | 21,1 | c | 159,2 | a | 74,6 | a |
| SC100 | 0,00 | c | 7,5 | cde | 32,1 | bc | 149,7 | a | 66,0 | abc |
| EC100 | 1,16 | bc | 2,4 | e | 82,5 | abc | 103,9 | a | 50,3 | d |
| PE100 | 0,16 | c | 0,4 | e | 13,1 | c | 102,0 | a | 62,0 | bcd |
| PP100 | 1,04 | bc | 0,8 | e | 24,1 | c | 118,7 | a | 59,5 | cd |
| VE100 | 0,14 | c | 0,5 | e | 2,9 | c | 101,9 | a | 58,1 | cd |
| ZE100 | 0,14 | c | 0,4 | e | 8,7 | c | 99,1 | a | 64,0 | abcd |
| CA_EC | 0,64 | bc | 83,5 | cde | 73,9 | bc | 117,0 | a | 55,3 | cd |
| CA_PE | 0,24 | c | 210,0 | b | 19,4 | c | 123,5 | a | 60,5 | cd |
| CA_PP | 0,98 | bc | 93,5 | cd | 22,3 | c | 111,8 | a | 56,3 | cd |
| CA_VE | 0,26 | c | 114,7 | c | 74,2 | bc | 120,7 | a | 56,4 | cd |

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | |
|----------|--------------------|----|-----------------|-----|-----------------|----|-------|---|------|------|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | % | |
| CA_ZE | 0,28 | c | 27,5 | cde | 26,1 | c | 110,5 | a | 59,4 | cd |
| CP_EC | 0,25 | c | 4,3 | e | 12,2 | c | 123,8 | a | 62,1 | bcd |
| CP_PE | 0,30 | c | 4,6 | e | 10,9 | c | 120,1 | a | 73,8 | a |
| CP_PP | 0,29 | c | 37,1 | cde | 180,6 | ab | 123,1 | a | 70,1 | ab |
| CP_VE | 0,49 | bc | 42,5 | cde | 31,2 | c | 133,2 | a | 63,0 | abcd |
| CP_ZE | 0,32 | c | 76,5 | cde | 223,6 | a | 119,2 | a | 69,4 | ab |
| SC_EC | 1,10 | bc | 7,4 | de | 17,0 | c | 109,8 | a | 59,3 | cd |
| SC_PE | 1,88 | b | 3,3 | e | 20,5 | c | 117,7 | a | 63,7 | abcd |
| SC_PP | 3,53 | a | 2,3 | e | 23,6 | c | 115,3 | a | 59,8 | cd |
| SC_VE | 1,22 | bc | 2,7 | e | 11,6 | c | 117,3 | a | 65,0 | abc |
| SC_ZE | 0,72 | bc | 1,4 | e | 7,9 | c | 110,6 | a | 64,9 | abc |

Tabla 50. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | CE ds m ⁻¹ | pH | | Ca | K | Mg | | Na | | | | |
|-----------|--------------------------|-----|-----|--------------------|------|-------------|------|-----|------|-------------|------|-----------|
| | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | |
| CA100 | 0,6 | bcd | 7,7 | abcdefg | 11,3 | ghijklmnop | 17,5 | cde | 14,5 | bcde | 60,2 | bcdefghij |
| CP100 | 0,2 | d | 6,7 | ijklm | 7,6 | ijklmnopq | 24 | cde | 4,5 | ijklmno | 61,4 | bcdefghi |
| SC100 | 0,4 | bcd | 7,1 | cdefghijkl | 5,6 | lmnopq | 20,2 | cde | 2,6 | no | 60,4 | bcdefghij |
| EC100 | 0,5 | bcd | 7,3 | bcdefghijkl | 18,0 | bcdefghi | 6,53 | cde | 3,3 | lmno | 60,5 | bcdefghi |
| PE100 | 0,4 | bcd | 7,3 | bcdefghijkl | 10,8 | ijklmnopq | 3,43 | de | 3,4 | lmno | 57,7 | bcdefghij |
| PP100 | 0,5 | bcd | 7,5 | abcdefghij | 14,9 | bcdefghijk | 6,07 | cde | 4,0 | klmno | 66,6 | abcdef |
| VE100 | 0,5 | bcd | 7,9 | abcde | 4,3 | nopq | 6,7 | cde | 13,5 | bcdef | 59,2 | bcdefghij |
| ZE100 | 0,4 | bcd | 7,3 | bcdefghijkl | 20,3 | bcdef | 1,6 | e | 5,5 | ijklmno | 36,2 | k |
| CA75-EC25 | 0,5 | bcd | 7,7 | abcdefgh | 12,1 | efghijklmno | 25,4 | cde | 8,4 | efghijklmn | 62,3 | bcdefghi |
| CA50-EC50 | 0,6 | bcd | 7,8 | abcdef | 15,6 | bcdefghij | 34,9 | cde | 10,6 | defghij | 65,9 | bcdefg |
| CA25-EC75 | 0,6 | bcd | 7,6 | abcdefghij | 19,5 | bcdefgh | 36,6 | cde | 9,2 | defghijklm | 63,5 | bcdefghi |
| CA75-PE25 | 1,4 | a | 8,4 | a | 6,6 | klmnopq | 336 | b | 17,9 | abc | 72,1 | ab |
| CA50-PE50 | 1,4 | a | 8,3 | a | 6,1 | lmnopq | 494 | a | 15,3 | abcd | 81,1 | a |
| CA25-PE75 | 0,6 | bcd | 7,9 | abcde | 12,7 | efghijklmn | 59,4 | cde | 10,3 | defghijk | 62,2 | bcdefghi |
| CA75-PP25 | 0,7 | bc | 8,1 | ab | 13,1 | defghijklm | 101 | cde | 14,1 | bcde | 68,2 | abcde |
| CA50-PP50 | 0,7 | bc | 7,9 | abcde | 11,7 | fghijklmnop | 95,9 | cde | 8,0 | efghijklmno | 72,3 | ab |
| CA25-PP75 | 0,5 | bcd | 7,6 | abcdefghij | 13,8 | cdefghijkl | 17,3 | cde | 7,4 | fghijklmno | 61,5 | bcdefghi |
| CA75-VE25 | 0,8 | b | 8,0 | abc | 6,1 | lmnopq | 115 | c | 14,2 | bcde | 63,7 | bcdefghi |
| CA50-VE50 | 0,6 | bcd | 7,9 | abcd | 5,6 | lmnopq | 58,3 | cde | 15,0 | bcd | 60,8 | bcdefghi |
| CA25-VE75 | 0,5 | bcd | 7,6 | bcdefghi | 5,6 | lmnopq | 21,7 | cde | 11,3 | defghi | 59,1 | bcdefghij |
| CA75-ZE25 | 0,6 | bcd | 7,9 | abcde | 21,6 | bcd | 13 | cde | 13,1 | bcdefg | 70,5 | abc |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | |
|-----------|--------------------|-----|-----|--------------|--------------------|-------------|------|-----|------|------------|------|-----------|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| CA50-ZE50 | 0,5 | bcd | 7,6 | abcdefghijkl | 22,6 | b | 3,27 | de | 9,7 | defghijkl | 62,4 | bcdefghi |
| CA25-ZE75 | 0,4 | bcd | 7,6 | abcdefghijkl | 19,7 | bcdefg | 2,3 | de | 7,4 | fghijklmno | 51,7 | ghij |
| CP75-EC25 | 0,5 | bcd | 7,5 | abcdefghijkl | 20,7 | bcde | 60,3 | cde | 12,1 | cdefgh | 67,0 | abcdef |
| CP50-EC50 | 0,4 | bcd | 7,3 | bcdefghijkl | 22,3 | bc | 14,1 | cde | 7,0 | fghijklmno | 65,9 | bcdefg |
| CP25-EC75 | 0,4 | bcd | 7,4 | abcdefghijkl | 31,8 | a | 39,4 | cde | 8,3 | efghijklmn | 69,0 | abcd |
| CP75-PE25 | 0,4 | bcd | 6,7 | ijklm | 11,0 | hijklmnopq | 113 | cd | 13,4 | bcdef | 63,7 | bcdefghi |
| CP50-PE50 | 0,3 | cd | 6,5 | klm | 8,9 | jklmnopq | 32,5 | cde | 4,8 | ijklmno | 61,1 | bcdefghi |
| CP25-PE75 | 0,4 | bcd | 6,5 | klm | 10,7 | ijklmnopq | 32,7 | cde | 5,7 | ijklmno | 63,0 | bcdefghi |
| CP75-PP25 | 0,3 | cd | 6,7 | ijklm | 9,1 | jklmnopq | 18 | cde | 4,8 | jklmno | 62,7 | bcdefghi |
| CP50-PP50 | 0,3 | cd | 6,5 | klm | 10,1 | ijklmnopq | 24,3 | cde | 5,7 | ijklmno | 66,2 | bcdefg |
| CP25-PP75 | 0,3 | cd | 7,7 | bcdefgh | 12,0 | fghijklmnop | 17,1 | cde | 4,7 | jklmno | 69,3 | abcd |
| CP75-VE25 | 0,5 | bcd | 6,7 | hijklm | 9,9 | ijklmnopq | 99,6 | cde | 19,0 | ab | 61,9 | bcdefghi |
| CP50-VE50 | 0,5 | bcd | 6,7 | hijklm | 7,5 | jklmnopq | 61,6 | cde | 21,6 | a | 62,5 | bcdefghi |
| CP25-VE75 | 0,3 | cd | 7,1 | cdefghijkl | 7,5 | jklmnopq | 20,9 | cde | 15,3 | abcd | 59,1 | bcdefghij |
| CP75-ZE25 | 0,3 | cd | 6,1 | m | 15,4 | bcdefghij | 3,8 | de | 5,8 | hijklmno | 53,1 | fghij |
| CP50-ZE50 | 0,3 | cd | 6,1 | m | 18,1 | bcdefghi | 4,3 | cde | 6,6 | ghijklmno | 57,9 | bcdefghij |
| CP25-ZE75 | 0,3 | cd | 6,4 | lm | 21,5 | bcd | 1,17 | e | 6,5 | hijklmno | 45,8 | jk |
| SC75-EC25 | 0,4 | bcd | 7,2 | bcdefghijkl | 3,8 | opq | 20,5 | cde | 1,5 | o | 61,4 | bcdefghi |
| SC50-EC50 | 0,4 | bcd | 7,1 | cdefghijkl | 9,1 | jklmnopq | 3,53 | de | 3,8 | lmno | 56,1 | cdefghij |
| SC25-EC75 | 0,4 | bcd | 7,2 | bcdefghijkl | 12,9 | efghijklmn | 4,1 | cde | 3,6 | lmno | 59,4 | bcdefghij |
| SC75-PE25 | 0,4 | bcd | 7,0 | defghijklm | 4,0 | opq | 39,2 | cde | 2,3 | no | 55,2 | defghij |
| SC50-PE50 | 0,4 | bcd | 6,8 | ghijklm | 4,9 | mno | 4,17 | cde | 2,9 | mno | 59,7 | bcdefghij |
| SC25-PE75 | 0,4 | bcd | 7,0 | defghijklm | 6,4 | klmnopq | 3,87 | de | 3,0 | mno | 59,3 | bcdefghij |
| SC75-PP25 | 0,4 | bcd | 7,0 | defghijklm | 3,7 | opq | 19,6 | cde | 1,6 | o | 60,9 | bcdefghi |
| SC50-PP50 | 0,4 | bcd | 7,1 | cdefghijkl | 4,6 | mno | 9,73 | cde | 1,9 | no | 63,9 | bcdefghi |
| SC25-PP75 | 0,4 | bcd | 7,1 | defghijkl | 7,5 | jklmnopq | 10 | cde | 2,7 | mno | 64,6 | bcdefgh |
| SC75-VE25 | 0,5 | bcd | 6,9 | efghijklm | 3,5 | pq | 35,5 | cde | 2,8 | mno | 54,0 | efghij |
| SC50-VE50 | 0,4 | bcd | 7,0 | defghijklm | 3,8 | opq | 17,1 | cde | 3,5 | lmno | 60,6 | bcdefghi |
| SC25-VE75 | 0,4 | bcd | 7,7 | bcdefg | 2,7 | q | 5,7 | cde | 7,0 | fghijklmno | 56,0 | cdefghij |
| SC25-ZE75 | 0,4 | bcd | 7,2 | bcdefghijkl | 15,4 | bcdefghij | 1,73 | de | 5,1 | ijklmno | 50,2 | hijk |
| SC50-ZE50 | 0,4 | bcd | 6,9 | fghijklm | 12,8 | efghijklmn | 1,77 | de | 4,7 | jklmno | 49,6 | ijk |
| SC75-ZE25 | 0,4 | bcd | 7,0 | defghijklm | 10,3 | ijklmnopq | 2,7 | de | 5,2 | ijklmno | 51,7 | ghij |

Tabla 51. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | NO ₃ | PO ₄ | SO ₄ | Cl | FL |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----|----|
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----|----|

| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | % | |
|-----------|--------------------|---------|-------|----|------|---------|-------|--------|------|---------|
| | | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,04 | gh | 18,4 | cd | 1,5 | i | 89,8 | f | 39,0 | abcde |
| CP100 | 0,16 | bcde | 3,0 | d | 15,2 | cdefghi | 108,2 | bcdef | 23,0 | defg |
| SC100 | 0,02 | h | 1,6 | d | 2,3 | i | 98,4 | ef | 37,6 | abcdefg |
| EC100 | 0,07 | cdefgh | 3,2 | d | 12,7 | defghi | 100,9 | ef | 43,6 | ab |
| PE100 | 0,03 | h | 0,5 | d | 2,3 | hi | 94,0 | f | 31,3 | abcdefg |
| PP100 | 0,05 | defgh | 1,7 | d | 19,0 | bcdefgh | 110,2 | abcdef | 36,8 | abcdefg |
| VE100 | 0,05 | efgh | 0,5 | d | 2,0 | i | 103,4 | def | 37,7 | abcdefg |
| ZE100 | 0,08 | bcdefgh | 0,4 | d | 1,2 | i | 100,7 | ef | 35,0 | abcdefg |
| CA75-EC25 | 0,07 | cdefgh | 19,4 | cd | 5,1 | ghi | 102,3 | def | 39,2 | abcde |
| CA50-EC50 | 0,05 | efgh | 56,5 | cd | 9,4 | efghi | 105,4 | cdef | 40,8 | abc |
| CA25-EC75 | 0,04 | fgh | 34,8 | cd | 28,2 | bcd | 111,3 | abcdef | 40,9 | abc |
| CA75-PE25 | 0,11 | bcdefgh | 204,1 | b | 19,7 | bcdefg | 107,3 | bcdef | 38,3 | abcdef |
| CA50-PE50 | 0,06 | defgh | 329,0 | a | 5,2 | ghi | 138,3 | abcde | 34,4 | abcdefg |
| CA25-PE75 | 0,05 | efgh | 40,3 | cd | 8,0 | fghi | 108,7 | bcdef | 30,0 | abcdefg |
| CA75-PP25 | 0,03 | h | 50,7 | cd | 5,7 | ghi | 110,6 | abcdef | 38,2 | abcdef |
| CA50-PP50 | 0,12 | bcdefgh | 50,2 | cd | 14,1 | cdefghi | 113,8 | abcdef | 35,7 | abcdefg |
| CA25-PP75 | 0,11 | bcdefgh | 19,3 | cd | 5,4 | ghi | 102,0 | def | 36,0 | abcdefg |
| CA75-VE25 | 0,36 | a | 93,2 | c | 5,5 | ghi | 111,9 | abcdef | 38,1 | abcdef |
| CA50-VE50 | 0,12 | bcdefgh | 59,0 | cd | 3,6 | ghi | 105,1 | cdef | 35,8 | abcdefg |
| CA25-VE75 | 0,03 | h | 19,5 | cd | 5,7 | ghi | 108,2 | bcdef | 31,2 | abcdefg |
| CA75-ZE25 | 0,15 | bcdefg | 43,7 | cd | 9,8 | efghi | 111,4 | abcdef | 39,9 | abcd |
| CA50-ZE50 | 0,03 | h | 36,6 | cd | 2,8 | hi | 102,8 | def | 38,5 | abcdef |
| CA25-ZE75 | 0,15 | bcdef | 14,6 | d | 2,2 | i | 103,8 | def | 33,3 | abcdefg |
| CP75-EC25 | 0,10 | bcdefgh | 7,8 | d | 30,2 | bc | 143,7 | abcd | 24,4 | cdefg |
| CP50-EC50 | 0,05 | efgh | 1,4 | d | 8,7 | fghi | 112,7 | abcdef | 34,7 | abcdefg |
| CP25-EC75 | 0,03 | h | 2,4 | d | 53,6 | a | 123,5 | abcdef | 46,3 | a |
| CP75-PE25 | 0,16 | bcd | 21,3 | cd | 25,5 | bcde | 146,9 | abc | 20,4 | g |
| CP50-PE50 | 0,06 | defgh | 2,5 | d | 6,6 | ghi | 111,3 | abcdef | 22,2 | efg |
| CP25-PE75 | 0,15 | bcdefg | 2,8 | d | 9,5 | efghi | 124,8 | abcdef | 21,3 | fg |
| CP75-PP25 | 0,08 | cdefgh | 3,7 | d | 8,2 | fghi | 118,4 | abcdef | 35,1 | abcdefg |
| CP50-PP50 | 0,12 | bcdefgh | 5,0 | d | 14,1 | cdefghi | 117,2 | abcdef | 24,2 | cdefg |
| CP25-PP75 | 0,05 | efgh | 2,3 | d | 13,4 | defghi | 111,3 | abcdef | 29,5 | abcdefg |
| CP75-VE25 | 0,06 | defgh | 22,7 | cd | 23,5 | bcdef | 151,0 | a | 28,5 | bcdefg |
| CP50-VE50 | 0,06 | defgh | 9,9 | d | 14,3 | cdefghi | 148,1 | ab | 29,8 | abcdefg |
| CP25-VE75 | 0,18 | bc | 2,4 | d | 5,5 | ghi | 114,8 | abcdef | 30,5 | abcdefg |
| CP75-ZE25 | 0,05 | efgh | 2,7 | d | 4,9 | ghi | 107,0 | bcdef | 20,5 | g |
| CP50-ZE50 | 0,12 | bcdefgh | 3,0 | d | 8,5 | fghi | 113,6 | abcdef | 23,9 | cdefg |
| CP25-ZE75 | 0,02 | h | 1,0 | d | 2,8 | hi | 105,0 | cdef | 26,4 | bcdefg |
| SC75-EC25 | 0,09 | bcdefgh | 8,4 | d | 8,9 | efghi | 105,0 | cdef | 32,7 | abcdefg |
| SC50-EC50 | 0,06 | defgh | 2,9 | d | 6,7 | ghi | 102,5 | def | 35,5 | abcdefg |

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | |
|-----------|--------------------|---------|-----------------|---|-----------------|--------|-------|--------|------|---------|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | |
| SC25-EC75 | 0,05 | defgh | 2,8 | d | 7,9 | fghi | 105,0 | cdef | 30,0 | abcdefg |
| SC75-PE25 | 0,07 | cdefgh | 1,8 | d | 33,2 | b | 109,1 | abcdef | 36,3 | abcdefg |
| SC50-PE50 | 0,04 | gh | 1,1 | d | 3,1 | ghi | 102,1 | def | 32,8 | abcdefg |
| SC25-PE75 | 0,07 | cdefgh | 1,0 | d | 31,9 | b | 104,0 | def | 29,8 | abcdefg |
| SC75-PP25 | 0,11 | bcdefgh | 1,5 | d | 12,0 | defghi | 108,3 | bcdef | 33,7 | abcdefg |
| SC50-PP50 | 0,05 | defgh | 1,0 | d | 8,2 | fghi | 103,4 | def | 34,3 | abcdefg |
| SC25-PP75 | 0,04 | fgh | 0,8 | d | 8,4 | fghi | 104,4 | def | 37,1 | abcdefg |
| SC75-VE25 | 0,19 | b | 2,8 | d | 12,4 | defghi | 126,5 | abcdef | 35,0 | abcdefg |
| SC50-VE50 | 0,07 | cdefgh | 1,1 | d | 3,6 | ghi | 105,1 | cdef | 32,3 | abcdefg |
| SC25-VE75 | 0,03 | h | 0,3 | d | 2,2 | i | 98,0 | ef | 29,2 | abcdefg |
| SC25-ZE75 | 0,15 | bcdef | 1,1 | d | 6,8 | ghi | 113,3 | abcdef | 32,5 | abcdefg |
| SC50-ZE50 | 0,07 | cdefgh | 1,1 | d | 5,5 | ghi | 107,1 | bcdef | 28,8 | bcdefg |
| SC75-ZE25 | 0,06 | defgh | 1,4 | d | 1,7 | i | 106,8 | bcdef | 31,2 | abcdefg |

Tabla 52. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | Mg | | Na | | |
|----------|--------------------|-----|-----|------|--------------------|-------|-------|----|------|------|------|-----|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 0,6 | bcd | 7,7 | abc | 11,3 | cdef | 17,5 | b | 14,5 | abc | 60,2 | bcd |
| CP100 | 0,2 | d | 6,7 | def | 7,6 | efg | 24,0 | b | 4,5 | fgh | 61,4 | bcd |
| SC100 | 0,4 | bcd | 7,1 | bcde | 5,6 | fg | 20,2 | b | 2,6 | h | 60,4 | bcd |
| EC100 | 0,5 | bcd | 7,3 | bcde | 18,0 | bcd | 6,5 | b | 3,3 | gh | 60,5 | bcd |
| PE100 | 0,4 | bcd | 7,3 | bcde | 10,8 | cdefg | 3,4 | b | 3,4 | gh | 57,7 | cd |
| PP100 | 0,5 | bcd | 7,5 | abcd | 14,9 | cde | 6,1 | b | 4,0 | gh | 66,6 | abc |
| VE100 | 0,5 | bcd | 7,9 | ab | 4,3 | fg | 6,7 | b | 13,5 | bcd | 59,2 | bcd |
| ZE100 | 0,4 | bcd | 7,3 | bcde | 20,3 | abc | 1,6 | b | 5,5 | efgh | 36,2 | e |
| CA_EC | 0,6 | bc | 7,7 | abc | 15,7 | cd | 32,3 | b | 9,4 | cdef | 63,9 | abc |
| CA_PE | 1,1 | a | 8,2 | a | 8,4 | efg | 296,4 | a | 14,5 | ab | 71,8 | a |
| CA_PP | 0,6 | b | 7,9 | ab | 12,9 | cde | 71,3 | b | 9,8 | cde | 67,3 | ab |
| CA_VE | 0,6 | b | 7,9 | ab | 5,8 | fg | 64,9 | b | 13,5 | bc | 61,2 | bcd |
| CA_ZE | 0,5 | bcd | 7,7 | abc | 21,3 | ab | 6,2 | b | 10,1 | bcde | 61,5 | bc |
| CP_EC | 0,4 | bcd | 7,4 | bcd | 24,9 | a | 37,9 | b | 9,2 | cdef | 67,3 | ab |
| CP_PE | 0,4 | bcd | 6,6 | ef | 10,2 | defg | 59,3 | b | 8,0 | defg | 62,6 | bc |
| CP_PP | 0,3 | cd | 7,0 | cde | 10,4 | defg | 19,8 | b | 5,0 | fgh | 66,0 | abc |
| CP_VE | 0,4 | bcd | 6,9 | de | 8,3 | efg | 60,7 | b | 18,6 | a | 61,2 | bcd |

| SUSTRATO | CE | | pH | | Ca | | K | | Mg | | Na | | |
|----------|--------------------|-----|-----|------|--------------------|-----|------|---|-----|------|------|-----|--|
| | ds m ⁻¹ | | | | mg L ⁻¹ | | | | | | | | |
| CP_ZE | 0,3 | d | 6,2 | f | 18,3 | bc | 3,1 | b | 6,3 | efgh | 52,3 | d | |
| SC_EC | 0,4 | bcd | 7,2 | bcde | 8,6 | efg | 9,4 | b | 2,9 | h | 59,0 | bcd | |
| SC_PE | 0,4 | bcd | 6,9 | cde | 5,1 | fg | 15,7 | b | 2,7 | h | 58,1 | cd | |
| SC_PP | 0,4 | bcd | 7,1 | cde | 5,3 | fg | 13,1 | b | 2,1 | h | 63,1 | abc | |
| SC_VE | 0,4 | bcd | 7,2 | bcde | 3,3 | g | 19,4 | b | 4,4 | gh | 56,9 | cd | |
| SC_ZE | 0,4 | bcd | 7,0 | cde | 12,8 | cde | 2,1 | b | 5,0 | fgh | 50,5 | d | |

Tabla 53. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | NO ₃ | | PO ₄ | | SO ₄ | | Cl | | FL | | |
|----------|--------------------|----|-----------------|---|-----------------|-----|-------|-----|------|------|---|
| | mg L ⁻¹ | | | | | | | | | | % |
| CA100 | 0,04 | b | 18,4 | b | 1,5 | c | 89,8 | c | 39,0 | ab | |
| CP100 | 0,16 | ab | 3,0 | b | 15,2 | abc | 108,2 | bc | 23,0 | cd | |
| SC100 | 0,02 | b | 1,6 | b | 2,3 | c | 98,4 | bc | 37,6 | ab | |
| EC100 | 0,07 | ab | 3,2 | b | 12,7 | bc | 100,9 | bc | 43,6 | a | |
| PE100 | 0,03 | b | 0,5 | b | 2,3 | c | 94,0 | bc | 31,3 | abcd | |
| PP100 | 0,05 | b | 1,7 | b | 19,0 | abc | 110,2 | abc | 36,8 | abc | |
| VE100 | 0,05 | b | 0,5 | b | 2,0 | c | 103,4 | bc | 37,7 | ab | |
| ZE100 | 0,08 | ab | 0,4 | b | 1,2 | c | 100,7 | bc | 35,0 | abcd | |
| CA_EC | 0,05 | b | 36,9 | b | 14,2 | bc | 106,4 | bc | 40,3 | a | |
| CA_PE | 0,07 | ab | 191,1 | a | 11,0 | bc | 118,1 | abc | 34,2 | abcd | |
| CA_PP | 0,09 | ab | 40,0 | b | 8,4 | bc | 108,8 | bc | 36,6 | abc | |
| CA_VE | 0,17 | a | 57,2 | b | 4,9 | c | 108,4 | bc | 35,1 | abc | |
| CA_ZE | 0,11 | ab | 31,6 | b | 4,9 | c | 106,0 | bc | 37,2 | ab | |
| CP_EC | 0,06 | b | 3,9 | b | 30,8 | a | 126,6 | ab | 35,1 | abc | |
| CP_PE | 0,12 | ab | 8,9 | b | 13,9 | bc | 127,6 | ab | 21,3 | d | |
| CP_PP | 0,08 | ab | 3,7 | b | 11,9 | bc | 115,7 | abc | 29,6 | bcd | |
| CP_VE | 0,10 | ab | 11,7 | b | 14,5 | bc | 138,0 | a | 29,6 | bcd | |
| CP_ZE | 0,06 | b | 2,2 | b | 5,4 | c | 108,5 | bc | 23,6 | cd | |
| SC_EC | 0,07 | ab | 4,7 | b | 7,8 | bc | 104,2 | bc | 32,7 | abcd | |
| SC_PE | 0,06 | b | 1,3 | b | 22,7 | ab | 105,1 | bc | 33,0 | abcd | |
| SC_PP | 0,07 | ab | 1,1 | b | 9,5 | bc | 105,4 | bc | 35,0 | abc | |
| SC_VE | 0,10 | ab | 1,4 | b | 6,0 | c | 109,9 | bc | 32,2 | abcd | |
| SC_ZE | 0,09 | ab | 1,2 | b | 4,6 | c | 109,1 | bc | 30,9 | abcd | |

ANEXO 3. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”

Tabla 54. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y raíz (Pf. Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | Pf Aérea | | Pf Raíz | |
|-----------|----------|------------------|---------|----------|
| | g | | | |
| CA100 | 5,4 | klmnopqrstu | 4,5 | pqrs |
| CP100 | 6,0 | efghijklmnopqrs | 5,3 | nopqr |
| SC100 | 7,0 | abcdefghi | 6,7 | fghijklm |
| EC100 | 5,5 | jklmnopqrstu | 5,5 | lmnopq |
| PE100 | 5,8 | ghijklmnopqrstu | 7,5 | cdefghi |
| PP100 | 4,3 | uvw | 3,3 | st |
| VE100 | 6,2 | cdefghijklmnopqr | 8,4 | abcd |
| ZE100 | 3,8 | wx | 5,4 | mnopqr |
| CA75-EC25 | 6,3 | cdefghijklmnopq | 4,5 | pqrs |
| CA75-PE25 | 3,8 | wx | 5,0 | opqr |
| CA75-PP25 | 5,3 | mnopqrstuv | 6,4 | hijklmno |
| CA75-VE25 | 6,7 | abcdefghijklm | 6,6 | ghijklmn |
| CA75-ZE25 | 5,9 | fghijklmnopqrs | 6,3 | hijklmno |
| CA50-EC50 | 7,2 | abcdef | 2,9 | t |
| CA50-PE50 | 6,6 | abcdefghijklmno | 9,2 | ab |
| CA50-PP50 | 6,8 | abcdefghijkl | 4,4 | qrs |
| CA50-VE50 | 6,5 | abcdefghijklmnop | 6,3 | ijklmno |
| CA50-ZE50 | 6,3 | cdefghijklmnopq | 3,4 | st |
| CA25-EC75 | 7,4 | abcde | 5,9 | jklmno |
| CA25-PE75 | 6,1 | defghijklmnopqr | 7,1 | defghij |
| CA25-PP75 | 6,7 | abcdefghijklmn | 4,2 | qrst |
| CA25-VE75 | 6,9 | abcdefghij | 5,3 | nopqr |
| CA25-ZE75 | 7,2 | abcdefg | 8,2 | bcde |
| CP75-EC25 | 5,2 | nopqrstuvwxyz | 3,3 | st |
| CP75-PE25 | 5,3 | mnopqrstuvwxyz | 6,0 | jklmno |
| CP75-PP25 | 7,8 | ab | 5,4 | lmnopq |
| CP75-VE25 | 6,2 | cdefghijklmnopqr | 6,3 | hijklmno |
| CP75-ZE25 | 6,8 | abcdefghijk | 6,9 | efghijk |
| CP50-EC50 | 7,6 | abc | 6,5 | ghijklmn |

| SUSTRATO | Pf Aérea | | Pf Raíz | |
|-----------|----------|-----------------|---------|----------|
| | g | | | |
| CP50-PE50 | 5,7 | ijklmnopqrstu | 7,8 | cdefg |
| CP50-PP50 | 6,0 | efghijklmnopqrs | 5,8 | ijklmnop |
| CP50-VE50 | 4,8 | rstuvw | 4,5 | pqrs |
| CP50-ZE50 | 5,3 | lmnopqrstu | 6,1 | ijklmno |
| CP25-EC75 | 5,7 | hijklmnopqrstu | 5,5 | lmnopq |
| CP25-PE75 | 5,8 | fghijklmnopqrst | 5,6 | klmnopq |
| CP25-PP75 | 6,4 | bcdefghijklmnop | 7,6 | cdefghi |
| CP25-VE75 | 5,0 | pqrstuvw | 5,3 | mnopqr |
| CP25-ZE75 | 4,9 | qrstuvw | 4,1 | rst |
| SC75-EC25 | 7,5 | abcd | 6,8 | fghijkl |
| SC75-PE25 | 3,7 | x | 7,5 | cdefghi |
| SC75-PP25 | 3,9 | vwx | 7,1 | defghij |
| SC75-VE25 | 5,2 | opqrstuvwxyz | 6,7 | fghijkl |
| SC75-ZE25 | 5,9 | fghijklmnopqrs | 7,1 | defghij |
| SC50-EC50 | 7,2 | abcdefgh | 7,1 | defghij |
| SC50-PE50 | 4,6 | stuvw | 7,6 | cdefgh |
| SC50-PP50 | 5,6 | ijklmnopqrstu | 8,8 | abc |
| SC50-VE50 | 4,6 | stuvw | 9,6 | a |
| SC50-ZE50 | 6,9 | abcdefghij | 6,0 | ijklmno |
| SC25-EC75 | 6,8 | abcdefghijk | 6,9 | efghij |
| SC25-PE75 | 4,4 | tuvw | 8,2 | bcde |
| SC25-PP75 | 7,9 | a | 8,0 | bcdef |
| SC25-VE75 | 5,0 | pqrstuvw | 7,0 | efghij |
| SC25-ZE75 | 6,4 | bcdefghijklmnop | 7,0 | efghij |

Tabla 55. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y raíz (Pf. Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico-material mineral) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos de sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), demás datos son medias de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | Pf Aérea | | Pf Raíz | |
|----------|----------|------|---------|-----|
| | g | | | |
| CA100 | 5,40 | bcd | 4,50 | bc |
| CP100 | 6,00 | abcd | 5,30 | bc |
| SC100 | 7,03 | ab | 6,67 | abc |
| EC100 | 5,50 | bcd | 5,53 | abc |
| PE100 | 5,77 | abcd | 7,53 | ab |
| PP100 | 4,33 | cd | 3,30 | c |

| SUSTRATO | Pf Aérea | | Pf Raíz | |
|----------|----------|------|---------|-----|
| | g | | | |
| VE100 | 6,17 | abcd | 8,37 | a |
| ZE100 | 3,83 | d | 5,37 | bc |
| CA_EC | 6,97 | ab | 4,44 | c |
| CA_PE | 5,50 | bcd | 7,10 | ab |
| CA_PP | 6,24 | abc | 4,99 | bc |
| CA_VE | 6,70 | ab | 6,06 | abc |
| CA_ZE | 6,46 | ab | 5,98 | abc |
| CP_EC | 6,18 | abc | 5,10 | bc |
| CP_PE | 5,60 | bcd | 6,44 | abc |
| CP_PP | 6,72 | ab | 6,28 | abc |
| CP_VE | 5,34 | bcd | 5,38 | bc |
| CP_ZE | 5,70 | bcd | 5,69 | abc |
| SC_EC | 7,17 | a | 6,92 | ab |
| SC_PE | 4,21 | d | 7,80 | a |
| SC_PP | 5,80 | abcd | 7,98 | a |
| SC_VE | 4,92 | cd | 7,79 | a |
| SC_ZE | 6,39 | ab | 6,70 | ab |

Tabla 56. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).

| SUSTRATO | N | | P | | K | | Ca | | Mg | | S | | Na | |
|-----------|------|---------|-------|--------|------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-----|-------|---------|
| | % | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 1,8 | defgh | 0,3 | abcdef | 1,95 | abcde | 0,583 | abcd | 0,273 | cdefgh | 0,123 | abc | 0,243 | cdefg |
| CP100 | 2,4 | a | 0,273 | abcdef | 1,93 | abcdef | 0,597 | abcd | 0,217 | gh | 0,137 | abc | 0,317 | abcd |
| SC100 | 1,99 | bcdefg | 0,26 | abcdef | 2,2 | ab | 0,503 | abcd | 0,2 | gh | 0,13 | abc | 0,24 | cdefg |
| EC100 | 1,76 | fgh | 0,26 | abcdef | 1,7 | bcdef | 0,613 | abcd | 0,213 | gh | 0,14 | abc | 0,24 | cdefg |
| PE100 | 1,78 | efgh | 0,237 | cdef | 1,79 | abcdef | 0,493 | abcd | 0,183 | gh | 0,123 | abc | 0,187 | fg |
| PP100 | 1,94 | bcdefgh | 0,247 | cdef | 1,89 | abcdef | 0,53 | abcd | 0,177 | gh | 0,123 | abc | 0,223 | defg |
| VE100 | 1,91 | bcdefgh | 0,253 | bcdef | 2,02 | abcd | 0,497 | abcd | 0,39 | abc | 0,13 | abc | 0,243 | cdefg |
| ZE100 | 1,67 | gh | 0,21 | f | 1,59 | cdef | 0,56 | abcd | 0,19 | gh | 0,11 | c | 0,187 | fg |
| CA75-EC25 | 1,9 | bcdefgh | 0,34 | ab | 2,01 | abcde | 0,717 | a | 0,273 | cdefgh | 0,127 | abc | 0,22 | defg |
| CA75-PE25 | 1,99 | bcdefg | 0,3 | abcdef | 1,9 | abcdef | 0,607 | abcd | 0,35 | abcdef | 0,13 | abc | 0,273 | abcdefg |
| CA75-PP25 | 1,89 | bcdefgh | 0,327 | abc | 1,99 | abcde | 0,68 | abc | 0,243 | efgh | 0,133 | abc | 0,22 | defg |
| CA75-VE25 | 1,98 | bcdefgh | 0,327 | abc | 2,1 | abcd | 0,647 | abcd | 0,26 | defgh | 0,12 | abc | 0,227 | cdefg |
| CA75-ZE25 | 1,96 | bcdefgh | 0,26 | abcdef | 1,8 | abcdef | 0,567 | abcd | 0,213 | gh | 0,12 | abc | 0,21 | defg |
| CA50-EC50 | 1,89 | bcdefgh | 0,277 | abcdef | 1,66 | bcdef | 0,623 | abcd | 0,223 | gh | 0,133 | abc | 0,253 | bcdefg |

| SUSTRATO | N | | P | | K | | Ca | | Mg | | S | | Na | |
|-----------|------|---------|-------|--------|------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-----|-------|---------|
| | % | | | | | | | | | | | | | |
| CA50-PE50 | 2,04 | abcdefg | 0,28 | abcdef | 1,97 | abcde | 0,52 | abcd | 0,36 | abcde | 0,133 | abc | 0,247 | cdefg |
| CA50-PP50 | 1,98 | bcdefgh | 0,267 | abcdef | 2,01 | abcde | 0,557 | abcd | 0,213 | gh | 0,127 | abc | 0,187 | fg |
| CA50-VE50 | 2,15 | abcde | 0,347 | a | 2,32 | a | 0,7 | ab | 0,277 | cdefgh | 0,15 | ab | 0,277 | abcdefg |
| CA50-ZE50 | 2,06 | abcdef | 0,293 | abcdef | 2 | abcde | 0,6 | abcd | 0,223 | gh | 0,143 | abc | 0,247 | cdefg |
| CA25-EC75 | 1,91 | bcdefgh | 0,253 | bcdef | 1,7 | bcdef | 0,61 | abcd | 0,217 | gh | 0,12 | abc | 0,21 | defg |
| CA25-PE75 | 1,91 | bcdefgh | 0,257 | abcdef | 1,86 | abcdef | 0,52 | abcd | 0,36 | abcde | 0,13 | abc | 0,227 | cdefg |
| CA25-PP75 | 2,03 | abcdefg | 0,303 | abcde | 1,96 | abcde | 0,56 | abcd | 0,2 | gh | 0,13 | abc | 0,22 | defg |
| CA25-VE75 | 1,93 | bcdefgh | 0,277 | abcdef | 1,84 | abcdef | 0,577 | abcd | 0,223 | gh | 0,123 | abc | 0,24 | cdefg |
| CA25-ZE75 | 2,05 | abcdefg | 0,313 | abcd | 2,01 | abcde | 0,68 | abc | 0,21 | gh | 0,15 | ab | 0,223 | defg |
| CP75-EC25 | 2,14 | abcdef | 0,233 | def | 1,81 | abcdef | 0,583 | abcd | 0,197 | gh | 0,13 | abc | 0,24 | cdefg |
| CP75-PE25 | 2,07 | abcdef | 0,257 | abcdef | 1,94 | abcdef | 0,527 | abcd | 0,36 | abcde | 0,137 | abc | 0,293 | abcdef |
| CP75-PP25 | 2,21 | ab | 0,243 | cdef | 1,77 | abcdef | 0,56 | abcd | 0,207 | gh | 0,133 | abc | 0,36 | ab |
| CP75-VE25 | 2 | bcdefg | 0,24 | cdef | 1,69 | bcdef | 0,473 | bcd | 0,183 | gh | 0,113 | bc | 0,253 | bcdefg |
| CP75-ZE25 | 2,08 | abcdef | 0,237 | cdef | 1,7 | bcdef | 0,517 | abcd | 0,18 | gh | 0,127 | abc | 0,27 | abcdefg |
| CP50-EC50 | 2,13 | abcdef | 0,237 | cdef | 2,02 | abcd | 0,643 | abcd | 0,233 | fgh | 0,127 | abc | 0,253 | bcdefg |
| CP50-PE50 | 1,83 | bcdefgh | 0,23 | def | 1,58 | def | 0,447 | d | 0,377 | abcd | 0,117 | abc | 0,287 | abcdef |
| CP50-PP50 | 2 | bcdefg | 0,233 | def | 1,72 | bcdef | 0,577 | abcd | 0,223 | gh | 0,123 | abc | 0,373 | a |
| CP50-VE50 | 1,99 | bcdefg | 0,23 | def | 1,61 | bcdef | 0,507 | abcd | 0,187 | gh | 0,127 | abc | 0,273 | abcdefg |
| CP50-ZE50 | 1,81 | cdefgh | 0,217 | ef | 1,34 | f | 0,463 | cd | 0,16 | h | 0,12 | abc | 0,27 | abcdefg |
| CP25-EC75 | 2,08 | abcdef | 0,227 | def | 1,66 | bcdef | 0,587 | abcd | 0,187 | gh | 0,127 | abc | 0,257 | bcdefg |
| CP25-PE75 | 1,95 | bcdefgh | 0,253 | bcdef | 1,75 | abcdef | 0,473 | bcd | 0,4 | ab | 0,127 | abc | 0,297 | abcde |
| CP25-PP75 | 2,01 | bcdefg | 0,227 | def | 1,62 | bcdef | 0,513 | abcd | 0,19 | gh | 0,117 | abc | 0,333 | abc |
| CP25-VE75 | 1,89 | bcdefgh | 0,22 | ef | 1,6 | bcdef | 0,487 | bcd | 0,177 | gh | 0,117 | abc | 0,273 | abcdefg |
| CP25-ZE75 | 1,59 | h | 0,213 | ef | 1,42 | ef | 0,48 | bcd | 0,167 | gh | 0,11 | c | 0,253 | bcdefg |
| SC75-EC25 | 2,16 | abcde | 0,263 | abcdef | 1,97 | abcde | 0,567 | abcd | 0,283 | bcdefg | 0,14 | abc | 0,217 | defg |
| SC75-PE25 | 2,18 | abcd | 0,267 | abcdef | 2,18 | abc | 0,5 | abcd | 0,277 | cdefgh | 0,153 | a | 0,227 | cdefg |
| SC75-PP25 | 1,94 | bcdefgh | 0,223 | def | 1,66 | bcdef | 0,437 | d | 0,187 | gh | 0,113 | bc | 0,233 | cdefg |
| SC75-VE25 | 2,01 | bcdefg | 0,237 | cdef | 1,96 | abcde | 0,523 | abcd | 0,217 | gh | 0,127 | abc | 0,24 | cdefg |
| SC75-ZE25 | 2,01 | bcdefg | 0,263 | abcdef | 1,84 | abcdef | 0,57 | abcd | 0,227 | gh | 0,123 | abc | 0,217 | defg |
| SC50-EC50 | 2,14 | abcdef | 0,253 | bcdef | 2,02 | abcd | 0,653 | abcd | 0,22 | gh | 0,123 | abc | 0,19 | efg |
| SC50-PE50 | 1,96 | bcdefgh | 0,23 | def | 1,74 | abcdef | 0,487 | bcd | 0,247 | efgh | 0,123 | abc | 0,187 | fg |
| SC50-PP50 | 1,98 | bcdefg | 0,23 | def | 1,66 | bcdef | 0,577 | abcd | 0,203 | gh | 0,13 | abc | 0,223 | defg |
| SC50-VE50 | 2,09 | abcdef | 0,247 | cdef | 1,74 | abcdef | 0,517 | abcd | 0,197 | gh | 0,137 | abc | 0,233 | cdefg |
| SC50-ZE50 | 1,96 | bcdefgh | 0,27 | abcdef | 1,72 | bcdef | 0,593 | abcd | 0,22 | gh | 0,143 | abc | 0,22 | defg |
| SC25-EC75 | 2,19 | abc | 0,253 | bcdef | 1,79 | abcdef | 0,533 | abcd | 0,197 | gh | 0,133 | abc | 0,173 | g |
| SC25-PE75 | 2,02 | abcdefg | 0,24 | cdef | 1,74 | abcdef | 0,487 | bcd | 0,447 | a | 0,123 | abc | 0,197 | efg |
| SC25-PP75 | 1,92 | bcdefgh | 0,223 | def | 1,9 | abcdef | 0,557 | abcd | 0,213 | gh | 0,123 | abc | 0,24 | cdefg |
| SC25-VE75 | 2 | bcdefg | 0,233 | def | 1,84 | abcdef | 0,487 | bcd | 0,197 | gh | 0,123 | abc | 0,207 | efg |
| SC25-ZE75 | 1,97 | bcdefgh | 0,247 | cdef | 1,76 | abcdef | 0,543 | abcd | 0,17 | gh | 0,15 | ab | 0,233 | cdefg |

Tabla 57. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico – material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | N | | P | | K | | Ca | | Mg | | S | | Na | |
|----------|------|------|-------|-----|------|-----|-------|------|-------|-----|-------|---|-------|------|
| | % | | | | | | | | | | | | | |
| CA100 | 1,8 | de | 0,3 | ab | 1,95 | abc | 0,583 | abcd | 0,273 | abc | 0,123 | a | 0,243 | bcde |
| CP100 | 2,4 | a | 0,273 | abc | 1,93 | abc | 0,597 | abcd | 0,217 | c | 0,137 | a | 0,317 | ab |
| SC100 | 1,99 | bcde | 0,26 | bc | 2,2 | a | 0,503 | cd | 0,2 | c | 0,13 | a | 0,24 | bcde |
| EC100 | 1,76 | de | 0,26 | abc | 1,7 | bc | 0,613 | abcd | 0,213 | c | 0,14 | a | 0,24 | bcde |
| PE100 | 1,78 | de | 0,237 | bc | 1,79 | abc | 0,493 | cd | 0,183 | c | 0,123 | a | 0,187 | e |
| PP100 | 1,94 | bcde | 0,247 | bc | 1,89 | abc | 0,53 | abcd | 0,177 | c | 0,123 | a | 0,223 | cde |
| VE100 | 1,91 | bcde | 0,253 | bc | 2,02 | ab | 0,497 | cd | 0,39 | a | 0,13 | a | 0,243 | bcde |
| ZE100 | 1,67 | e | 0,21 | c | 1,59 | bc | 0,56 | abcd | 0,19 | c | 0,11 | a | 0,187 | e |
| CA_EC | 2,02 | bcd | 0,289 | ab | 1,94 | abc | 0,616 | abc | 0,216 | c | 0,138 | a | 0,227 | cde |
| CA_PE | 2,02 | bcd | 0,317 | a | 2,09 | a | 0,641 | ab | 0,253 | bc | 0,131 | a | 0,248 | bcde |
| CA_PP | 1,97 | bcde | 0,299 | ab | 1,99 | ab | 0,599 | abcd | 0,219 | c | 0,13 | a | 0,209 | de |
| CA_VE | 1,98 | bcde | 0,279 | ab | 1,91 | abc | 0,549 | abcd | 0,357 | a | 0,131 | a | 0,249 | bcd |
| CA_ZE | 1,9 | cde | 0,29 | ab | 1,79 | abc | 0,65 | a | 0,238 | c | 0,127 | a | 0,228 | cde |
| CP_EC | 1,83 | de | 0,222 | c | 1,49 | c | 0,487 | d | 0,169 | c | 0,119 | a | 0,264 | bc |
| CP_PE | 1,96 | bcde | 0,23 | bc | 1,63 | bc | 0,489 | d | 0,182 | c | 0,119 | a | 0,267 | bc |
| CP_PP | 2,07 | bc | 0,234 | bc | 1,7 | bc | 0,55 | abcd | 0,207 | c | 0,124 | a | 0,356 | a |
| CP_VE | 1,95 | bcde | 0,247 | bc | 1,76 | abc | 0,482 | d | 0,379 | a | 0,127 | a | 0,292 | b |
| CP_ZE | 2,11 | abc | 0,232 | bc | 1,83 | abc | 0,604 | abcd | 0,206 | c | 0,128 | a | 0,25 | bcd |
| SC_EC | 1,98 | bcde | 0,26 | bc | 1,77 | abc | 0,569 | abcd | 0,206 | c | 0,139 | a | 0,223 | cde |
| SC_PE | 2,03 | bcd | 0,239 | bc | 1,85 | abc | 0,509 | cd | 0,203 | c | 0,129 | a | 0,227 | cde |
| SC_PP | 1,95 | bcde | 0,226 | c | 1,74 | abc | 0,523 | bcd | 0,201 | c | 0,122 | a | 0,232 | cde |
| SC_VE | 2,05 | bc | 0,246 | bc | 1,89 | abc | 0,491 | d | 0,323 | ab | 0,133 | a | 0,203 | de |
| SC_ZE | 2,16 | ab | 0,257 | bc | 1,93 | abc | 0,584 | abcd | 0,233 | c | 0,132 | a | 0,193 | e |

Tabla 58. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico-material mineral-proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

| SUSTRATO | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | B | |
|----------|---------------------|------|-----|---|------|------|------|------------|------|-----------|
| | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | | | |
| CA100 | 0,06 | nopq | 249 | a | 3,73 | mnop | 52,4 | fghijklmno | 53,4 | ijklmnopq |

| SUSTRATO | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | B | |
|-----------|--------|-------------|---------------------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-----------|
| | % | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CP100 | 0,17 | abc | 160 | cdefghijkl | 7,33 | abcdef | 44,9 | ijklmno | 34,1 | opqr |
| SC100 | 0,06 | nopq | 118 | hijklmnop | 3 | op | 73,4 | bcdefghijk | 83,6 | efghi |
| EC100 | 0,1567 | bcde | 120 | ghijklmnop | 4,7 | hijklmnop | 68,2 | cdefghijklmn | 64,7 | ghijklmno |
| PE100 | 0,0833 | klmnopq | 120 | ghijklmnop | 2,57 | p | 92,4 | abcd | 90,7 | cdefgh |
| PP100 | 0,0533 | opq | 118 | ghijklmnop | 4,37 | jklmnop | 39,9 | mno | 23,5 | qr |
| VE100 | 0,0933 | hijklmnopq | 93,7 | op | 3,3 | nop | 63,4 | defghijklmno | 102 | cde |
| ZE100 | 0,13 | bcdefghijk | 92,7 | p | 4,57 | ijklmnop | 104 | ab | 135 | ab |
| CA75-EC25 | 0,06 | nopq | 160 | cdefghijkl | 4,6 | hijklmnop | 99,3 | abc | 43,2 | mnopqr |
| CA75-PE25 | 0,06 | nopq | 161 | bcdefghijk | 5,5 | defghijklmn | 110 | a | 85,2 | efgh |
| CA75-PP25 | 0,05 | pq | 166 | bcdefghij | 4,8 | hijklmnop | 67,5 | cdefghijklmn | 68,2 | ghijklmn |
| CA75-VE25 | 0,05 | pq | 168 | bcdefghi | 4,53 | ijklmnop | 66,1 | defghijklmno | 99,6 | cdef |
| CA75-ZE25 | 0,0633 | nopq | 169 | bcdefghi | 4,17 | klmnop | 59,9 | efghijklmno | 67,2 | ghijklmn |
| CA50-EC50 | 0,0767 | lmnopq | 171 | bcdefghi | 4,77 | hijklmnop | 83 | abcdef | 69,2 | fghijklmn |
| CA50-PE50 | 0,09 | hijklmnopq | 173 | bcdefghi | 5,2 | efghijklmno | 46,4 | ijklmno | 24,6 | qr |
| CA50-PP50 | 0,07 | mnopq | 173 | bcdefghi | 4,9 | ghijklmno | 77,1 | bcdefgh | 39,3 | mnopqr |
| CA50-VE50 | 0,0433 | q | 175 | bcdefgh | 4,9 | ghijklmno | 52,3 | fghijklmno | 25,7 | qr |
| CA50-ZE50 | 0,1033 | fghijklmno | 176 | bcdefg | 5,73 | cdefghijklm | 81,2 | abcdefg | 89,7 | defgh |
| CA25-EC75 | 0,0767 | lmnopq | 180 | bcdef | 4,97 | ghijklmno | 76,3 | bcdefghi | 66,1 | ghijklmn |
| CA25-PE75 | 0,0833 | klmnopq | 186 | bcde | 5,27 | efghijklmno | 92,9 | abcd | 104 | cde |
| CA25-PP75 | 0,08 | klmnopq | 210 | abcd | 4,87 | ijklmno | 83,7 | abcdef | 77,5 | efghijk |
| CA25-VE75 | 0,08 | klmnopq | 213 | abc | 5,23 | efghijklmno | 61,7 | defghijklmno | 46,5 | lmnopqr |
| CA25-ZE75 | 0,07 | mnopq | 218 | ab | 5,7 | cdefghijklm | 98,7 | abc | 119 | abcd |
| CP75-EC25 | 0,1367 | bcdefghi | 122 | ghijklmnop | 6,77 | bcdefghi | 61,5 | defghijklmno | 78,2 | efghij |
| CP75-PE25 | 0,13 | bcdefghijk | 122 | ghijklmnop | 8,03 | ab | 70,8 | cdefghijklm | 140 | a |
| CP75-PP25 | 0,12 | cdefghijklm | 126 | fghijklmnop | 6,13 | bcdefghijkl | 75,1 | bcdefghijk | 107 | bcde |
| CP75-VE25 | 0,0867 | ijklmnopq | 129 | efghijklmnop | 7,43 | abcde | 52,9 | fghijklmno | 69,7 | fghijklm |
| CP75-ZE25 | 0,1167 | defghijklm | 129 | efghijklmnop | 7,37 | abcde | 53,6 | fghijklmno | 46,7 | klmnopqr |
| CP50-EC50 | 0,11 | efghijklmn | 131 | efghijklmnop | 7,3 | abcdef | 71,3 | cdefghijklm | 88,2 | defgh |
| CP50-PE50 | 0,1633 | abcd | 132 | efghijklmnop | 7,77 | abcd | 70,7 | cdefghijklm | 88,1 | defgh |
| CP50-PP50 | 0,1333 | bcdefghij | 137 | efghijklmnop | 6,4 | bcdefghijk | 76,1 | bcdefghij | 76,8 | efghijkl |
| CP50-VE50 | 0,1267 | cdefghijkl | 137 | efghijklmnop | 6,87 | bcdefgh | 39,8 | mno | 33,3 | pqr |
| CP50-ZE50 | 0,1467 | bcdefg | 138 | efghijklmnop | 7,97 | abc | 52 | fghijklmno | 42,4 | mnopqr |
| CP25-EC75 | 0,13 | bcdefghijk | 150 | efghijklmnop | 6,6 | bcdefghij | 70,4 | cdefghijklmn | 80,3 | efghij |
| CP25-PE75 | 0,1533 | bcdef | 151 | efghijklmno | 6,8 | bcdefghi | 56,3 | fghijklmno | 82,7 | efghi |
| CP25-PP75 | 0,1233 | cdefghijkl | 152 | defghijklmn | 7,17 | abcdefg | 72,2 | cdefghijkl | 94,2 | cdefg |
| CP25-VE75 | 0,1067 | efghijklmn | 154 | defghijklm | 9,37 | a | 63,9 | defghijklmno | 63,2 | hijklmnop |
| CP25-ZE75 | 0,14 | bcdefgh | 154 | defghijklm | 7,33 | abcdef | 76,5 | bcdefghi | 79,8 | efghij |
| SC75-EC25 | 0,13 | bcdefghijk | 94,3 | nop | 4,63 | hijklmnop | 62,2 | defghijklmno | 66,5 | ghijklmn |
| SC75-PE25 | 0,1033 | fghijklmno | 95,8 | mnop | 4,9 | ghijklmno | 48,9 | ijklmno | 24,6 | qr |

| SUSTRATO | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | B | |
|-----------|--------|-------------|---------------------|-----------|------|-------------|------|------------|------|-----------|
| | % | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| SC75-PP25 | 0,1 | ghijklmnop | 96,2 | mnop | 4,1 | lmnop | 55,5 | fghijklmno | 38,8 | nopqr |
| SC75-VE25 | 0,08 | klmnopq | 97,6 | mnop | 5,23 | efghijklmno | 98,7 | abc | 121 | abc |
| SC75-ZE25 | 0,0867 | ijklmnopq | 99,3 | mnop | 4,87 | hijklmno | 44,5 | jklmno | 24,6 | qr |
| SC50-EC50 | 0,1233 | cdefghijkl | 101 | mnop | 4,47 | jklmnop | 74,6 | bcdefghijk | 78 | efghij |
| SC50-PE50 | 0,13 | bcdefghijk | 102 | lmnop | 4,47 | jklmnop | 34,5 | o | 25,9 | qr |
| SC50-PP50 | 0,11 | efghijklmn | 103 | lmnop | 4,4 | jklmnop | 53,9 | fghijklmno | 23,9 | qr |
| SC50-VE50 | 0,12 | cdefghijklm | 103 | lmnop | 4,93 | ghijklmno | 41 | lmno | 23,7 | qr |
| SC50-ZE50 | 0,1367 | bcdefghi | 104 | klmnop | 5,2 | efghijklmno | 89,9 | abcde | 104 | cde |
| SC25-EC75 | 0,1067 | efghijklmn | 107 | klmnop | 5,07 | fghijklmno | 50,8 | ghijklmno | 31,9 | qr |
| SC25-PE75 | 0,2133 | a | 108 | jklmnop | 4,87 | hijklmno | 76,2 | bcdefghij | 50,4 | jklmnopqr |
| SC25-PP75 | 0,08 | klmnopq | 115 | ijklmnop | 5,53 | defghijklmn | 38,6 | no | 21,1 | r |
| SC25-VE75 | 0,18 | ab | 117 | hijklmnop | 4,7 | hijklmnop | 45,9 | hijklmno | 25,9 | qr |
| SC25-ZE75 | 0,1367 | bcdefghi | 117 | hijklmnop | 5,63 | defghijklm | 44,2 | klmno | 26,4 | qr |

Tabla 59. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

| SUSTRATO | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | B | |
|----------|--------|------|---------------------|------|------|------|------|-----|------|-------|
| | % | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CA100 | 0,06 | de | 137 | cdef | 3,73 | defg | 52,4 | bc | 53,4 | cde |
| CP100 | 0,17 | a | 249 | a | 7,33 | ab | 44,9 | c | 34,1 | cde |
| SC100 | 0,06 | de | 99,3 | f | 3 | fg | 73,4 | abc | 83,6 | abcde |
| EC100 | 0,1567 | ab | 103 | f | 4,7 | defg | 68,2 | abc | 64,7 | bcde |
| PE100 | 0,0833 | bcde | 107 | f | 2,57 | g | 92,4 | ab | 90,7 | abcd |
| PP100 | 0,0533 | e | 92,7 | f | 4,37 | defg | 39,9 | c | 23,5 | e |
| VE100 | 0,0933 | bcde | 160 | cde | 3,3 | efg | 63,4 | abc | 102 | abc |
| ZE100 | 0,13 | abc | 96,2 | f | 4,57 | defg | 104 | a | 135 | a |
| CA_EC | 0,0789 | cde | 126 | ef | 5,2 | d | 79,9 | ab | 91,9 | abc |
| CA_PE | 0,0578 | e | 147 | cde | 4,89 | de | 60 | bc | 57,2 | cde |
| CA_PP | 0,0667 | de | 148 | cde | 4,86 | de | 76,1 | abc | 61,7 | bcde |
| CA_VE | 0,0778 | cde | 125 | ef | 5,32 | cd | 83 | ab | 71,2 | bcde |
| CA_ZE | 0,0711 | cde | 135 | def | 4,78 | def | 86,2 | ab | 59,5 | cde |
| CP_EC | 0,1344 | ab | 167 | cd | 7,56 | ab | 60,7 | bc | 56,3 | cde |
| CP_PE | 0,1067 | bcd | 180 | bc | 7,89 | a | 52,2 | bc | 55,4 | cde |
| CP_PP | 0,1256 | abc | 179 | bc | 6,57 | bc | 74,5 | abc | 92,6 | abc |
| CP_VE | 0,1489 | ab | 166 | cd | 7,53 | ab | 65,9 | abc | 103 | ab |

| SUSTRATO | Fe | | Mn | | Cu | | Zn | | B | |
|----------|--------|------|---------------------|----|------|------|------|-----|------|-------|
| | % | | mg Kg ⁻¹ | | | | | | | |
| CP_ZE | 0,1256 | abc | 201 | b | 6,89 | ab | 67,7 | abc | 82,3 | abcde |
| SC_EC | 0,12 | abc | 106 | f | 5,23 | d | 59,5 | bc | 51,6 | cde |
| SC_PE | 0,1267 | abc | 103 | f | 4,96 | de | 61,9 | bc | 56,8 | cde |
| SC_PP | 0,0967 | bcde | 98 | f | 4,68 | defg | 49,3 | c | 27,9 | e |
| SC_VE | 0,1489 | ab | 110 | f | 4,74 | def | 53,2 | bc | 33,6 | de |
| SC_ZE | 0,12 | abc | 126 | ef | 4,72 | def | 62,5 | bc | 58,8 | cde |